

Novi Eurokod 7: geotehničko projektiranje

New Eurocode 7: geotechnical design

Antun Szavits-Nossan & Tomislav Ivšić

Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Kačićeva 26, 10000 Zagreb

SAŽETAK: Sažeto su prikazani, raspravljani, a dijelom i analizirani osnovni elementi nove europske norme za geotehničko projektiranje EN 1997-1:2004. Detaljnije su raspravljene posebnosti triju ponuđenih pristupa projektiranju za granična stanja nosivosti te je zaključeno da je treći pristup najbliži dosadašnjoj hrvatskoj praksi. Također su naglašeni drugi dijelovi norme koji odstupaju od domaće prakse: nepostojanje pratećih normi za ispitivanje tla kao i za izvođenje geotehničkih konstrukcija. Pledira se na što skorije prevođenje tih normi i njihovo uvođenje u hrvatsku praksu.

Ključne riječi: projektiranje, geotehnika, norma, granična stanja, parcijalni faktori

ABSTRACT: Basic elements of the new European geotechnical code EN 1997-1:2004 are briefly presented, discussed and analyzed. The three design approaches for ultimate limit states were discussed in more details and it was concluded that the third approach is closest to the present Croatian practice. Parts of the code that differ most to the present domestic practice are identified: lack of supporting standards for soil investigation and execution of special geotechnical works. Pledge for immediate translation and implementation of these standards has been laid.

Keywords: design, geotechnics, code, limit states, partial factors

1 UVOD

Članice CEN-a (Europskog odbora za normizaciju), tj. zemlje EU i CEFTA, prihvatile su 2004. godine tekst nove europske norme Eurokod 7: Geotehničko projektiranje – 1. dio: Opća pravila (EN 1997-1:2004). Time je nova norma zamijenila deset godina staru prednormu ENV 1997-1:1994. Nova norma uvodi niz bitnih novina i promjena u odnosu na staru prednormu te traži da svaka od članica CEN-a do kraja 2006. godine definira posebnosti koje su tekstem norme omogućene i koje će vrijediti na ozemlju te članice. Ove su posebnosti strogo ograničene i unose se u normu kroz Nacionalni dodatak, a odnose se na parametre (parcijalni, modelski i korelacijski faktori) jednog ili više izabranih između tri ponuđena pristupa projektiranju, parametre koji određuju dozvoljene pomake temelja, parametre koji određuju minimalne zahtjeve za geotehničke istražne radove, postupke proračuna i kontrole, te parametre koji se odnose na dimenzioniranje uz pomoć uobičajenih i općenito konzervativnih pravila. Stratešku važnost izrade nacionalnih dodataka dokazuje primjetna i živa aktivnost stručnih krugova članica CEN-a oko postizanja odgovarajućih dogovora. Nova će europska norma za geotehničko projektiranje biti u uporabi usporedno s postojećim normama do kraja 2009. godine kada se nekompatibilne stare norme moraju povući. Nova je norma, jasno, podložna daljnjim doradama.

Nasuprot tome, u Hrvatskoj u srpnju 2006. godine stupa na snagu Tehnički propis za betonske konstrukcije kojemu je sastavni dio i stara europska prednorma za geotehničko

projektiranje (HRN ENV 1997-1, prosinac 2001.). Nedavne rasprave upućuju na slabu upoznatost domaće stručne javnosti sa sadržajem i principima te prednorme pa nije teško zaključiti da je upućenost u novu normu još slabija. Kao doprinos izlasku iz te apsurdne situacije, gdje Hrvatska uvodi u obveznu uporabu normu koja je već gotovo dvije godine u Europi izvan snage, ovaj članak sažeto prikazuje novine nove europske geotehničke norme, a posebno se osvrće na dijelove koje Hrvatska može prilagoditi svojim interesima kroz Nacionalni dodatak. Kako tri ponuđena pristupa projektiranju s pripadnim parametrima čine daleko najveći i najznačajniji dio koji se može prilagoditi kroz Nacionalni dodatak, tom je dijelu nove norme posvećena i najveća pažnja. Iznose se i rezultati nekih dostupnih analiza objavljenih u inozemnoj literaturi kao i najavljena opredjeljenja pojedinih članica CEN-a. Napor je uložena u nepristrano osvjetljavanje prednosti i mana svakog od pristupa kako bi se olakšalo domaćoj stručnoj javnosti što racionalnije donošenje odluke o najpovoljnijem izboru.

Prikaz i rasprava u nastavku usmjerit će se na dva osnovna pravca: (a) na one osnovne elemente EN 1997 koji u potpunosti ili djelomično odudaraju od dosadašnje prakse u Hrvatskoj, i (b) na one dijelove koje je dopušteno prilagoditi nacionalnim posebnostima. Pri tome će se osvrst pokušati zadržati samo na elementima od interesa za širu projektantsku javnost ispuštajući zbog nedostatka prostora dijelove s kojima će se doticati manji broj projekatanta specijalista. Ovaj članak nema za cilj dati cjelovit prikaz nove norme. Tekst novog EN 1997 moguće je nabaviti od odgovarajućeg ureda za standardizaciju jedne od zemalja koje su već prihvatile novu normu (na pr. British Standards Institution, BSI 2004). Detaljni prikaz s brojnim komentarima i uputama za primjenu nove norme s riješenim primjerima pojedinih geotehničkih konstrukcija moguće je naći u Frank i dr. (2004)¹. EN 1997 sastavni je dio sustava eurokodova te se naslanja na uvodni Eurokod (EN 1990) koji je detaljno prikazan i komentiran u Gulvanessian i dr. (2002). EN 1997 se ne odnosi na projektiranje u seizmičkim područjima. To područje pokriveno je u Eurokodu 8 (EN1998) koji je detaljno prikazan u Fardis i dr. (2005). Prikaz i komentari na stari EN 1997 (ENV 1997), koji je imao status prednorme i koji u Europi više nije na snazi, može se naći u Orr i Farrell (1999).

2 SUSTAV EUROKODOVA I PRINCIPI PROJEKTIRANJA

2.1 *Sustav eurokodova, geotehničkog Eurokoda te pratećih normi u geotehnici*

Sustav eurokodova čini skup od slijedećih 10 normi:

- EN 1990 Eurokod 0: Osnove projektiranja konstrukcija,
- EN 1991 Eurokod 1: Djelovanje na konstrukcija,
- EN 1992 Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija,
- EN 1993 Eurokod 3: Projektiranje čeličnih konstrukcija,
- EN 1994 Eurokod 4: Projektiranje kompozitnih čeličnih i betonskih konstrukcija,
- EN 1995 Eurokod 5: Projektiranje drvenih konstrukcija,
- EN 1996 Eurokod 6: Projektiranje zidanih konstrukcija,
- EN 1997 Eurokod 7: Geotehničko projektiranje,
- EN 1998 Eurokod 8: Projektiranje konstrukcija otpornih na potrese,
- EN 1999 Eurokod 9: Projektiranje aluminijskih konstrukcija.

Eurokodovi 2, 3, 4, 5, 6 i 9 su takozvani materijalni eurokodovi relevantni za dijelove konstrukcija iz pojedinih građevinskih materijala, dok su Eurokod 0,1,7 i 8 zajednički za sve konstrukcije. Tako svaki od „materijalnih“ eurokodova čini cjelinu tek uz zajedničke eurokodove i bez njih se ne može koristiti.

Geotehnički Eurokod (EN 1997) sastoji se iz dva dijela (drugi dio nastao je spajanjem drugog i trećeg dijela starog EC 7): EN 1997-1 Geotehničko projektiranje – Dio 1: Opća pravila, te EN 1997-2 Geotehničko projektiranje – Dio 2: Istraživanje i ispitivanje tla. Sadržaj prvog dijela obuhvaća: Osnove geotehničkog projektiranja; Geotehnički podaci; Nadzor pri izvođenju; opažanje i održavanje; Nasipi, sniženje vode, poboljšanje tla i armiranje; Plitki temelji; Temelji na pilotima; Sidra; Potporne konstrukcije; Hidraulički slom; Opća stabilnost; Nasipi; 9 priloga (Parcijalni i korelacijski faktori; Dodatne informacije za projektne pristupe 1, 2 i 3; Proračun

¹ autori ovog priručnika vodili su CEN-ov pododbor SC 7 koji zadužen za izradu Eurokoda 7 (Krebs Ovesen 1990-98, Frank 1998-04 te Schuppener 2004-danas)

graničnih pritisaka tla na vertikalne stijene; Analitički postupak proračun nosivosti tla; Poluempirijski postupak proračuna nosivosti tla; Postupak proračuna slijeganja; Procjena nosivosti stijene; Granične vrijednosti deformacija konstrukcija i pomicanja temelja; Popis provjere za nadzor nad izvođenjem i monitoring ponašanja konstrukcije).

EN-1997 se poziva, osim na ostale navedene norme iz sustava eurokodova, još i na sljedeće norme za izvođenje posebnih geotehničkih radova: EN 1536:1999 Bušeni piloti, EN 1537:1999 Sidra u tlu, EN 12063:1999 Stijene od talpi, EN 12699:2000 Razmičući piloti², EN 14199 Mikropiloti, i EN-ISO 13793:2001 Toplinsko ponašanje zgrada – Toplinsko projektiranje temelja radi izbjegavanja izdizanja od smrzavanja. Još nekoliko normi za posebne geotehničke radove je pri donošenju.

U trenutku pisanja ovog teksta CEN je pripremio konačni oblik EN 1997-2 te se očekuje da ta norma bude prihvaćena još 2006. godine. Ova norma upućuje na razne aspekte kriterija provođenja pojedinih geotehničkih pokusa kao i planiranja te interpretacije pojedinih vrsta geotehničkih istražnih radova, ali se ne upušta u standardizaciju pojedinih pokusa. Standardizacija laboratorijskih i terenskih pokusa na tlu i stijenama u nadležnosti je CEN-ovog tehničkog komiteta TC 341 i u završnoj je fazi pa se uskoro očekuje njihovo donošenje. Tek će se njihovim donošenjem zaokružiti normizacija geotehničkih radova u projektiranju konstrukcija.

EN 1997 se odnosi na konstrukcije obuhvaćene „materijalnim“ eurokodovima te ne obuhvaća „čisto“ geotehničke konstrukcije kao što su nasute brane, klizišta i tunele (mada za te konstrukcije može poslužiti pri projektiranju). S obzirom na različitu praksu projektiranja geotehničkih konstrukcija među zemljama u CEN-u, proizašlu dobrim dijelom iz geoloških specifičnosti i stečenog iskustva u pojedinoj zemlji, EN 1997 daje samo okvirne zahtjeve pri projektiranju u skladu sa suvremenim saznanjima geotehničke struke. Pri tome norma razlikuje načela projektiranja (označene slovom P) koji su obvezni i pravila primjene koja zadovoljavaju načela, ali nisu obvezna. Pravila primjene su uglavnom općenita i ne daju razrađene i detaljne upute za primjenu pojedinih postupaka u projektiranju pa će projektant morati potražiti pomoć ili u drugim normama (kojih kod nas nema i teško je za očekivati da će ih biti) ili će morati konzultirati relevantnu noviju stručnu literaturu. Za neke jednostavnije slučajeve detaljno su dana prihvatljiva pravila primjene (nosivost tla ispod plitkih temelja izračunata iz parametara čvrstoće tla ili korelacijom iz presiometarskog pokusa, slijeganje plitkih temelja, granične vrijednosti pritisaka na potporne zidove, nosivost stijene ispod plitkih temelja). Ako se daju detalji pojedine metode proračuna, oni imaju samo status prihvatljivosti, ali ne i obveze. Međutim, zahtjevi su ipak toliko specifični da od geotehničara specijalista, koji namjerava projektirati po toj normi, traže detaljno poznavanje suvremenog geotehničkog znanja. To ujedno znači i dobro poznavanje odgovarajuće suvremene stručne literature, što u Hrvatskoj nije, nažalost, uvijek ispunjen uvjet.

2.2 Opći principi projektiranja

Opći principi projektiranja prema eurokodovima, definirani normom EN 1990, obuhvaćaju slijedećih šest elemenata.

- a) *Osnovni zahtjevi*: oni se odnose na nosivost, uporabivost, otpornost na požar, robusnost, upravljanje pouzdanošću, projektirani život konstrukcije, trajnost i upravljanje kvalitetom.
- b) *Principi projektiranja prema graničnim stanjima*: projektom treba dokazati da konstrukcija tijekom svog projektiranog života neće prijeći ni jedno od mogućih graničnih stanja koja se definiraju kao granični slučajevi između prihvatljivog i neprihvatljivog ponašanja konstrukcije.
- c) *Definicija osnovnih varijabli*: osnovne varijable u analizi konstrukcija su *djelovanje* (F), *svojstva materijala* (X) i *geometrijski podaci* (a); osnovne veličine tih varijabli nazivaju se *karakterističnim vrijednostima* (F_k , X_k i a_k) i, gdje je to moguće, određuju se iz statističkih podataka ili kao srednje vrijednosti ili kao gornje ili kao donje vrijednosti povezane s nekom zadanom vjerojatnošću da kao takve neće biti premašene. Slijede neki primjeri osnovnih varijabli.

² prema engl. „displacement piles“ u koje spadaju zabijeni i utisnuti piloti

- *Djelovanja* čine: trajna djelovanja³ (oznaka G) kao što je vlastita težina, pritisak vode, pritisak tla i sl. (G može imati jednu vrijednost, obično srednju, ili dvije, G_{sup} i G_{inf} , ako je moguća varijacija veća); djelovanja prednapinjanja (oznaka P); promjenjiva djelovanja (oznaka Q) kao što su prometna opterećenja, opterećenja od temperature, i sl.; slučajna djelovanja (oznaka A) kao što je eksplozija, pad kamenja i sl.; te djelovanja od potresa (oznaka A_E). Pojedina se djelovanja mogu javiti u kombinacijama s drugim djelovanjima (prvenstveno Q djelovanja) pa se u tom slučaju množe kombinacijskim faktorima ψ . Umnožak karakteristične vrijednosti djelovanja s kombinacijskim faktorom daje reprezentativnu vrijednost djelovanja, $F_{\text{rep}} = \psi F_k$. Kombinacijski faktor jednak je ili manji od 1. Neka se djelovanja ne pojavljuju kao sile (mada ih izazivaju) kao što je temperatura ili nametnuti pomak.
 - *Svojstva materijala i proizvoda* su čvrstoća, krutost, vodopropusnost, gustoća i sl.
 - *Geometrijski podaci* su dimenzije građevine i njenih dijelova te njen položaj u okolini, topografija, raspored slojeva tla, razine podzemne vode, razine vode iznad terena itd.
- d) *Modeliranje konstrukcije proračunom i ispitivanjem*: provodi se proračunima na proračunskim modelima ili eksperimentalno s ciljem određivanja učinaka djelovanja na konstrukciju i njene dijelove, te određivanja otpornosti konstrukcije i njenih dijelova.
- e) *Provjera doseganja graničnih stanja metodom parcijalnih faktora* je format postupka kojim se provjerava da učinci djelovanja E (na pr. moment savijanja u presjeku elementa konstrukcije ili opterećenje temelja na tlo) ne ugrožavaju otpornost konstrukcije ili njenih dijelova R (na pr. otpornost presjeka elementa konstrukcije na savijanje, ili pak nosivost tla). Načelno se po tom formatu učinci djelovanja računaju iz umnoška reprezentativnih djelovanja F_{rep} i parcijalnih faktora djelovanja γ_F , a otpornost elementa konstrukcije iz kvocijenta karakterističnih svojstva materijala X_k i parcijalnih faktora materijala γ_M . Veličina parcijalnih faktora odražava moguće odstupanja pojedine varijable od njene karakteristične vrijednosti u pojedinom graničnom stanju za neku dogovorenu vjerojatnost. Time se metoda parcijalnih faktora približava zahtjevima suvremenih teorija i analiza pouzdanosti konstrukcija. Dobivene veličine $F_d = \gamma_F F_{\text{rep}}$ i $X_d = X_k / \gamma_M$ nazivaju se projektnim djelovanjem odnosno projektnim svojstvom materijala, a iz njih izračunati učinci E_d i otpornosti R_d projektnim učincima odnosno projektnim otpornostima. Za proračun učinaka djelovanja i otpornosti služe proračunski modeli. Projektne vrijednosti geometrijskih veličina određuju se kao $a_d = a_k \pm \Delta a$. Prihvatljiva konstrukcija zadovoljava $E_d \leq R_d$. Umjesto primjene parcijalnih faktora na izvoru nesigurnosti, tj. neposredno množenjem reprezentativnih djelovanja odnosno dijeljenjem karakterističnih parametra materijala, mogu se prvo odrediti karakteristični učinci djelovanja i karakteristične otpornosti elementa konstrukcije (određeni iz reprezentativnih odnosno karakterističnih vrijednosti varijabli) da bi se nakon toga odredile njihove projektne vrijednosti množenjem odnosno dijeljenjem s odgovarajućim parcijalnim faktorima. U ovom drugom slučaju, posebno ako su proračunski modeli nelinearni, parcijalni faktori ne odražavaju samo stupanj nesigurnosti osnovnih varijabli, već ovise i o svojstvima proračunskih modela te time gube svoju univerzalnost. Neke od tih mogućnosti prikazane su u tablici 1.
- f) *upravljanjem pouzdanošću s obzirom na radove pri izgradnji* (u što, među ostalim, spada procjena rizika od sloma, razina kontrole projekata, razina nadzora nad izvođenjem i sl.)

Ovi su principi primijenjeni u eurokodovima za konstrukcije prema materijalu iz kojeg su izgrađene. Oni služe, među ostalim, da u slučaju nedorečenosti pojedinog eurokoda olakšaju njihovu pravilnu primjenu. Iz tog se razloga poželjno u praksi prema potrebi konzultirati s EN 1990.

Provjera doseganja graničnih stanja konstrukcije ili njenog dijela počinje izborom odgovarajućih *projektnih situacija*. Projektna situacija je jedan bitan segment u životu konstrukcije (uključujući i faze izgradnje) definiran njenim oblikom i smještajem u okolini (geometrijski podaci), pripadnim opterećenjima i utjecajima (djelovanja i njihove kombinacije) te pripadnim svojstvima materijala i ugrađenih produkata (materijalni podaci, uključivo njihova ovisnost o vremenu i drugim utjecajima). Izbor projektnih situacija treba biti sveobuhvatan tako da ne postoji moguća projektna situacija koja bi bila nepovoljnija po pitanju doseganja nekog od

³ Djelovanja mogu biti sile, ali i pomaci i drugi utjecaji

graničnih stanja od već izabranih situacija. U građevinskom projektu izabrane projektne situacije treba jasno imenovati i opisati. Time se omogućuje bolja kontrola te izbjegava mogućnost previda. Projektne situacije razvrstavaju se na *trajne, prolazne, slučajne* (obično štetne), i *potresne*. Ove posljednje obrađuju se u EN 1998. Vrijednosti parcijalnih faktora ovise o tim vrstama projektnih situacija.

Tablica 1 Neki primjeri primjene metode parcijalnih koeficijenata

| Varijable i funkcije | Napomene |
|--|---|
| Projektne (d), reprezentativne (rep) i karakteristične (k) vrijednosti varijabli (γ - parcijalni faktori, ψ - kombinacijski faktori) | |
| $F_{d,i} = F_{rep,i} \gamma_{F,i}$, $F_{rep,i} = \psi_i F_{k,i}$, $X_{d,j} = X_{k,j} / \gamma_{M,j}$, $a_d = a_k \pm \Delta a$ | djelovanja (F) svojstva materijala (M) geometrijski podaci (a) |
| Varijante proračuna projektnih učinaka djelovanja (E_d) | |
| $E_d = \gamma_E E(\gamma_{F,i} F_{rep,i}; X_{k,j} / \gamma_{M,j}, a_k \pm \Delta a)$ $E_d = E(F_{d,i}; X_{d,j}, a_d)$, $i = 1, 2, 3, \dots$, $j = 1, 2, 3, \dots$ $E_d = \gamma_E E(F_{rep,1}, F_{d,i} / \gamma_E; X_{d,j}, a_d)$ ⁴ , $i = 2, 3, \dots$, $j = 1, 2, \dots$, ($\gamma_{F,1} \rightarrow \gamma_E$) | opći oblik za proračun E_d parcijalni faktori na ulazu u model parcijalni faktori na izlazu iz modela |
| Varijante proračuna projektnih otpornosti (R_d) | |
| $R_d = R(X_{k,i} / \gamma_{M,i}; F_{rep,j} \gamma_{F,j}, a_k \pm \Delta a_k) / \gamma_R$ $R_d = R(X_{d,i}; F_{d,j}, a_d)$, $i = 1, 2, 3, \dots$, $j = 1, 2, 3, \dots$ $R_d = R(X_{k,i}; F_{d,j}, a_d) / \gamma_R$, $i = 1, 2, 3, \dots$, $j = 1, 2, \dots$ $R_d = R(X_{k,1}, X_{d,i} \gamma_{M,1}; F_{rep,j}, a_d) / \gamma_{M,1}$, $i = 2, 3, \dots$, $j = 1, 2, \dots$, ($\gamma_{M,1} \rightarrow \gamma_R$) | opći oblik za proračun R_d parcijalni faktori na ulazu u model parcijalni faktori na izlazu iz modela parcijalni faktori na izlazu iz modela |

Napomena: neposredne varijable funkcija (modela) $E()$ i $R()$ listane su prije oznake “;”, a posredne varijable, koje utječu na funkciju kroz primarne varijable, listane su poslije oznake “;”. Primjer posredne varijable je utjecaj čvrstoće tla (X) na opterećenje potporne konstrukcije (F).

Granična se stanja razvrstavaju s obzirom na štetu koja bi nastala njihovim prelaskom. Tako se razlikuju *granična stanja nosivosti* od *graničnih stanja uporabivosti*. Dok se granična stanja nosivosti odnose na pojave sloma i rušenja konstrukcije te se tiču sigurnosti ljudi i konstrukcija ponekad uključivo i njihovog sadržaja, dotle se granična stanja uporabivosti odnose na normalnu uporabivost konstrukcija (udobnost ljudi, prihvatljivost za strojeve, izgled i sl.). Ponekad se granična stanja uporabivosti mogu dijeliti na nepovratna i na povratna, ovisno o trajnosti štete koja nastaje njihovim prelaskom. Parcijalni faktori za granična stanja nosivosti obično su veći ili jednaki jedinici, dok su za granična stanja uporabivosti obično jednaki jedinici.

Nakon definiranja sveobuhvatnog skupa relevantnih projektnih situacija, projektiranje dalje teče tako da se za svaku projektну situaciju odrede moguća granična stanja te odgovarajući modeli konstrukcije i modeli djelovanja. Provjera da ni jedno od mogućih graničnih stanja neće biti premašeno provodi se primjenom koncepta parcijalnih faktora.

3 PROJEKTIRANJE PREMA EN 1997-1

3.1 Geotehničke kategorije

EN 1997 uvodi klasifikaciju od tri geotehničke kategorije kako bi se racionalizirao opseg istražnih radova i složenost postupka dokazivanja stabilnosti i uporabivosti za građevine bitno različitih stupnjeva složenosti i različitih stupnjeva izloženosti visokom riziku. Tako se geotehnička kategorija 1 odnosi na najjednostavnije konstrukcije (na pr. temelji jednokatnica,

⁴ Neki materijalni parametar $X_{d,l}$ može ponekad preuzeti ulogu djelovanja te postaje primarna varijabla učinka djelovanja $F_{d,m} = X_{d,l} = X_{k,l} / \gamma_{M,l}$; primjeri u geotehnici su moment popuštanja betonskog presjeka pri pojavi plastičnog zgloba u armirano-betonskoj potpornoj stijeni ili sila popuštanja geotehničkog sidra; primjena takve mogućnosti traži posebnu pažnju i oprez jer posredno podrazumijeva duktilno ponašanje konstrukcije pri pojavi popuštanja (duktilnost: omogućavanje velikih zaokreta ili pomaka bez pada momenta savijanja u zglobovima ili silu u sidru)

niski zidovi i nasipi i sl.) gdje istražni radovi mogu obuhvaćati najjednostavnije radnje (pregled terena, primjena iskustva sa susjednih objekata i sl.), a dokazi se stabilnosti mogu zamijeniti usporedivim iskustvom. Sadržaj se norme odnosi prvenstveno na geotehničku kategoriju 2 koja obuhvaća rutinske geotehničke zahvate i čini pretežni sadržaj većine geotehničkih projekata. Za geotehničku kategoriju 3, koju čine vrlo složeni zahvati i zahvati velikog rizika (na pr. temeljenje na mekom tlu, složene građevne jame u blizini postojećih objekata, klizišta, tuneli, visoke nasute brane, nuklearne elektrane i sl.) norma ne daje posebne upute, već traži rigoroznije kriterije i postupke istražnih radova, projektiranja, opažanja i nadziranja pod vodstvom geotehničara specijalista s odgovarajućim (i dokazanim) iskustvom, a normiranje prepušta potrebama.

3.2 *Pet graničnih stanja nosivosti*

Stari Eurokod 7 (1994) tražio je od projektanta da za sve projektne slučajeve analizira tri granična stanja nosivosti, A, B i C, kojima su odgovarale tri skupine parcijalnih koeficijenata za djelovanja i svojstva materijala (ili otpornosti u slučaju pilota). U mnogim je slučajevima jedna od te tri kombinacije bila očito kritična, pa za ostale nije trebalo provoditi formalni računski dokaz.

EN 1997-1 uvodi pet graničnih stanja nosivosti

- (EQU) gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla razmatranog kao kruto tijelo, u kojem čvrstoća konstruktivnog materijala ili tla značajno ne doprinosi otpornosti (na pr. prevrtanje gravitacijskog betonskog zida na podlozi od čvrste stijene)
- (STR) slom ili velika deformacija betonske, metalne, drvene ili zidane konstrukcije ili njenog elementa, uključivo temelje, pilote, sidra i potporne zidove, u kojima čvrstoća konstruktivnog materijala bitno pridonosi otpornosti (na pr. slom pri jakom savijanju armirano-betonske dijafragme, izvijanje pilota u jako mekom tlu, klizanje blokova obalnog zida na vodoravnim reškama među blokovima, popuštanje čelične šipke geotehničkog sidra pod vlačnim opterećenjem, propadanje podložne ploče sidra kroz sloj prskanog betona zaštitne potporne konstrukcije, slom pilota od vodoravnog opterećenja)
- (GEO) slom ili velika deformacija tla pri kojoj čvrstoća tla ili stijene bitno pridonosi otpornosti (na pr. slom tla ispod temelja, slom tla oko vodoravno opterećenog pilota, veliko slijeganje pilota, naginjanje potpornog zida, čupanje sidra iz tla, slom i propadanje tla iznad tunelskog iskopa, klizanje i odron tla, značajno popuštanje oslonca luka mosta, izdizanje i slom dna građevne jame u mekom tlu)
- (UPL) gubitak ravnoteže konstrukcije ili tla uslijed uzgona vode ili drugih vertikalnih sila (na pr. izdizanje lagane podzemne konstrukcije pod pritiskom uzgona podzemne vode, izdizanje i probijanje slabopropusnog sloja tla na dnu građevne jame od uzgona podzemne vode u nižem vodonosnom sloju, čupanje temelja dalekovodnog stupa)
- (HYD) hidrauličko izdizanje (hidraulički slom), interna erozija tla uzrokovana hidrauličkim gradijentima (na pr. hidraulički slom u pjeskovitom dnu građevne jame uslijed vertikalnog strujanja vode prema dnu jame, interna erozija pjeskovitog tla od strujanja vode u nasipu i stvaranje erozijskih kanala)

Prva tri granična stanja uglavnom se podudaraju s onima iz starog Eurokoda 7, dok su zadnja dva nova. U EN 1990 još se definira i granično stanje vezano za zamor materijala (FAT), ali toga nema u EN 1997. Parcijalni faktori za djelovanja i za svojstva materijala razlikuju se za pojedina od ovih pet graničnih stanja. Provjera ovih pet graničnih stanja nosivosti metodom parcijalnih koeficijenata prikazana je na tablici 2.

Tablica 2 Provjera stabilnosti za pet graničnih stanja nosivosti metodom parcijalnih koeficijenata

| Granično stanje | Provjera stabilnosti | Napomene |
|-----------------|---|---|
| EQU | $E_{dst;d} \leq E_{stb;d} + T_d$ | $E_{dst;d} = E(\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d)_{dst}$ je destabilizirajući, a $E_{stb;d} = E(\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d)_{stb}$ stabilizirajući učinak djelovanja; T_d mogući posmični otpor; |
| STR/GEO | $E_d \leq R_d$ | E_d je učinak djelovanja, a R_d otpornost na taj učinak u nekom razmatranom presjeku konstrukcije ili tla (vidi i tablicu 1); |
| UPL | $V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d$ | $V_{dst;d} = G_{dst;d} + Q_{dst;d}$ je kombinacija trajnog (G) i promjenjivog (Q) destabilizirajućeg vertikalnog djelovanja, a $G_{stb;d}$ je stabilizirajuće vertikalno trajno djelovanje; R_d je mogući dodatni projektni otpor izdizanju; |
| HYD | $u_{dst;d} \leq \sigma_{stb;d}$ ili $S_{dst;d} \leq G'_{stb;d}$ | $u_{dst;d}$ odnosno $S_{dst;d}$ su projektni destabilizirajući tlak porne vode na dnu stupca tla odnosno strujna sila u stupcu tla, a $\sigma_{stb;d}$ odnosno $G'_{stb;d}$ su ukupno vertikalno naprezanje na dnu stupca odnosno efektivna težina stupca tla |

3.3 Četiri načina projektiranja

Eurokod 7 razlikuje četiri temeljna načina geotehničkog projektiranja

- koristeći proračune temeljene na analitičkim, polu-empirijskim i numeričkim modelima, što je pretežit postupak za većinu geotehničkih konstrukcija (obično za geotehničke kategorije 2 i 3)
- primjenjujući propisane mjere koje se sastoje od uobičajenih i općenito konzervativnih, na nacionalnoj razini utvrđenih, pravila i postupaka projektiranja, kontrole materijala, postupaka građenja, zaštite i postupaka održavanja; ove se mjere koriste za vrlo jednostavne slučajeve, ili slučajeve vrlo malog rizika kod kojih postoji usporedivo iskustvo i za koje se složeni proračuni ne isplate ili čak koji puta nisu raspoloživi (obično za geotehničku kategoriju 1 u slučaju pravila projektiranja, kao što je na primjer, preporuka o dubini plitkog temelja radi izbjegavanja utjecaja smrzavanja tla, ili pravila kontrole kvalitete, nadzora i sl.)
- koristeći eksperimentalne modele i probna opterećenja na dijelovima konstrukcije ili na modelima u malom li u punom mjerilu; to su postupci koji se najčešće koriste pri projektiranju geotehničkih sidara, rjeđe pilota
- koristeći metodu opažanja (Nicholson i dr. 1999, Szavits-Nossan 2006) kojom se projekt tijekom građenja neprekidno preispituje temeljem sustavnog opažanja; ovaj inače stari postupak, čijom primjenom je Terzaghi stekao dobar dio svoje slave, a Peck (1967) ga je formalizirao, izgleda dobiva razvojem tehnika opažanja sve više pobornika (obično za geotehničku kategoriju 3).

Eurokod 7 se najviše bavi projektiranjem metodom proračuna, a nešto manje projektiranjem uz pomoć eksperimentalnih modela (samo za pilote i sidra). O metodi opažanja govori se vrlo malo, dok projektiranje propisanim mjerama, dok nije u suprotnosti s normom, Eurokod 7 prepušta da se eventualno definira ili referencira u nacionalnom dodatku.

3.4 Tri projektna pristupa

Stari Eurokod 7 je predviđao tri kombinacije parcijalnih faktora, A, B i C, s kojima se trebala provjeriti stabilnost konstrukcije za svako granično stanje nosivosti. U mnogim praktičnim slučajevima bilo je očito koja je kombinacija za taj slučaj kritična pa za ostale kombinacije nije trebala računski provjera. Takvim su postupkom mnogi bili nezadovoljni te su predloženi i drugačiji pristupi. U raspravama su se izdvojila tri pristupa za granična stanja STR i GEO, ali nije uspostavljen konsenzus kojeg da se prihvati. Rješenje je nađeno da se u normu uključe sva tri pristupa s time da se prepusti pojedinim zemljama da izaberu za sebe najpovoljnije rješenje i to objave u nacionalnom dodatku normi. Omogućeno je da se prihvate različiti pristupi za različite vrste konstrukcija i da se parcijalni faktori prilagode vlastitim potrebama i uvjetima. Predloženi parcijalni faktori izabrani su tako da se konstrukcije dimenzionirane po različitim

pristupima razlikuju što manje, ali određene razlike, ne uvijek beznačajne su ostale. Oko prihvaćanja pojedinog pristupa danas se u članicama CEN-a vodi žučna rasprava te lobiranje suprotstavljenih grupacija u nastojanju da se prihvati baš pristup koji njima odgovara. Načelno je moguće i da se neka zemlja ne odredi te da time prihvati ravnopravno primjenu sva tri pristupa. Ovdje će se ukratko prikazati ta tri pristupa, dok će se argumenti za najpovoljnije rješenje za Hrvatsku ostaviti za kasnije poglavlje.

Navedena tri pristupa analizi odnose se na granično stanje STR i GEO, dok je za ostala granična stanja zadržan jedinstveni pristup. Tri se pristupa uglavnom razlikuju po fazi proračuna u kojoj će se primijeniti parcijalni faktori: da li na ulazne podatke (djelovanja i svojstva materijala) ili na rezultate proračuna (učinke djelovanja i otpornosti). Oni pobliže definiraju varijante proračuna projektnog djelovanja (E_d) i projektne otpornosti (R_d) iz tablice 1 te daju prijedloge odgovarajućih parcijalnih koeficijenata. Sa konceptualnog stanovišta, prvi pristup je racionalniji jer bi veličina parcijalnih faktora trebala odražavati stupanj neizvjesnosti veličine ulaznih podataka proračuna, veličine djelovanja i parametara materijala, dok bi određivanje neizvjesnosti izvedenih veličina, učinaka djelovanja i otpornosti, trebalo prepustiti proračunima. Međutim, takav pristup je za mnoge sredine novost i značajno odudara od ustaljene prakse, a i u mnogim slučajevima zahtijeva opsežnije proračune za koji neki ne nalaze dovoljnog opravdanja.

Provjera stabilnosti za svaki od tri pristupa analizi granična stanja STR i GEO u Eurokodu 7 provodi se prema odgovarajućem izrazu iz tablice 2, općim oblicima za proračun projektnog djelovanja E_d i projektne otpornosti R_d iz tablice 1 te odgovarajućim skupinama parcijalnih koeficijenata. Parcijalni koeficijenti podijeljeni su za svaki projektni pristup u skupine A za djelovanja, M za svojstva materijala i R za otpornosti. Kombinacije pojedinih skupina za svaki od projektnih pristupa prikazani su u tablici 3. Sadržaj pojedinih skupina parcijalnih faktora prikazan je u tablici 4. Radi potpunosti opisa, prikazani su u tablici 5 i parcijalni faktori za ostala granična stanja nosivosti, EQU, UPL i HYD, koji se koriste u provjerama stabilnosti prema uvjetima iz tablice 2.

Tablica 3 Tri projektna pristupa za granična stanja STR i GEO: kombinacije skupina parcijalnih faktora

| Projektni pristup 1 | Projektni pristup 2 | Projektni pristup 3 |
|---|---------------------|--|
| osno opterećeni piloti i sidra: K1 ^a : A1 + M1 + R1 K2 ^a : A2 + (M1 ^b ili M2 ^c) + R4 | A1 + M1 + R2 | (A1 ^d ili A2 ^e) + M2 + R3 |
| sve ostale konstrukcije K1 ^a : A1 + M1 + R1 K2 ^a : A2 + M2 + R1 | | |

^a odvojeni proračuni za K1 i K2

^b za pilote i sidra

^c za nepovoljno djelovanje od negativnog trenja ili bočnog opterećenja pilota

^d za sile od konstrukcije

^e za geotehničke sile (sile od tla i sl.)

Krovni zahtjev sustava eurokodova je jedinstveni pristup projektiranju svim konstrukcijama. Iz tog se razloga „konstrukterski“ parcijalni faktori u geotehničkim konstrukcijama ne bi trebali mijenjati, pa je za „geotehničke“ parcijalne faktore, tj. one koji se odnose na parametre tla i stijena, ostalo malo mjesta. Kako ti parametri nisu ništa više pouzdani od materijalnih parametara drugih konstrukcija, njihovu nesigurnost u projektiranju treba također obuhvatiti parcijalnim faktorima. Istovremeno uvođenje „konstrukterskih“ i „geotehničkih“ parcijalnih faktora u proračune stabilnosti dijelom odudara od dosadašnje projektantske prakse i može u nju uvesti nepotreban dodatni konzervativizam. U starom Eurokodu 7 taj je problem riješen uvođenjem obavezne provjere stabilnosti korištenjem dviju kombinacija parcijalnih faktora, kombinacijom B u kojoj se pokriva nepouzdanost opterećenja i koja je većinom kritična za dimenzioniranje presjeka „konstrukterskih“ elemenata, te kombinacijom C kojom se pokriva nesigurnost u parametrima tla i koja je većinom kritična za probleme stabilnosti tla, ali i za određivanje veličine konstrukcije u tlu. U kombinaciji C se nesigurnost u otpornosti tla, kao što je na primjer nosivost tla ili pasivni otpor tla, uzimala u obzir odgovarajućim „smanjenjem“ ili faktoriziranjem parametara tla koji ulaze u proračun otpornosti. To, međutim, povećava količinu proračuna u projektiranju jer za svako kritično stanje u nekoj projektnoj situaciji zahtijeva dva

nezavisna proračuna. Takav pristup preuzet je u novom Eurokodu 7 kao Projektni pristup 1. Slikovito je taj pristup prikazan na primjeru provjere stabilnosti tla ispod temelja potpornog zida na slici 1, a proračun učinka djelovanja i proračun otpornosti u tablici 6.

Tablica 4 Parcijalni faktori po skupinama za granična stanja STR i GEO

| (1) Parcijalni faktori djelovanja (γ_F) i učinka djelovanja (γ_E) | | | | | | |
|---|--------------------|---------------------------------|------|------|-----|-----|
| Djelovanja | | simbol | A1 | A2 | | |
| trajna | nepovoljna | γ_G | 1.35 | 1.0 | | |
| | povoljna | γ_G | 1.0 | 1.0 | | |
| promjenjiva | nepovoljna | γ_Q | 1.5 | 1.3 | | |
| | povoljna | γ_Q | 0 | 0 | | |
| (2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) (γ_M) | | | | | | |
| Svojstvo | | simbol | M1 | M2 | | |
| tangens efektivnog kuta trenja | | $\gamma_{\varphi'}$ | 1.0 | 1.25 | | |
| efektivna kohezija | | $\gamma_{c'}$ | 1.0 | 1.25 | | |
| nedrenirana i jednoosna čvrstoća | | γ_{cu} ili γ_{qu} | 1.0 | 1.4 | | |
| težinska gustoća | | γ_γ | 1.0 | 1.0 | | |
| (3) Parcijalni faktori otpora (γ_R): | | | | | | |
| Otpornost [†] | | simbol | R1 | R2 | R3 | R4 |
| <u>Plitki temelji</u> | nosivost | R_v | 1.0 | 1.4 | 1.0 | - |
| | klizanje | R_h | 1.0 | 1.1 | 1.0 | - |
| <u>Zabijeni piloti</u> | stopa | γ_b | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.3 |
| | plašt (tlak) | γ_s | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.3 |
| | stopa+plašt (tlak) | γ_t | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.3 |
| | plašt (vlak) | $\gamma_{s;t}$ | 1.25 | 1.15 | 1.1 | 1.6 |
| <u>Bušeni piloti</u> | stopa | γ_b | 1.25 | 1.1 | 1.0 | 1.6 |
| | plašt (tlak) | γ_s | 1.0 | 1.1 | 1.0 | 1.3 |
| | stopa+plašt (tlak) | γ_t | 1.15 | 1.1 | 1.0 | 1.5 |
| | plašt (vlak) | $\gamma_{s;t}$ | 1.25 | 1.15 | 1.1 | 1.6 |
| <u>Prednapeta sidra</u> | privremena | $\gamma_{a;t}$ | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.1 |
| | trajna | $\gamma_{a;p}$ | 1.1 | 1.1 | 1.0 | 1.1 |
| <u>Potporne konstrukcije</u> | nosivost | $\gamma_{R;v}$ | 1.0 | 1.4 | 1.0 | - |
| | klizanje | $\gamma_{R;h}$ | 1.0 | 1.1 | 1.0 | - |
| | otpor tla | $\gamma_{R;e}$ | 1.0 | 1.4 | 1.0 | - |
| <u>Kosine i opća stabilnost</u> | otpor tla | $\gamma_{R;e}$ | 1.0 | 1.1 | 1.0 | - |

[†] EN 1997-1 još navodi posebne parcijalne faktore za uvrtnane pilote koji su ovdje izostavljeni

S druge strane, u mnogim se zemljama dosadašnja praksa koristila pristupom provjeri stabilnosti konstrukcija preko provjere globalnog faktora sigurnosti (GFS). Taj se faktor, jezikom Eurokoda, definirao kao omjer karakteristične otpornosti R_k (otpornosti određene temeljem karakterističnih parametara tla) i karakterističnog učinka djelovanja E_k na nekom presjeku kroz konstrukciju čija se stabilnost razmatra, tj. $GFS = R_k / E_k$. Provjera stabilnosti tražila je samo jedan proračun provjere nekog kritičnog stanja. Analizirajući moguće načine proračuna projektnih učinaka djelovanja i projektnih otpornosti iz tablice 1, uočava se za slučaj primjene parcijalnih faktora na izlazu iz modela proračuna, tj. kad vrijedi $R_d = R_k / \gamma_R$ i $E_d = \gamma_E E_k$, da tada slijedi da je $GFS = (R_d / E_d) \cdot (\gamma_R \gamma_E)$ što za optimalni slučaj projekta, pri kojem vrijedi $R_d / E_d = 1$, daje $GFS = \gamma_R \gamma_E$. Onima koji su dosad navikli analizirati stabilnost preko globalnog faktora sigurnosti ovaj rezultat daje motivaciju da navijaju za projektni pristup u kojem će se parcijalni faktori primijeniti na izlazu iz proračunskog modela. Tako je nastao Projektni pristup 2. Ovaj je pristup slikovito prikazan na slici 2, a proračun učinka djelovanja i proračun otpornosti u tablici 6, na primjeru provjere nosivosti tla ispod temelja potpornog zida. Na toj su slici prikazane dvije varijante tog pristupa, „blaža“ s oznakom 2, u kojoj su faktorizirana opterećenja na ulasku u model, te stroža i dosljednija za zagovornike globalnog faktora sigurnosti s oznakom 2*, u kojem se ukupno faktoriziranje provodi na izlasku iz proračunskog model. Projektni se pristup 2, a pogotovo 2*, time potpuno odmaknuo od osnovnog cilja metode parcijalnih koeficijenata u koju je možda potpuno pogrešno svrstan.

Tablica 5 Parcijalni faktori za granična stanja EQU, UPL i HYD

| (1) Parcijalni faktori djelovanja (γ_F) | | | EQU | UPL | HYD |
|--|--------------------------------|---------------------------------|-----|------|------|
| Djelovanja | | simbol | | | |
| trajna | nepovoljna (destabilizirajuća) | $\gamma_{G;dst}$ | 1.1 | 1.0 | 1.35 |
| | povoljna (stabilizirajuća) | $\gamma_{G;stb}$ | 0.9 | 0.9 | 0.9 |
| promjenjiva | nepovoljna | $\gamma_{Q;dst}$ | 1.5 | 1.5 | 1.5 |
| | povoljna | $\gamma_{Q;stb}$ | 0 | 0 | 0 |
| (2) Parcijalni faktori svojstva materijala (tlo, stijena) (γ_M) | | | EQU | UPL | |
| Svojstvo | | simbol | | | |
| tangens efektivnog kuta trenja | | $\gamma_{\varphi'}$ | 1.0 | 1.25 | |
| efektivna kohezija | | $\gamma_{c'}$ | 1.0 | 1.25 | |
| nedrenirana i jednoosna čvrstoća | | γ_{cu} ili γ_{qu} | 1.0 | 1.4 | |
| težinska gustoća | | γ_{γ} | 1.0 | 1.0 | |
| vlačna otpornost pilota | | $\gamma_{s;t}$ | - | 1.4 | |
| otpornost sidra | | γ_a | - | 1.4 | |

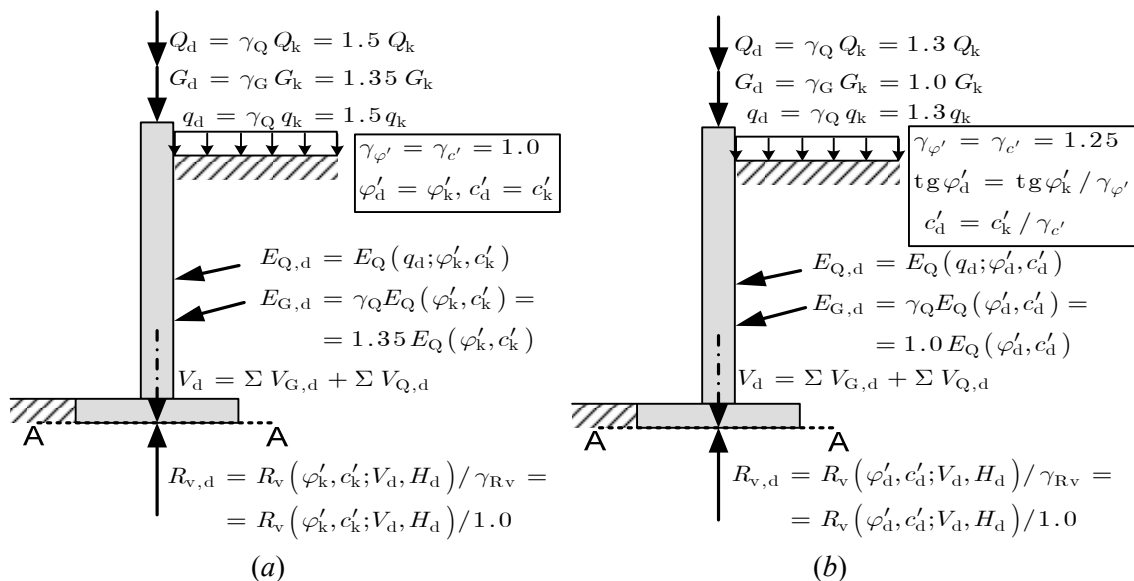
Tablica 6 Tri projektna pristupa za STR i GEO: djelovanja i otpornosti (vidi i slike 1, 2 i 3)

| | učinak djelovanja | otpornost |
|--|---|---|
| Projektni pristup 1 (osim osno opterećenih pilota i sidra za što vidi tablicu 3) | | |
| Kombinacija 1 | $E_d = E(\gamma_{A1} F_{k,i}; X_{k,j}, a_d)$ | $R_d = R(X_{k,i}; \gamma_{F;A1} F_{k,j}, a_d)$ |
| Kombinacija 2 | $E_d = E(\gamma_{A2} F_{k,i}; X_{k,j} / \gamma_{M2}, a_d)$ | $R_d = R(X_{k,i} / \gamma_{M2}; \gamma_{A2} F_{k,j}, a_d)$ |
| Projektni pristup 2 | $E_d = E(\gamma_{A1} F_{k,i}; X_{k,j}, a_d)$ | $R_d = R(X_{k,i}; \gamma_{F;A1} F_{k,j}, a_d) / \gamma_{R2}$ |
| Projektni pristup 2* | $E_d = \sum_i \gamma_{A1;i} E(F_{k,i}; X_{k,j}, a_d)$ | $R_d = R(X_{k,i}; \gamma_{F;A1} F_{k,j}, a_d) / \gamma_{R2}$ |
| Projektni pristup 3 | $E_d = E(\gamma_{A1/A2} F_{k,i}; X_{k,j} / \gamma_{M2}, a_d)^\dagger$ | $R_d = R(X_{k,i} / \gamma_{M2}; \gamma_{A1/A2} F_{k,j}, a_d)^\dagger$ |

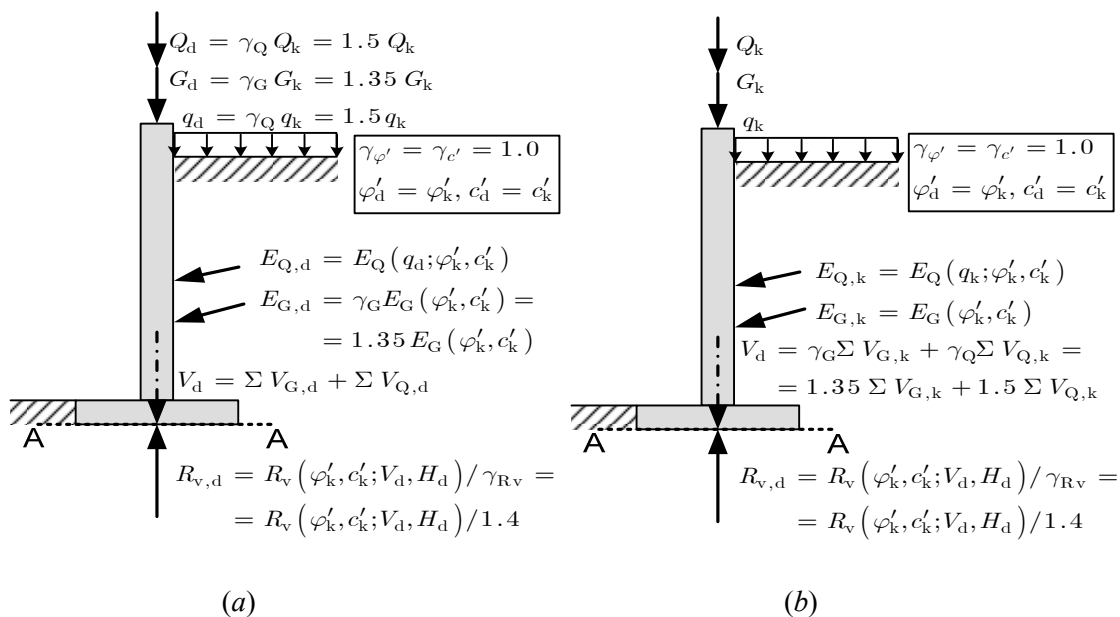
† koristi se parcijalni faktor djelovanja γ_{A1} za „konstrukcijsku“ silu, a γ_{A2} za „geotehničku silu“

Projektni pristup 3 otišao je u suprotnu krajnost u odnosu na Pp 2*, ali se kao i Pp1 najviše približio osnovnom konceptu parcijalnih faktora. U njemu se svi parcijalni faktori unose na izvoru, na ulazu u proračunski model, i to, za razliku od Pp 1, istovremeno vraćajući analizu stabilnosti na jedan proračun za jedno granično stanje. Time se dobilo na eleganciji, ali uz cijenu ponekad povećane konzervativnosti u projektu. Povećana konzervativnost može se najlakše uočiti na primjeru gravitacijskog potpornog zida. Prema Projektnom pristupu 3 aktivni se tlak na zid računa s projektnim parametrima tla manjim od karakterističnih. Time se dobiva veći računski pritisak na zid u odnosu na dosadašnju praksu. Primjena Pp 3 na primjeru nosivosti tla ispod temelja potpornog zida prikazana je na slici 3, a proračun učinka djelovanja i proračun otpornosti u tablici 6.

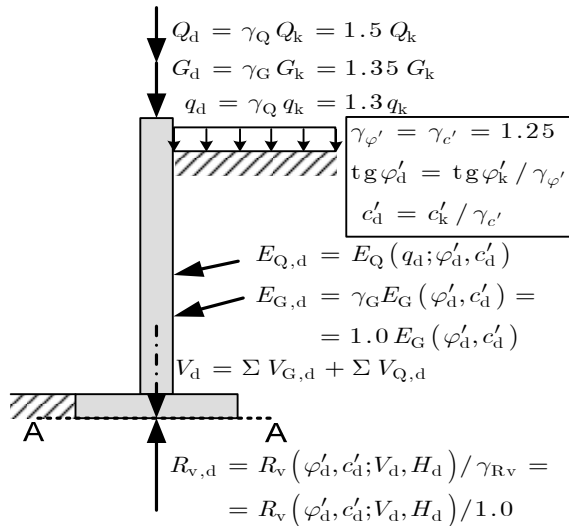
Kao što je već rečeno, konsenzus koji od ova tri pristupa treba prihvatiti nije postignut, pa je odluka prepuštena pojedinim zemljama. Neke analize ukazuju da razlike među konstrukcijama dimenzioniranim prema različitim projektnim pristupima nisu velike (za 10 razmatranih primjera do najviše $\pm 10\%$) i da ovise od slučaja do slučaja. Te analize pokazuju da je Pp3 najkonzervativniji, Pp2 najmanje konzervativan, a Pp1 se smjestio negdje između (Orr 2005). To ne čudi ako se zna da ekonomičnost neke konstrukcije ovisi o različitim faktorima od koji mnogi nemaju puno veze sa projektnim pristupima iz Eurokoda 7. No mnogi, izgleda, nisu tog mišljenja. Prema nekim informacijama stvaraju se lobistički tabori među pobornicima pojedine metode. Čak su i objavljeni članci u kojima se dokazuju ozbiljne zamjerke na Pp2 i Pp2* (Simpson 2000, Simpson i Powrie 2001). U tom svijetlu možda nije neobično da je glavni pobornik Pp2* Njemačka (Vogt i dr. 2006) i djelomično Francuska (uz korištenje Pp3 za globalnu stabilnost i stabilnost kosina), a Pp1 Velika Britanija.



Slika 1 Projektni pristup 1, Kombinacija 1 (a) i Kombinacija 2 (b), za granični slučaj nosivosti tla ispod temelja potpornog zida (presjek A-A); radi jednostavnosti razmatrana su samo nepovoljna djelovanja u vertikalnom smjeru (prerađeno prema Frank i dr. 2004)



Slika 2 Projektni pristupi 2 (a), i 2* (b) za granični slučaj nosivosti tla ispod temelja potpornog zida (presjek A-A); radi jednostavnosti razmatrana su samo nepovoljna djelovanja u vertikalnom smjeru (prerađeno prema Frank i dr. 2004)



Slika 3 Projektni pristup 3 za granični slučaj nosivosti tla ispod temelja potpornog zida (presjek A-A); radi jednostavnosti razmatrana su samo nepovoljna djelovanja u vertikalnom smjeru (prerađeno prema Frank i dr. 2004)

S obzirom na sve rašireniju uporabu složenih proračunskih modela za provjeru dosezanja graničnih stanja kao što je metoda konačnih elemenata, postavlja se pitanje pogodnosti metode parcijalnih koeficijenata za takve proračune. Uglavnom se pokazuje da je metoda konačnih elemenata vrlo pogodna za provjeru graničnog stanja uporabivosti, ali se problemi mogu javiti pri provjerama graničnih stanja nosivosti. Nužan, ali ne i dovoljan, uvjet uspješne primjene proračunskog modela je njegova sposobnost modeliranja razmatranog graničnog stanja. Kako granična stanja sloma predstavljaju nelinearni mehanički problem, takve mogućnosti mora imati i odgovarajući računarski program kojim se namjerava analizirati ponašanje modela. Numerička simulacija sloma poseban je matematički problem za koji kvalitetno rješenje ima samo manji broj komercijalnih programskih paketa. Oni koji ga imaju, rješavaju pojavu sloma tzv. metodom $c-\varphi$ redukcije.

Metodom $c-\varphi$ redukcije se, polazeći od nekog ravnotežnog stanja sustava udaljenog od sloma (na primjer stanja koje odgovara karakterističnim vrijednostima varijabli – što obično odgovara graničnom stanju uporabivosti), postupno smanjuje tangens kuta trenja i kohezija držeći istovremeno zadovoljene uvjete ravnoteže. Smanjenje parametara čvrstoće se zaustavlja kad sustavu, pri dosezanju globalnog sloma, matrica krutosti postane singularna pa uvjete ravnoteže više nije moguće osigurati. Ako se s $FS \geq 1$ označi vrijednost faktora redukcije parametara čvrstoće za stanje neposredno prije sloma, tada će za odnos otpornosti R i učinka djelovanja E u bilo kom dijelu sustava vrijediti $R/E \geq FS$ (jer se podrazumijeva da je početno stanje sustava bilo u ravnoteži i udaljeno od sloma).

Provjera zadovoljenja traženog projektnog uvjeta $R_d \geq E_d$ metodom $c-\varphi$ redukcije razlikovat će se između projektnog pristupa u kojem se varijable faktoriziraju prije ulaska u proračunski model, i projektnog pristupa u kojem se faktoriziraju rezultati proračuna, učinci djelovanja i otpornosti. U prvom se slučaju (projektni pristupi 1 i 3) sustav optereti sa zadanim „vanjskim“ projektnim opterećenjima F_d (onima koja ne ovise o interakciji konstrukcije i tla) te se uravnoteži, a nakon toga se provede $c-\varphi$ redukcija. Tada će uvjet $R_d \geq E_d$ biti zadovoljen ako je $FS \geq \gamma_{M2}$. U drugom slučaju (projektni pristup 2*) $c-\varphi$ redukcija se provodi bez prethodnog faktoriziranja vanjskih sila. Uvjet $R_d \geq E_d$ će biti zadovoljen ako je $FS \geq \gamma_{A1} \cdot \gamma_{R2}$ (ova tvrdnja vrijedi samo ako je γ_{A1} jedinstven za sve vrste djelovanja; u suprotnom treba proračun uravnoteženja prije $c-\varphi$ redukcija provesti za G_k i $Q_k(\gamma_Q/\gamma_G)$, a uvjet $R_d \geq E_d$ će biti zadovoljen ako je $FS \geq \gamma_G \cdot \gamma_{R2}$). Već površnom usporedbom projektnih pristupa u svjetlu ovih rezultata, uočava se da će za granična stanja opće stabilnosti (u kojoj se slom javlja samo kroz tlo) Projektni pristup 2* biti znatno konzervativniji od projektnog pristupa 3, a pogotovo od projektnog pristupa 1. To je i razlog da će se zemlje koje su pristalice pristupa 2*, za probleme opće stabilnosti vjerojatno opredijeliti na Projektni pristup 3.

Možda je zanimljivo razmotriti dosadašnju projektantsku praksu u Hrvatskoj u svjetlu predloženih projektnih pristupa. U slučaju nosivosti tla ispod plitkih temelja kao i nosivosti vertikalno opterećenih pilota, dosadašnjim propisima u Hrvatskoj najbliži je Projektni pristup 3. Isti projektni pristup najbliži je dosadašnjoj praksi proračuna stabilnosti kosina. Izgleda da se najveća razlika u odnosu na domaću praksu javlja kod projektiranja potpornih konstrukcija, posebno gravitacijskih zidova. U tim slučajevima u dosadašnjoj se domaćoj praksi pritisak na zid računao s karakterističnim vrijednostima i na takav se pritisak dimenzionirao i zid i njegov temelj. Prema Eurokodu, bez obzira o kojem se pristupu radi, zid će trebati dimenzionirati na jači pritisak.

Teško se opredijeliti za jedan od projektnih pristupa jer se čini da svaki ima neke prednosti, ali i mane. Za Hrvatsku kao malu zemlju posebno je zanimljivo čemu će se prikloniti velike zemlje, posebno one s kojima Hrvatska ima posebne odnose (Njemačka!). Hrvatska vjerojatno neće imati dovoljno snage da izradi prateću i pomoćnu literaturu u poželjnom opsegu, već će se u tome trebati osloniti na velike zemlje. U tom pogledu primjer Njemačke treba ozbiljno razmotriti. Međutim, bez obzira na mnoge razloge koji upućuju na priklanjanje njemačkom primjeru, ne treba zaboraviti da je Hrvatskoj bliži pristup 3, a da postoje ozbiljne zamjerke na racionalnost, a u nekim slučajevima i na sigurnost, projektnog pristupa 2*. Prema osobnom mišljenju autora, čini se da bi Hrvatskoj ipak najprimjereniji bio Projektni pristup 3.

3.5 Granično stanje uporabivosti

Metode provjere graničnog stanja uporabivosti su u Eurokodu 7 mnogo manje razrađene od metoda provjere graničnih stanja nosivosti. To je odraz pretežne geotehničke prakse koja se osigurava od prelaska graničnog stanja uporabivosti izborom dovoljno velikog faktora sigurnosti u odnosu na granično stanje nosivosti. K tome još treba dodati činjenicu da često nije lako jednoznačno kvantificirati tu vrstu kritičnih stanja. Ova razmatranja uvažava norma no omogućuje provjeru zadovoljenja graničnog stanja uporabivosti neposredno i posredno. Neposredno se dosezanje graničnog stanja provjerava preko izraza $E_d \leq C_d$, pri čemu je E_d projektni učinak djelovanja (na primjer slijeganje temelja), a C_d je najveća dopuštena veličina tog djelovanja (na primjer dozvoljeno slijeganje). Posredno se dosezanje graničnog stanja uporabivosti provjerava pomoću odgovarajućeg graničnog stanja nosivosti (na primjer, hoće li slijeganje temelja biti u dozvoljenim granicama provjerava se time da je zadovoljena tražena nosivost tla ispod tog temelja). Ovaj drugi pristup norma dozvoljava samo u jednostavnijim slučajevima kad postoji usporedivo iskustvo ili kad određena vrijednost parametra C_d nije uvjetovana (na primjer, pri dimenzioniranju potpornog zida obično se ne uvjetuje dozvoljeni vodoravni pomak zida). Za pomoć pri projektiranju i izboru najvećeg dopustivog djelovanja, norma daje preporuke najvećih dopustivih deformacija tipičnih konstrukcija.

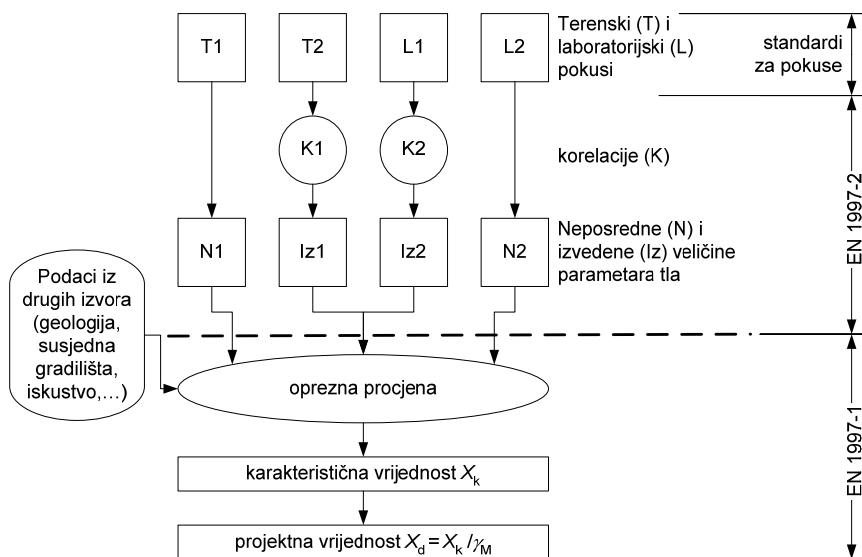
Pri proračunu učinka djelovanja (E_d) načelno se primjenjuju parcijalni faktori jednaki jedinici, tj. računa se s karakterističnim vrijednostima osnovnih varijabli.

3.6 Karakteristične vrijednosti

Varijable proračunskih modela učinka djelovanja i otpornosti imaju karakter slučajnih brojeva. Od tri osnovne vrste varijabli, za geotehničko projektiranje od posebnog su značaja parametri tla. Način izbora tih parametara u mnogome se razlikuje od načina izbora parametara ostalih građevinskih materijala prvenstveno iz razloga što je tlo prirodni materijal, čija se svojstva u području utjecaja mogu od mjesta do mjesta mijenjati i po veličini i po karakteru u vrlo širokim granicama, i koja u svakom projektu treba dovoljno pouzdano utvrditi. Geotehničkim se projektiranjem vrlo često ne može birati pogodno tlo za planiranu konstrukciju, već konstrukciju treba projektirati na način da na najekonomičniji način uvaži relevantna svojstva lokalnog tla. Kako je ponašanje tla složeno, često nepogodno za ispitivanje, i traži znatne troškove da bi se u tome ipak uspjelo, geotehnika je morala razviti posebne metode ispitivanja i posebne načine izbora parametara materijala. Vrlo često se neko svojstvo tla ne određuje statističkom obradom rezultata niza istovjetnih pokusa, već se do njega dolazi složenim putem usporedbe i vrednovanja rezultata manjeg broja različitih pokusa kao i korištenjem drugih dostupnih podataka kao što su rezultati geoloških istraživanja, podaci susjednih građevina, objavljeni podaci bliskih iz područja i niz drugih. Ponekad se neko svojstvo tla može odrediti neposrednim

ispitivanjem na terenu ili u laboratoriju, a ponekad se pak ono određuje indirektno više ili manje empirijskim korelacijama iz rezultata pokusa kojim se ispituje neko drugo svojstvo tla. Često je pogodno neko svojstvo tla odrediti na više načina kako bi se postigla veća pouzdanost izabrane veličine geotehničkog parametra.

Izboru karakterističnih parametara tla ili stijene poklanja se u Eurokodu 7 velika pažnja. Tako se izričito navodi da je izbor i pouzdanost tih parametara za neki projekt često važnija od samog računskog modela i izbora parcijalnih faktora djelovanja i parcijalnih faktora materijala. Razumijevanje traženih uvjeta zahtjeva od projektanta dobro poznavanje suvremenih saznanja struke. Da bi se što bolje razlučili elementi postupka izbora karakteristične vrijednosti pojedinog parametra tla ili stijene, a time ih i bolje normiralo, definira se više faza tog postupka, slika 4. Tako se uvodi pojam izvedene veličine parametra (označeno s I_z na slici 4) kao međukorak u izboru konačne reprezentativne vrijednosti koju naziva karakterističnom. Sam Eurokod 7 nije standard za izvođenje pojedinih laboratorijskih i terenskih pokusa (to je prepušteno da se definira odgovarajućim standardima za pojedine pokuse), već definira uvjete i daje smjernice o vrsti i broju ispitivanja potrebnih za određivanje pojedinog svojstva tla kao i načinu interpretacije rezultata provedenih ispitivanja. Na slici 4 naznačeno je i razgraničenje sadržaja prvog (EN 1997-1) i drugog (EN 1997-2) dijela Eurokoda 7.



Slika 4 Faze pri izboru geotehničkog parametra prema Eurokodu 7 s naznakom razgraničenja između područja obuhvaćenih standardima za pojedine pokuse te područja obuhvaćenog prvim i drugim dijelom Eurokoda 7

Nastojeći biti u skladu s definicijom reprezentativnog parametra nekog svojstva industrijski proizvedenih građevinskih materijala, Eurokod 7 definiraju karakterističnu vrijednost materijalnog parametra bilo kao srednju vrijednost, za granična stanja uporabivosti, ili kao 5-postotni fraktil njene slučajne veličine (95-postotna vjerojatnost da ta vrijednost neće biti premašena) za granična stanja nosivosti. Iz opisanih razloga u geotehnici je takva definicija uglavnom neprimjenjiva i nepraktična pa EN 1997-1 definira da je karakteristična vrijednost nekog geotehničkog parametra „oprezna procjena vrijednosti kojom taj parametar utječe na pojavu graničnog stanja“. Kroz tu definiciju, po kojoj se oprezna procjena prepušta projektantu, otvorena su širom vrata njegovom stručnom iskustvu koje se u projektantskoj praksi naziva inženjerskom prosudbom. U slučaju da je neka rudimentarna primjena statistike ipak moguća, Orr i Farrell (1999) navode istraživanje koje pokazuje da se karakteristična vrijednost geotehničkog parametra za kritično stanje nosivosti može dosta pouzdano izabrati kao razlika njegove srednje vrijednosti i pola njegove standardne devijacije. Uz više ili manje poznatu varijancu pojedinog svojstva tla, isti autori daju preporučene odnose karakteristične i srednje vrijednosti glavnih parametara tla, tablica 7.

Tablica 7 Preporučeni odnosi karakteristične i srednje vrijednosti geotehničkog parametra (prema Orr i Farrell 1999)

| parametar tla | simbol | E_k / E_{sred} |
|--------------------------------|-----------------|------------------|
| tangens efektivnog kuta trenja | $\tan \varphi'$ | 0.95 |
| efektivna kohezija | c' | 0.8 |
| nedrenirana čvrstoća | c_u | 0.85 |
| edometerski modul stišljivosti | M | 0.8 |
| težinska gustoća | γ | 1.0 |

Određivanje karakterističnih vrijednosti geotehničkih djelovanja (vlastita težina tla, tlak porne vode i sl.) ne predstavlja posebni problem pa se ovdje neće posebno razmatrati. Ipak, posebnost u Eurokodu 7 predstavlja određivanje karakteristične otpornosti pilota na vertikalno opterećenje. Ta se veličina određuje temeljem izraza

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;m})_{srednje}}{\xi_i}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_j} \right\} \quad (1)$$

gdje $R_{c;m}$ označava mjerenu veličinu nosivosti pilota iz probnog opterećenja ili dinamičkih ispitivanja, ili pak proračunatu nosivost pilota iz parametara tla utvrđenih iz jednog sondažnog profila, a ξ su korelacijski faktori, tablica 8. Iz karakteristične otpornosti pilota određuje se projektna otpornost dijeljenjem s odgovarajućim parcijalnim faktorom na ranije opisani način. Ovim postupkom omogućeno je smanjenje konzervativnosti u projektiranju s povećanim opsegom ispitivanja ili istražnih radova.

Tablica 8 Korelacijski faktori ξ za određivanje karakterističnih otpornosti za pilote

| | | | | | | | | |
|--|-----|----------|----------|-----------|-----------|-----------|------|------|
| iz statičkog probnog opterećenja pilota; | | | | | | | | |
| broj ispitanih pilota | n = | 1 | 2 | 3 | 4 | ≥ 5 | | |
| ξ_1 ($i = 1, j = 2$) | | 1.40 | 1.30 | 1.20 | 1.10 | 1.00 | | |
| ξ_2 | | 1.40 | 1.20 | 1.05 | 1.00 | 1.00 | | |
| iz parametara tla; | | | | | | | | |
| broj sondažnih profila tla | n = | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 7 | 10 |
| ξ_3 ($i = 3, j = 4$) | | 1.40 | 1.35 | 1.33 | 1.31 | 1.29 | 1.27 | 1.25 |
| ξ_4 | | 1.40 | 1.27 | 1.23 | 1.20 | 1.15 | 1.12 | 1.08 |
| iz dinamičkih udarnih pokusa; | | | | | | | | |
| broj ispitanih pilota | n = | ≥ 2 | ≥ 5 | ≥ 10 | ≥ 15 | ≥ 20 | | |
| ξ_5 ($i = 5, j = 6$) | | 1.60 | 1.50 | 1.45 | 1.42 | 1.40 | | |
| ξ_6 | | 1.50 | 1.350 | 1.30 | 1.25 | 1.25 | | |

Eurokod 7 traži da se u projektu dokumentira i obrazloži način izbora karakterističnih vrijednosti parametra tla i stijena. Rezultate svih geotehničkih ispitivanja treba dokumentirati u *izvješću o ispitivanju tla* dok dobivanje izvedenih veličina i obrazloženi izbor karakterističnih vrijednosti parametara tla treba zajedeno s obrazloženim izborom projektnih situacija, graničnih stanja i pripadnim dokazima stabilnosti i uporabivosti prema jednom od projektnih pristupa treba dokumentirati u *geotehničkom projektu*.

4 ZAKLJUČAK

Nakon više od 25 godina rada na izradi europskih normi za građevinsko projektiranje, sustava Eurokodova, one od nedavno ulaze u praktičnu primjenu. Po prvi je puta postignuto da se koristi jedinstven pristup projektiranju za sve građevinske konstrukcije pa tako i za geotehničko projektiranje. To bi trebalo znatno pridonijeti, osim jednostavnijem prometu roba i usluga preko europskih granica, i boljoj suradnji projekatnata različitih specijalnosti. Razvoj te suradnje je nesumnjivo preduvjet za razvoj građevinarstva.

Harmonizacija projektiranja među različitim građevinskim disciplinama uvela je u geotehničku normu niz novina za čiju će primjenu u praksi trebati mnogo početnog truda, znanja i snalaženja. Hrvatska u tome nije iznimka. Ako bi se trebala izabrati jedna osnovna karakteristika nove norme, onda je to zahtjev za dobrim poznavanjem novijih istraživanja u struci. Bez toga će se norma teško koristiti jer njene odredbe uglavnom nisu opisi detaljnih postupaka projektiranja, već podsjetnik na elemente i kriterije koje treba uvažiti. Načine kako se to obavlja u konkretnim situacijama projektant mora naučiti iz drugih izvora. Pri tome se opetovano naglašava da primijenjeni projektni postupci moraju biti dokumentirano dokazani eksperimentima ili u praksi.

Da bi Hrvatska tu normu uvela što bezbolnije u praksu treba nju kao i niz pratećih normi prevesti na hrvatski jezik, treba se opredijeliti za neku od ponuđenih varijanti u pristupu geotehničkom projektiranju, te treba u normu uvesti svoje specifičnosti, u okviru koji norma dozvoljava kroz Nacionalni dodatak. Isto bi tako što skorije trebalo početi s organiziranim upoznavanjem projektanata sa sadržajem norme, a isto tako s uvođenjem sadržaja norme u visokoškolske nastavne programe građevinskih fakulteta.

POPIS LITERATURE

- BSI 2004. *BS EN 1997-1:2004; Eurokode 7: Geotechnical design – Part 1: General rules*. British standard.
- Fardis, M. N., Carvalho, E., Alnashai, A., Faccioli, E., Pinto, P., Plumier, A. 2005. *Designers' Guide to EN 1998-1 and EN 1998-5, Eurokode 7: Design Provisions for Earthquake resistant Structures*. Thomas Telford, London.
- Frank, R. *Bauduin*, C., Driscoll, R., Kavvadas, M., Krebs Ovesen, N., Orr, T., Schuppener, B. 2004. *Designers' Guide to EN 1997-1, Eurokode 7: Geotechnical design – General rules*. Thomas Telford, London.
- Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., Holicky, M. 2002. *Designers' Guide to EN 1990, Eurokode: Basis of structural design*. Thomas Telford, London.
- Nicholson, D., Tse C.-M., Penny, C. 1999. *The Observational Method in ground engineering: principles and applications*. CIRIA, London, Report 185.
- Orr, T. L. L., Farrell, E. R. 1999. *Geotechnical Design to Eurokod 7*. Springer, London.
- Orr, T. L. L. 2005. Review of Workshop on the Evaluation of Eurocode 7. *Proceedings of International Workshop on Evaluation of Eurocode 7*. Dublin March-April 2005. Department of Civil, Structural and Environmental Engineering, Trinity College Dublin.
- Peck, R. B. 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. *Géotechnique*, 19 (2), 171-187.
- Simpson, B. 2000. Partial factors : where to apply them? *Proceedings of the LSD2000: International Workshop on Limit States Design in Geotechnical Engineering*, ISSMGE, TC23, Melbourne.
- Simpson, B., Powrie, W. 2001. Embedded retaining walls: theory, practice and design. *Proceedings XV Intl. Conf. Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Istanbul, Balkema, Rotterdam, Vol. 4, 2505-2524.
- Szavits-Nossan, A. 2006. Observations on the Observational Method. U: Logar, J., Gaberc, A., Majes, B. (urednici): *Active Geotechnical Design in Infrastructure Development - Proceedings XIII Danube-European Conference on Geotechnical Engineering*, Ljubljana. Slovensko geotehniško društvo, Ljubljana, Vol. 1: Special and keynote lectures, 171-178.
- Vogt, N., Schuppener, B., Weissenbach, A. 2006. Design approaches of EC 7-1 for geotechnical verifications used in Germany. (privatna komunikacija).