

2. Eurokod 7: norma geotehničkog projektiranja

2.1. Uvod

U zadnjih se dvadesetak godina u Europi razvija jedinstveni sustav normi za projektiranje građevinskih konstrukcija pod skupnim nazivom Eurokodovi. U njima je skupljeno vrlo široko svjetsko iskustvo suvremenog projektiranja. To je prvi takav sustav koji sustavno obuhvaća projektiranje građevinskih konstrukcija kroz jedinstveni pristup. Izradom eurokodova upravlja Tehnički komitet 270 (TC 270) Europskog odbora za normizaciju (CEN) čije su članice zemlje EU i CEFTA, a od nedavno i Hrvatska. Iza godine 2009. sustav bi trebao postati jedina norma u Europskoj uniji i još nekim zemljama, uključivo i u Hrvatskoj. Ovdje će se ukratko opisati osnovni elementi tih normi, a posebno one pod nazivom Eurokod 7, koja se odnosi na geotehničko inženjerstvo. Primjena te norme na konkretne geotehničke konstrukcije obrađivat će se u narednim poglavljima.

Sustav eurokodova čini skup od slijedećih 10 normi:

- EN 1990 Eurokod: Osnove projektiranja konstrukcija,
- EN 1991 Eurokod 1: Djelovanja na konstrukcije,
- 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 EN 1990, Eurokod 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.

Eurokod 7 (službenog naziva EN 1997) sastoji se iz dva dijela: EN 1997-1 Geotehničko projektiranje – Dio 1: Opća pravila, te EN 1997-2 Geotehničko projektiranje – Dio 2: Istraživanje i ispitivanje tla. Kao i drugi eurokodovi, oslanja se na niz pratećih normi. To su 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 piloti¹, 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. 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.

2.2. Status eurokodova

Eurokodovi sami po sebi nisu zamišljeni kao propis s obveznom primjenom. Oni su pisani kao zaokruženi sustav postupaka i preporuka za koje stručnjaci odgovarajućih struka smatraju da odražavaju trenutačna saznanja struke i čija primjena osigurava dogovorenu razinu rizika nepovoljnih događaja. Razinu dozvoljenog rizika svaka od zemalja koja prihvati sustav eurokodova

¹ prema engl. „displacement piles“ u koje spadaju zabijeni i utisnuti piloti

može samostalno odrediti. Primjena eurokodova, posebno pri dokazivanju bitnih zahtjeva na građevinu, tada omogućuje jasnu komunikaciju među stručnjacima, posebno ako su oni različitih struka. U načelu je moguće projektiranje i mimo preporuka i načela koja postavlja sustav, ali je tada sustav dokazivana složeniji i manje pregledan. Pojedine zemlje, a među njima i Hrvatska, tražit će obveznu primjenu eurokodova.

Eurokodovi su pisani u obliku pobrojanih članaka. Unutar sustava tih normi članak ima ili status principa za koje nema alternative ili status preporuke koja zadovoljava principe, ali su dozvoljene alternative. Ako se primjenjuje predložena preporuka, ne treba dokazivati da ona zadovoljava principe, dok za primjenu neke alternative treba dokazivati da ona zadovoljava principe. Takvim formatom eurokodovi dobivaju na fleksibilnosti i, što je još važnije, omogućuju primjenu novo razvijenih i dokazanih postupaka. Time je sustav eurokodova osigurao prilagođavanje stalno napredujućem znanju u struci.

Svako racionalno projektiranje u geotecnici temelji se na primjeni modela. Prije detaljnijeg opisa principa projektiranja prema eurokodovima, detaljnije će se razmotriti pojam geotehničkog modela.

2.3. Geotehnički model

Svojstva tla i njihovo rasprostiranje u prostoru se u postupcima dokazivanja mehaničke stabilnosti i uporabivosti geotehničkih građevina više ili manje idealiziraju modelima. Svaki model je, dakle, neka idealizacija svojstva stvarnog tla. Stvaranje modela je nužno kako bi se omogućile odgovarajuće matematičke analize nad njegovim svojstvima. Ovi modeli mogu biti različitog karaktera, razina i obuhvatnosti. Obično uključuju samo neke od brojnih vidova ponašanja i svojstava tla te idealiziraju njihovu prostornu razdiobu, dok druga svojstva djelomice ili u potpunosti zanemaruju. Čak i ona svojstva koja su uključena u model predstavljaju samo idealizaciju stvarnog ponašanja tla te od njega odstupaju u većoj ili manjoj mjeri. Važna je zadaća inženjera izbor odgovarajućeg modela primjerenog rješavanju njegovog problema.

Model po svom karakteru može biti empirijski, u kojem se uspostavlja čista korelacija između neke mjerene veličine i idealiziranog svojstva tla zanemarujući bilo kakvo prethodno znanje ili teoriju; teoretski, u kojem za rješavanje problema koristi analitičko rješenje neke idealizirane teorije; numerički, u kojem se za rješenje problema koristi numeričko, dakle

približno, rješenje neke idealizirane teorije; konstitutivni, u kojem se ponašanje tla opisuje nekim analitičkim zakonom ponašanja materijala u okviru mehanike neprekidnih sredina; fizički, u kojem se za rješenje koristi fizički model konstrukcije u stvarnom ili umanjenom mjerilu; geološki model, u kojem se idealiziraju geološke karakteristike tla (raspored i nastanak slojeva, prilike u podzemnoj vodi, morfološke karakteristike itd.). Moguće su i kombinacije pa nastaju mješoviti modeli. Primjeri ovih modela su u mehanici tla brojni. Tako korelacija između broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa (SPT) i Youngovog modula elastičnosti E za krupnozrna tla predstavlja polu-empirijski model („polu“ jer se u korelaciji koristio teoretski model slijeganja elastičnog poluprostora od površinskog opterećenja). Slijeganje elastičnog poluprostora ispod površinskog opterećenja predstavlja teoretski model. Metoda konačnih elemenata u rješavanju problema deformacija tla predstavlja numerički model. Linearno elastični model, koji određuje odnos naprezanja i deformacija, te idealno plastični model, koji definira uvjete sloma u tlu, primjeri su konstitutivnih modela. Probna opterećenja pilota i sidara na terenu ili u centrifugi u laboratoriju predstavljaju fizičke modele. Geološke karte i geološki presjeci s odgovarajućim objašnjenjima predstavljaju geološki model tla. Moguće su i idealizacije stvarnih svojstava tla prema nekim drugim karakteristikama izvan navedenih skupina. Među njima se, primjerice, ističe klasifikacija tla pa klasifikacijske grupe tla predstavljaju klasifikacijski model.

Među najpoznatijim konstitucijskim modelima u mehanici tla su linearno elastični i izotropni model, koji se primjenjuje pri proračunu naprezanja i deformacija u tlu prije sloma, idealno plastični model, koji se primjenjuje pri proračunu naprezanja pri slomu tla, te Darcyev zakon, koji se koristi pri proračunu brzine procjeđivanja vode kroz tlo. Karakteristike stvarnog tla u tim modelima kvantificirane su odgovarajućim parametrima, u prvom slučaju Youngovim modulom E i Poissonovim brojem ν , u drugom Mohr-Coulombovim parametrima c (kohezija) i φ (kut trenja), a u trećem koeficijentom propusnosti k . U praksi se ti parametri utvrđuju istražnim radovima. Obzirom na prirodnu uslojenost i heterogenost temeljnog tla, istražnim se radovima nikad neće moći utvrditi neka jedinstvena vrijednost pojedinog parametra niti će se ta vrijednost moći pridružiti svim zonama u tlu. Analizom istražnih radova prvo će se temeljno tlo pokušati podijeliti u zone ili slojeve sličnih karakteristika. Svakoj od tih zona pokušat će se pridružiti odgovarajući parametri koji opisuju svojstva tla u toj zoni. Kako će istražni radovi pokazati određeni rasap vrijednosti pojedinih parametara čak unutar iste zone, pojavit će se problem izbora vrijednosti parametra za tu zonu koji će se kasnije koristiti u proračunima dokazivanja stabilnosti i

uporabivosti geotehničke konstrukcije. Izabrani prostorni model rasporeda zona ili slojeva u tlu zajedno s izabranim parametrima tla koji će se kasnije koristiti u računima naziva se *geotehničkim modelom tla*.

Geotehnički model uključuje prostorni raspored slojeva ili zona tla sličnih mehaničkih svojstava. Jednostavnija se svojstva mogu neposredno opisati odgovarajućim parametrima (na primjer masa jedinice volumena tla), ali češće se ona vežu uz neke zakonitosti ponašanja tla. Tako, na primjer, Youngov modul elastičnosti tla ima značenje samo ako se pretpostavi da je tlo izotropno i linearno elastični materijal. Isto tako, veličine kao kohezija i kut trenja imaju smisla samo ako se pretpostavi da vrijedi Mohr-Coulombov zakon čvrstoće. Kako su linearna elastičnost kao i Mohr-Coulombov zakon samo grube aproksimacije prirodnog ponašanja tla, parametri koji se odnose na te zakonitosti nisu prave konstante ili pravi parametri tla. Zbog toga će različiti pokusi, ili češće, različite interpretacije tih pokusa davati različite vrijednosti tih parametara. To se ponekad u praksi ispušta iz vida, pogotovo u komunikaciji između različitih korisnika tih informacija, s ponekad vrlo nepovoljnim posljedicama. Da bi se te nepovoljne posljedice i mogući nesporazumi izbjegli, nužno je naznačiti okolnosti izbora parametara tla kao i uvjete ili pretpostavke pod kojima oni mogu predstavljati prihvatljivu aproksimaciju prirodnog ponašanja tla.

Geotehnički model tla, dakle, obuhvaća:

- prostorni raspored slojeva ili zona tla sličnog geološkog porijekla i sličnih mehaničkih svojstava (ili mehaničkih svojstava koja pokazuju neku prostornu pravilnost kao što je primjerice linearni porast čvrstoće s dubinom);
- parametre tla u svim zonama tla ili slojevima zajedno sa zakonitostima na koje se ti parametri odnose te uvjetima i pretpostavkama pod kojima oni predstavljaju prihvatljivu aproksimaciju prirodnog ponašanja tla u rasponu od značenja za predviđeni građevinski zahvat;
- rubne uvjete koji mogu utjecati na izabrani geotehnički model koji se mogu javiti tijekom izgradnje kao i tijekom eksploatacije građevine.

Obzirom da još nije razvijena, a kamo li općenito prihvaćena, jedinstvena teorija ponašanja tla koja bi kao takva određivala jedinstveni skup parametara koji kvantificiraju ponašanje tla, u praksi je moguće izabrati više različitih geotehničkih modela za različite namjene i vrste proračuna. Primjerice, jedan se model može koristiti za čvrstoću tla, drugi za krutost, a treći pak za vodopropusnost. Općenito, zbog različitih raspoloživih teorija u većoj ili manjoj mjeri prihvaćenih od struke, izbor geotehničkog modela u

praksi sadrži određenu dozu subjektivnosti stručnjaka koji ga koristi. Međutim, za očekivati je da će se uz ispravno korištenje stručnog znanja ti različiti modeli dovesti do međusobno sličnih praktičnih rješenja.

Utvrdivanje geotehničkog modela tla jedan je od najznačajnijih koraka u geotehničkom projektiranju jer će se na njemu temeljiti svi kasniji računi i zaključci o stabilnosti i uporabivosti konstrukcije. Taj korak bitno razlikuje geotehničko inženjerstvo od drugih grana građevinskog projektiranja koje barataju s industrijski proizvedenim gradivima tvornički standardiziranih svojstava. Utvrđivanje geotehničkog modela tla oslanja se na geološki model. Geološkim modelom se utvrđuju zone tla sličnog geološkog porijekla za koje se zbog te sličnosti očekuje da imaju i slična mehanička svojstva. U složenijim slučajevima izrada geološkog modela je praktički neophodna dok se u jednostavnijim slučajevima njegova izrada može i preskočiti. Kako je geotehnički model osnova na kojoj se vrše uglavnom računске analize, često se naziva i računskim modelom ili računskim profilom tla.

Za utvrđivanje vjerodostojnog, pouzdanog i upotrebljivog geotehničkog modela tla potrebno je ispunjenje niza preduvjeta. Većina tih preduvjeta proizlazi iz prirodne različitosti i heterogenosti pojedinih vrsta tla, ograničenih tehnoloških mogućnosti postupaka ispitivanja tla, našeg ograničenog znanja o ponašanju pojedinih vrsta tla, karaktera budućeg građevinskog zahvata i vrste planirane geotehničke konstrukcije, te ekonomskih i vremenskih ograničenja. Među važnijim preduvjetima su:

- *primjerenost* postupaka ispitivanja i uređaja kojom se osigurava da su pojedini postupci ispitivanja primjenjuju samo za onu vrstu tla za koju su namijenjeni i za koju su se u praksi pokazali uspješnima,
- *opsežnost* istražnih radova kako u prostoru tako i po vrsti ispitivanja kojom se osigurava da će ispitivanjem biti obuhvaćene sve zone tla te biti ispitana sva svojstva tla od utjecaja na planirani građevinski zahvat i to u mjeri koja će omogućiti izradu pouzdanog računskog profila tla,
- *opširnost* ili redundantnost ispitivanja koja osigurava mogućnost utvrđivanja pojedinog svojstva tla iz barem dva raznorodna ispitivanja te time smanjuje mogućnost krive interpretacije ispitivanja na najmanju moguću mjeru,
- *relevantnost* istraživanja kojom se osigurava da će biti utvrđena ona svojstva tla koja su bitna za provjeru stabilnosti i uporabivosti razmatranog građevinskog zahvata,
- *ekonomičnost* istraživanja kojom se osigurava da će biti primijenjeni postupci dati tražene rezultate uz najmanje troškove i u najkraćem vremenu.

Potreba za zadovoljenjem navedenih uvjeta traži dobro poznavanje i razumijevanje mogućih postupaka ispitivanja i njihovu raspoloživost, opće poznavanje ponašanja tla, uvjete nastanka i geološku prošlost tla na lokaciji građevine, sagledavanje planiranog građevinskog zahvata na terenu u svim njegovim fazama, od izgradnje do eksploatacije, te često provedbu ispitivanja u više faza kako bi se istraživanje prilagodilo novoutvrđenim saznanjima. Vrijednosti parametara geotehničkog modela Eurokod 7 naziva *karakterističnim vrijednostima parametara tla* i pridaje im posebno značenje. To će se značenje detaljnije opisati u jednom od slijedećih poglavlja.

2.4. Osnovni principi projektiranja prema eurokodovima

Bitni zahtjevi na građevinu

Eurokodovi traže da svaka građevina tijekom njene izgradnje kao i tijekom njenog korištenja zadovolji bitne zahtjeve. Ti su zahtjevi *nosivost, uporabivost, otpornost na požar, robustnost, trajnost i pouzdanost*. Nosivost je sposobnost konstrukcije da izdrži sva predvidiva mehanička opterećenja bez da doživi oštećenja koja izazivaju njezino rušenje ili gubitak integriteta. Ili, nosivost je svojstvo mehaničke otpornosti i stabilnosti konstrukcije u odnosu na predvidiva mehanička opterećenja. Uporabivost predstavlja zahtjev da konstrukcija za „normalna“ opterećenja zadrži svoju bitnu funkciju kojoj je namijenjena, to jest da ostane uporabiva. Otpornost na požar je sposobnost konstrukcije da zadrži nosivost za predvidivo djelovanje požara. Ona zahtjeva posebne mjere projektiranja za mnoge konstrukcije, ali kako je to za geotehničke konstrukcije manje značajan zahtjev, ovdje se neće posebno obrađivati. Robustnost je zahtjev da oštećenje jednog manjeg dijela konstrukcije ne ugrozi nosivost većeg dijela konstrukcije, ili, da šteta na konstrukciji ne bude neproporcionalno veća od uzroka koji je izazvao štetu. Trajnost je zahtjev da konstrukcija zadovolji ostale bitne zahtjeve za vrijeme njenog zahtijevanog vijeka trajanja. Pouzdanost je zahtjev da planirana svojstva konstrukcije tijekom njene izgradnje i korištenja budu i ostvarena. Ovaj posljednji zahtjev traži da se pri izgradnji konstrukcije primjene metode upravljanja kvalitetom i da se konstrukcija koristi na način kako je planirano.

Projektiranje prema graničnim stanjima, projektne situacije

Pod graničnim stanjima podrazumijevaju se granični slučajevi između prihvatljivog i neprihvatljivog ponašanja konstrukcije. Projektom treba dokazati da će konstrukcija zadovoljiti sve bitne zahtjeve u slučaju dosezanja bilo kojeg od mogućih graničnih stanja. Po karakteru šteta koje mogu nastati prelaskom u neprihvatljivo ponašanje konstrukcije, razlikuju se dvije grupe graničnih stanja: *granična stanja nosivosti* i *granična stanja uporabivosti*. Prva grupa se odnosi na zahtjeve nosivosti, a druga na zahtjeve uporabivosti.

Provjera dosezanja graničnih stanja konstrukcije ili njenog dijela počinje izborom odgovarajućih *projektnih situacija*. Projektna situacija je jedan trenutak ili period u životu konstrukcije, uključivo i faze izgradnje, definiran njenim oblikom i smještajem u prostoru, pripadnim opterećenjima i utjecajima te pripadnim svojstvima materijala i svojstvima ugrađenih produkata. Izbor projektnih situacija treba biti sveobuhvatan što znači da ne postoji moguća projektna situacija koja bi bila nepovoljnija po pitanju dosezanja nekog od 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 obzirom na njihov karakter na *trajne*, *prolazne*, *slučajne* (obično štetne), i *potresne*. Ove posljednje obrađuju se u EN 1998. Ovdje se karakter situacije odnosi prvenstveno na trajanje opterećenja relativno obzirom na životni vijek konstrukcije, ali i na vjerojatnost njihove pojave.

Modeliranje konstrukcije

Provjera zadovoljenja bitnih zahtjeva konstrukcije ili njenih dijelova provodi se modelima. Ono će u većini slučajeva biti proračunsko, bilo analitičko bilo numeričko, primjenom zakona mehanike, ali može biti i fizičkim modeliranjem, rjeđe na modelima u umanjenom mjerilu, a češće probnim opterećenjem dijelova konstrukcije. Cilj modeliranja je provjera učinka opterećenja ili drugih vrsta djelovanja te određivanja otpornosti konstrukcije ili njenih dijelova na učinke opterećenja.

Proračunski modeli će rijetko biti potpuno vjerna slika stvarnog ponašanja konstrukcije. Oni su uvijek samo više ili manje grube aproksimacije ili pojednostavljenje stvarnosti. U izboru proračunskog modela treba naći mjeru između njegove kompleksnosti i očekivane

pouzdanosti. Zbog neizbježnog pojednostavljenja stvarnosti, model mora obuhvatiti one vidove ponašanja konstrukcije koji bitno utječu na ponašanje konstrukcije u razmatranoj projektnoj situaciji i razmatranom graničnom stanju. Uvijek je dobro držati se modela koji su se pokazali uspješnim u praksi. Posebni oprez treba primijeniti u nestandardnim slučajevima za koje model koji će se primijeniti nije doživio širu provjeru. Takvi slučajevi obično spadaju u treću kategoriju složenosti geotehničke konstrukcije (o ovim kategorijama vidi kasnije).

Osnovne varijable u modeliranju i njihove karakteristične vrijednosti

Osnovne varijable u analizi zadovoljenja bitnih zahtjeva na konstrukciju su *djelovanja*, F , u što spadaju opterećenja, zadani pomaci, temperatura i slično, zatim parametri materijala, X , i geometrijski podaci, a . Osnovne veličine tih varijabli nazivaju se karakterističnim (F_k, X_k, a_k), gdje indeks k označava da je veličina karakteristična. U idealnom, potpuno predvidljivom svijetu, predstavljale bi stvarne veličine predvidivih djelovanja, parametara materijala i geometrijskih veličina ako su nepromjenjive u vremenu ili njihove gornje ili donje granične vrijednosti ako su promjenljive s vremenom. U stvarnom svijetu takva definicija karakterističnih vrijednosti osnovnih varijabli je rijetko moguća. U takvom svijetu čak i potpuno predvidive varijable imat će obilježja slučajnih varijabli koje se ravnaju po statističkom zakonu normalne razdiobe ili će biti podložne približnoj procjeni u granicama mogućnosti predviđanja pojedinog projektanta. Iz tog će se razloga u praksi izbor karakterističnih vrijednosti varijabli temeljiti na zakonima statistike, kad god je to moguće. Iznimka će biti jedino izbor materijalnih parametara tla (geotehničkih parametara) kao i izbor karakterističnih djelovanja koja ovise o geotehničkim parametrima iz razloga posebnosti ponašanja prirodnog tla i uloge tla u zadovoljenju bitnih zahtjeva na građevinu.

Djelovanja koja se prenose iz konstrukcije u tlo određuje projektant konstrukcije, konstruktor, na temelju pravila koja daje Eurokod 1 i ovdje se neće posebno obrađivati. Karakteristična djelovanja kojima je uzrok tlo kao i karakteristične vrijednosti parametara tla obrađuje Eurokod 7 i ona su odgovornost geotehničara. Kako su djelovanja uzrokovana tlom uglavnom funkcije karakterističnih geotehničkih parametara, to će se problem njihovog određivanja svesti uglavnom na problem određivanja karakterističnih parametara tla.

Djelovanja se dijele na *trajna*² (oznaka G) kao što je vlastita težina, pritisak vode, pritisak tla i slično³; djelovanja prednapinjanja (oznaka P); *prolazna djelovanja* (oznaka Q) kao što su prometna opterećenja, opterećenja vjetrom, opterećenja od temperature, i slično; *slučajna djelovanja* (oznaka A) kao što je eksplozija, pad kamenja, udar broda u stup mosta, i slično; 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*

$$F_{\text{rep};i} = \psi_i F_{k;i}, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.1)$$

gdje indeks i označava i -to djelovanje koje se može pojaviti u kombinaciji s dugih n djelovanja istovremeno. Kombinacijski faktor kvantificira udio nekog opterećenja u kombinaciji s drugim opterećenjima kad je malo vjerojatno da će se karakteristične vrijednosti različitih opterećenja javiti istovremeno u punom iznosu. Zbog toga su kombinacijski faktori jednaki ili manji od 1. Neka se djelovanja ne pojavljuju kao sile (mada ih izazivaju) kao što je temperatura ili nametnuti pomak.

Karakteristične a_k vrijednosti materijalnih parametara su one, prema definiciji u sustavu eurokodova, za koje postoji vjerojatnost od 95 % da se neće pojaviti dio materijala nepovoljnijih karakteristika od karakteristične vrijednosti za razmatrano granično stanje. Dok se za industrijski proizvedene materijale, kao što je čelik ili čak beton, ispunjenje tog zahtjeva može provjeriti odgovarajućom statističkom obradom rezultata ispitivanja na propisanom većem broju uzoraka, provjera tog zahtjeva u slučaju tla i stijena rijetko je u praksi izvediva, a i iskustvo ukazuje na racionalnost drugačijeg pristupa. Razlozi drugačijeg pristupa određivanju karakterističnih vrijednosti parametara tla su mnogobrojni, od opterećujućeg troška i dugotrajnosti velikog broja ispitivanja tla s jedne strane do karaktera mehanizama koji djeluju pri pojavi graničnih stanja i koji zahvaćaju velike volumene tla s druge strane. Iz tog razloga određivanje karakterističnih vrijednosti parametara tla u Eurokodu 7 riješeno je na poseban način. Taj drugi način nastoji zadržati za tlo opisanu definiciju karakteristične vrijednosti materijalnog parametra za industrijski proizvedene materijale,

² djelovanja mogu biti sile, ali i pomaci i drugi utjecaji

³ G može imati jednu vrijednost, obično srednju, ili dvije, gornju graničnu, G_{sup} , i donju graničnu, G_{inf} , ako je moguća varijacija veća

ali u njenom praktičnom određivanju dozvoljava određenu dozu subjektivnosti stručnjaka kroz primjenu „usporedivog iskustva“. Taj drugi pristup zavređuje posebno i detaljnije obrazloženje koje će se dati u jednom od slijedećih poglavlja.

Karakteristične vrijednosti geometrijskih varijabli uglavnom su nazivne veličine geometrijskih karakteristika konstrukcije (veličine naznačene u projektu konstrukcije) i njihovo određivanje nije poseban problem. Karakteristične vrijednosti razine tla i razine podzemne vode mora se mjeriti ili njihove vrijednosti treba procijeniti kao gornje ili donje vrijednosti, već prema tome koja vrijednost je kritičnija za postizanje razmatranog graničnog stanja.

Provjera zadovoljenja bitnih zahtjeva na građevinu primjenom metode parcijalnih koeficijenata

Provjera zadovoljenja bitni zahtjeva na konstrukciju metodom parcijalnih faktora je format postupka kojim se provjerava da *proračunski učinak djelovanja* E_d (na pr. moment savijanja u presjeku elementa konstrukcije ili opterećenje temelja na tlo⁴) ne ugrožavaju *proračunsku otpornost* konstrukcije ili njenih dijelova R_d (na pr. otpornost presjeka elementa konstrukcije na savijanje, ili pak nosivost tla). Za granična stanja nosivosti taj zahtjev se može matematički izraziti kao

$$E_d \leq R_d \quad (2.2)$$

dok se za granična stanja uporabivosti on izražava obično kao

$$E_d \leq C_d \quad (2.3)$$

gdje je C_d najveći prihvatljivi učinak djelovanja koji još osigurava uporabivost konstrukcije. To na primjer može biti dozvoljeno slijeganje temelja ili dozvoljeno naginjanje potpornog zida.

Načelno se po tom formatu proračunski učinci djelovanja E_d određuju kao učinci *proračunskih djelovanja* F_d , a *proračunska otpornost* konstrukcije R_d kao otpornost za *proračunske vrijednosti materijalnih parametara* X_d

⁴ standardni indeks uz proračunsku vrijednost varijable je „d“ prema engl. *design*

$$E_d = E(F_d) \quad (2.4)$$

$$R_d = R(X_d) \quad (2.5)$$

gdje je $E()$ funkcija učinka djelovanja, a $R()$ funkcija otpornosti. Proračunska djelovanja i proračunski materijalni parametri određuju se iz odgovarajućih karakterističnih vrijednosti tih varijabli i odgovarajućih *parcijalnih koeficijenata*

$$F_d = F_{\text{rep}} \gamma_F \quad (2.6)$$

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (2.7)$$

Parcijalni koeficijent, za djelovanje γ_F , a za materijalni parametar γ_M , odražava moguće nepovoljno odstupanje odgovarajuće varijable od njene karakteristične vrijednosti u pojedinom graničnom stanju za neku dogovorenu vrlo malu vjerojatnost. Time se metoda parcijalnih faktora približava zahtjevima suvremenih teorija i analiza pouzdanosti konstrukcija. Njihova veličina je određena odredbama eurokodova, ovisi o vrsti i karakteru varijable i obično je jednaka ili veća od jedinice, kako će se kasnije detaljnije opisati. U slučaju graničnih stanja uporabivosti parcijalni koeficijenti su obično jednaki jedinici.

Proračunske vrijednosti geometrijskih veličina određuju se kao

$$a_d = a_k \pm \Delta a \quad (2.8)$$

Veličina Δa odražava moguće odstupanje geometrijske veličine od njene karakteristične (nazivne) veličine. Tako, na primjer, otpornost tla, u analizi stabilnosti potporne konstrukcije koja drži tlo oko građevne jame, ovisi o dubini iskopa te jame. Tijekom grubih zemljanih radova na iskopu jame treba pretpostaviti da u nekom trenutku stvarna dubina iskopa može odstupati od njene predviđene, karakteristične, vrijednosti. Eurokod 7 propisuje veličinu mogućeg odstupanja, Δa , koju u proračunima treba uzeti u obzir.

Kako djelovanja mogu ovisiti i o materijalnim parametrima, kao što je primjerice pritisak tla na konstrukciju, a otpornosti mogu ovisiti i o djelovanjima, kao što je primjerice slučaj kod nosivosti tla ispod plitkih temelja, to funkcije učinaka djelovanja kao i funkcije otpornosti mogu biti funkcije svih vrsta varijabli, kao na primjer

$$E_d = E(F_{d;i}, X_{d;j}, a_{d;m}); i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots; m = 1, 2, \dots \quad (2.9)$$

$$R_d = R(F_{d;i}, X_{d;j}, a_{d;m}); i = 1, 2, \dots; j = 1, 2, \dots; m = 1, 2, \dots \quad (2.10)$$

Umjesto primjene parcijalnih koeficijenata na izvoru nesigurnosti, tj. neposredno množenjem reprezentativnih djelovanja odnosno dijeljenjem karakterističnih parametara 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 koeficijentima. 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 varijanti proračunskih učinaka djelovanja i proračunskih otpornosti pokazuju slijedeći primjeri

$$E_d = \gamma_E E(F_{\text{rep};i}, X_{k;j}, a_{d;m}) \quad (2.11)$$

$$R_d = R(F_{\text{rep};i}, X_{k;j}, a_{d;m}) / \gamma_R \quad (2.12)$$

gdje su γ_E i γ_R parcijalni faktor za učinak djelovanja, odnosno za otpornost. U određenim slučajevima mogući su i drugi oblici proračuna proračunskih djelovanja i proračunskih otpornosti.

Veličine parcijalnih koeficijenata za djelovanja, osim za geotehnička, određuje Eurokod 1. Veličine parcijalnih koeficijenata za materijale i za geometrijske karakteristike određuju pojedini „materijalni“ eurokodovi, za geotehniku Eurokod 7. Za projektne situacije vezane za pojavu potresa ove veličine, uključivo i za geotehničke konstrukcije, određuje Eurokod 8.

2.5. Projektiranje prema Eurokodu 7

Sadržaj i pretpostavke

Mehanička svojstva materijala, čak i onih industrijski proizvedenih u strogo kontroliranim uvjetima, u mnogostrukim ispitivanjima na različitim uzorcima pokazuju određeni rasap oko neke srednje vrijednosti. Taj se rasap obično vlada po zakonu slučajnih brojeva i može se opisati statistički normalnom raspodjelom koju karakterizira simetričnost oko srednje vrijednosti te standardnom devijacijom kao mjerom širine. Pri tome srednja vrijednost ima značenje najvjerovatnije ili očekivane vrijednosti, dok se svakom odstupanju slučajne varijable od srednje vrijednosti, relativnom u odnosu na standardnu devijaciju, pridružuje određena vjerojatnost. Sustav eurokodova pod karakterističnom vrijednošću nekog materijalnog parametra općenito smatra onu vrijednost tog parametra za koju je vjerojatnost pojave nepovoljnije vrijednosti manja od 5 %.

Kao što je ranije naglašeno, takva definicija karakteristične vrijednosti za parametre tla i stijena nije praktična. U skladu s dosadašnjim iskustvom geotehničkog projektiranja, Eurokod 7 traži da se karakteristična vrijednost geotehničkog parametra (parametra tla ili stijene) mora odrediti „ ... na temelju rezultata i izvedenih veličina laboratorijskih i terenskih pokusa, uzimajući u obzir dobro utemeljeno iskustvo“, te se mora „ ... izabrati kao oprezna procjena veličine koja utječe na pojavu graničnog stanja“. Eurokod 7 dalje traži da se pri izboru karakteristične vrijednosti geotehničkog parametra uvažuje:

- geološke i druge informacije, kao što su podaci iz prethodnih projekata;
- varijabilnost mjerenih veličina i drugih relevantnih informacija, kao što je postojeće znanje;
- opseg terenskih i laboratorijskih pokusa;
- vrsta i broj uzoraka;
- veličinu zone tla ili stijene koja bitno utječe na ponašanje geotehničke konstrukcije za razmatrano granično stanje;
- sposobnost geotehničke konstrukcije da prenese opterećenje iz slabijih na jače zone u tlu ili stijeni.

Pri tome karakteristične vrijednosti mogu biti manje ili veće od najvjerovatnijih vrijednosti, a u svakoj analizi treba računati s najnepovoljnijom kombinacijom manjih i većih vrijednosti. Ako se koristi

statistička metoda pri izboru karakteristične vrijednosti geotehničkog parametra (kad broj i raspored uzoraka te broj ispitivanja to opravdavaju), izbor karakteristične vrijednosti slijedi njenu ranije opisanu standardnu definiciju za industrijski proizvedene materijale.

Ove, kao i još nekoliko sličnih preporuka za izbor karakteristične vrijednosti geotehničkog parametra odstupaju od definicije karakteristične vrijednosti materijalnih parametara industrijskih proizvedenih gradiva, čine geotehničko projektiranje u okviru eurokodova specifičnim, a sve da bi uvažile dosadašnju praksu i iskustvo proizašlo iz specifičnosti ponašanja tla i specifične uloge u zadovoljenju bitnih zahtjeva na građevinu. Pri tome se jako oslanjaju na iskustvo te zbog toga unose veliku dozu subjektivnosti u geotehničko projektiranje. Treba naglasiti da Eurokod 7 na više mjesta posebno naglašava da to iskustvo nije neka nedefinirana kategorija, već se traži da ono bude „usporedivo“. To znači da okolnosti gradnje u razmatranom slučaju, kao što su vrsta tla ili stijena te njihova svojstva ili vrsta konstrukcije i njen način izgradnje imaju jasno izražene sličnosti koje omogućuju usporedbu s ranije izvedenim geotehničkim konstrukcijama i da je argumentiranost tog iskustva dobro dokumentirana i objavljena u dostupnoj literaturi⁵.

Usporedivo iskustvo Eurokodu 7 općenito traži za slijedeće tri grupe slučajeva:

- primjenu korelacija za posredno određivanje geotehničkih parametara;
- primjenu računskih postupaka provjere bitnih zahtjeva za građevinu;
- primjenu iskustva za oblikovanje geotehničkih konstrukcija.

Mnogobrojna i različita istraživanja su pokazala da se u određenim slučajevima može uspostaviti vrlo jaka korelacija⁶ između pojedinog geotehničkog parametra (materijalnog parametra tla ili stijene) i rezultata nekog standardiziranog postupka ispitivanja čiji rezultati ne daju vrijednost traženog geotehničkog parametra neposredno, već taj parametar ima utjecaja na rezultate ispitivanja⁷. Kako se takva istraživanja provode za neminovno ograničeni skup vrsta tla, očito je da se pouzdanost predviđanja

⁵ zahtjev za primjenom usporedivog iskustva naglašava stalnu potrebu geotehničara za praćenjem najnovije relevantne stručne i znanstvene literature slično kao i u drugim strukama koje brzo napreduju.

⁶ jaka korelacija u statističkom smislu

⁷ Tipični primjer su korelacije između broja udaraca standardnog penetracijskog pokusa (SPT) i kuta trenja Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće za krupnozrna tla; u geotehnici su poznati i mnogobrojni drugi primjeri takvih korelacija.

primjenom tih korelacija može očekivati samo za slična tla i istu standardiziranu opremu za ispitivanje. Kako su izvedene zakonitosti samo empirijske korelacije, obično bez jačih teoretskih podloga, moguća su u praksi neočekivana odstupanja pa je nužan oprez u primjeni. Iz tog razloga Eurokod 7 ne dozvoljava korištenje korelacija u seriji, to jest nadovezivanja jedne korelacije na drugu i tako dalje.

Odredbe vezane za usporedivo iskustvo odnose se i na slučajeve kada ono ne uključuje korelaciju s nekim općim geotehničkim parametrom, već na parametre koji imaju samo lokalno značenje za postupak određivanja učinka djelovanja na geotehničku konstrukciju⁸.

Usporedivo iskustvo odnosi se i na postupke oblikovanja geotehničke konstrukcije koji su se u primjeni pokazali uspješnima. To se posebno odnosi na dijelove geotehničkih konstrukcija za čiju provjeru nekih od bitnih uvjeta na građevinu nisu uspostavljeni jasni postupci ili takvi postupci nisu praktični ili je iskustvo pokazalo da neki složeniji postupci provjere nisu neophodni. Tu se pojam usporedivog iskustva dotiče s projektiranjem prema propisanim mjerama, kao jednim od mogućih postupaka projektiranja prema Eurokodu 7, o čemu će kasnije biti više riječi.

Izbor karakterističnih i proračunskih vrijednosti geotehničkih parametara iz neposrednih mjerenja i iz izvedenih veličina

Varijable proračunskih modela učinka djelovanja i otpornosti imaju karakter slučajnih brojeva. Od tri osnovne vrste varijabli, za geotehničko projektiranja od posebnog su značaja parametri tla. Način izbora tih parametara u mnogome se razlikuje od načina izbora parametara industrijski proizvedenih 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 gotovo redovito 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

⁸ Tipični primjer čine postupci procjenu slijeganja plitkih temelja na krupnozrnim tlima korištenjem rezultata SPT-a, u kojima se ne pojavljuju korelacije broja udaraca s nekim univerzalnim geotehničkim parametrom, kao što je modul elastičnosti tla, već specifični parametri postupka procjene slijeganja.

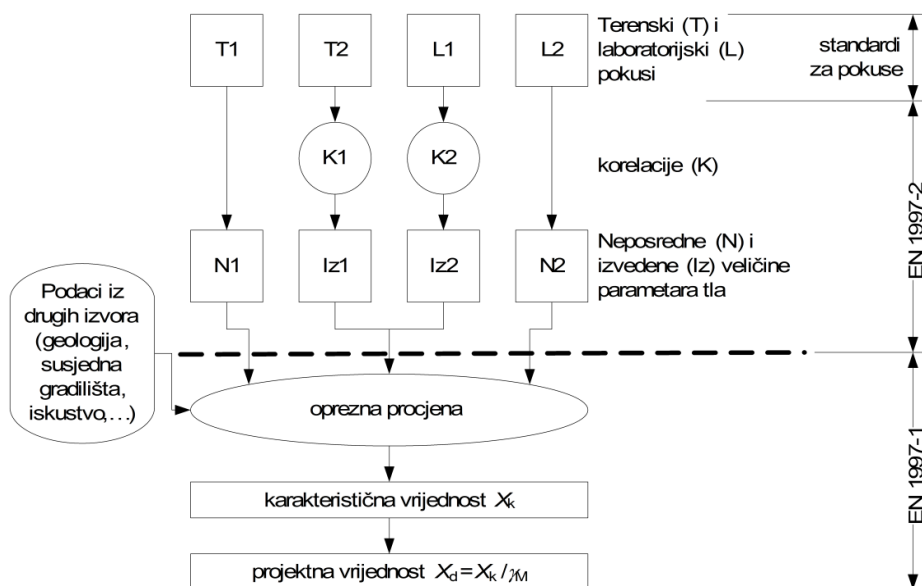
ponašanje tla složeno, često nepogodno za ispitivanje, i traži znatne troškove da bi se u tome ipak uspjelo, geotehnika je morala razviti posebne metode ispitivanja i posebne načine izbora geotehničkih parametara. Vrlo često se neki geotehnički parametar ne određuje statističkom obradom rezultata niza 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 neki geotehnički parametar može odrediti neposrednim ispitivanjem na terenu ili u laboratoriju, a ponekad se pak on određuje indirektno više ili manje empirijskim korelacijama iz rezultata pokusa kojim se ispituje neki drugi parametar. Redovito je pogodno neki geotehnički parametar odrediti na više načina kako bi se postigla veća pouzdanost izbora. U tom slučaju, kad različiti izvori daju različite vrijednosti geotehničkog parametra, pojam oprezne procjene iz Eurokoda 7 dobiva posebno na težini. Geotehničar je tada suočen s izborom i mora procjenjivati kojem ispitivanju da se više prikloni ili u nedostatku boljeg, da bude konzervativan i da izabere najnepovoljniju vrijednost. U takvim slučajevima potrebna je složen, ali i subjektivan, postupak usporedbe i vrednovanja pojedinih vrsta ispitivanja i njihove relativne podobnosti u danom slučaju.

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 koeficijenata djelovanja i parcijalnih koeficijenata materijala. Razumijevanje traženih uvjeta zahtjeva od projektanta dobro poznavanje suvremenih saznanja struke. Da bi se što bolje razlučili elementi postupka izbora karakteristične vrijednosti pojedinog geotehničkog parametra, a time ih i bolje normiralo, definira se više faza tog postupka, Slika 2-1. Tako se uvodi pojam izvedene veličine parametra (označeno s „Iz“) kao međukorak u izboru konačne karakteristične vrijednosti. 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. Slika 2-1 naznačuje i razgraničenje sadržaja prvog (EN 1997-1) i drugog (EN 1997-2) dijela Eurokoda 7.

Nastojeći biti u skladu s definicijom reprezentativnog parametra nekog svojstva industrijski proizvedenih građevinskih materijala, Eurokod 7 definira karakterističnu vrijednost materijalnog parametra 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 parametra tla, kao što prikazuje Tablica 2-1.

Eurokod 7 traži da se u projektu dokumentira i obrazloži način izbora karakterističnih vrijednosti parametra tla i stijena. Rezultate svih



Slika 2-1 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

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*.

Tablica 2-1 Iskustveno očekivani odnos karakteristične i srednje vrijednosti za tipične geotehničke parametre (Orr i Farrell 1999)

Parametar tla (X)	simbol	X_k / X_{srednje}
Tangens efektivnog kuta trenja	$\tan \varphi'$	0.95
Efektivna kohezija	c'	0.80
Nedrenirana čvrstoća	c_u	0.85
Edometarski modul	E_{oed}	0.80
gustoća	ρ	1.00

Tri geotehnička razreda

Eurokod 7 uvodi klasifikaciju od tri geotehnička razreda prema složenosti i rizičnosti geotehničke konstrukcije ili zahvata kako bi se racionalizirao opseg istražnih radova i složenost postupka dokazivanja stabilnosti i uporabivosti za građevine bitno različitih stupnjeva složenosti i različitih stupnjeva izloženosti riziku. Tako se prvi geotehnički razred odnosi na najjednostavnije konstrukcije (na pr. temelji jednokatnica, niski zidovi i nasipi i slično) gdje istražni radovi mogu obuhvaćati najjednostavnije radnje (pregled terena, primjena iskustva sa susjednih objekata i slično), a dokazi se stabilnosti mogu zamijeniti usporedivim iskustvom. Sadržaj se norme odnosi prvenstveno drugi geotehnički razred koji obuhvaća rutinske geotehničke zahvate, koji će se obrađivati u ovoj knjizi, i koji čine pretežni sadržaj većine geotehničkih projekata. To su plitki i duboki temelji, potporni zidovi, nasipi i niske nasute brane, jednostavnije građevne jame, stabilnost jednostavnijih kosina i slično. Za treći geotehnički razred, koji čine vrlo složeni zahvati i zahvati velikog rizika (na primjer temeljenje na mekom tlu, složene građevne jame u blizini postojećih objekata, klizišta, tuneli, visoke nasute brane, nuklearne elektrane i slično) 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.

Geotehnički se razredi mogu odnositi na čitavu građevinu ili samo njihov dio pa tako građevina može imati dijelove različito kategorizirane. Primjena razreda nije obvezna pa može poslužiti projektantu kao pomoć pri projektiranju.

Dvije vrste graničnih stanja: nosivost i uporabivost

Kao i u svim ostalim eurokodovima, Eurokod 7 podrazumijeva dvije vrste graničnih stanja: granična stanja nosivosti i granična stanja uporabivosti. Dok su za granična stanja nosivosti u pravilu parcijalni koeficijenti veći od jedan, za granična stanja uporabivosti ona su u pravilu jednaka jedinici. Dok konstrukcija mora zadovoljiti sve bitne zahtjeve u odnosu na pojavu bilo kojeg od graničnih stanja, obično će različite dimenzije konstrukcije uvjetovati različita granična stanja. Ponekad to može biti neko od graničnih stanja nosivosti, a ponekad neko od graničnih stanja uporabivosti. Ponekad je samo po sebi jasno koje će od graničnih stanja biti mjerodavno za dimenzioniranje konstrukcije pa provjere zadovoljenja bitnih zahtjeva za druga granična stanja neće biti potrebna, dok ponekad to neće biti odmah jasno pa će trebati provesti proračune za različite proračunske situacije i različita granična stanja. U svakom slučaju u projektu treba jasno naznačiti sve proračunske situacije s pripadnim graničnim stanjima za koje se provjerava zadovoljenje bitnih zahtjeva na građevinu te treba pokazati da mimo izabranih projektnih situacija nema kritičnijih.

U klasičnoj geotehničkoj praksi pretežno su proračunske situacije za granična stanja nosivosti smatrane kritičnijima od onih za granična stanja uporabivosti. Zato se pri izboru vrsta istražnih radova davala veća težina onima kojima su utvrđivani geotehnički parametri vezani na čvrstoću tla, a manja se pažnja posvećivala vrstama istražnih radova kojima se utvrđuje krutost tla kao glavni geotehnički parametar za granična stanja uporabivosti. Takvo gledanje se sve više napušta pa zahtjev za pouzdanim određivanjem krutosti tla postaje sve značajniji.

Pet vrsta graničnih stanja nosivosti

Eurokod 7 (EN 1997-1:2004) 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 primjer 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 primjer 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 primjer 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 primjer izdizanje lagane podzemne konstrukcije pod pritiskom uzgona podzemne vode, izdizanje i probijanje slabo propusnog 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 primjer 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).

Oznake EQU, STR, GEO, UPL i HYD dolaze od engleskih riječi *equilibrium* (ravnoteža), *structural* (kostrukcijski), *geotechnical* (geotehnički), *uplift* (uzgon) i *hydraulic* (hidraulički). Prva tri granična stanja uglavnom se podudaraju s onima iz prednorme Eurokoda 7, dok se zadnja dva pojavljuju

prvi puta u konačnoj verziji norme. U EN 1990 još se definira i granično stanje vezano za zamor materijala (FAT), ali toga nema u Eurokodu 7. Parcijalni koeficijenti za djelovanja i za svojstva materijala razlikuju se za pojedina od ovih pet graničnih stanja. Forma provjere zadovoljenja bitnih zahtjeva za građevinu za ovih pet graničnih stanja nosivosti metodom parcijalnih koeficijenata prikazuje Tablica 2-2.

Mada naoko različitih formi, provjere otpornosti za sva granična stanja nosivosti mogu se svesti na ono za granična stanja STR/GEO. Razlika među graničnim stanjima nosivosti se uvodi radi mogućnosti primjene različitih parcijalnih koeficijenata. Ove parcijalne koeficijente popisuju Tablica 2-3, Tablica 2-4, Tablica 2-5, Tablica 2-6 i Tablica 2-7. Za granična stanja STR i GEO koeficijenti su grupirani u grupu A za djelovanja, grupu M za materijale uključivo tlo, i grupu R za otpornosti. Za ostala granična stanja nosivosti parcijalni koeficijenti za materijale i otpornosti su zajednički. Za STR i GEO grupe su podijeljene na podgrupe, ovisno o pristupu proračunima provjere otpornosti, kako prikazuje Tablica 2-8 i što će biti kasnije objašnjeno. Opći izraz za provjeru otpornosti za to granično stanje nosivosti, prema grupama parcijalnih koeficijenata, tada glasi

$$\begin{aligned}
 E_d &= \gamma_E E \left(\gamma_{F;i} F_{\text{rep};i}, \frac{X_{k;j}}{\gamma_{M;i}}, a_k \pm \Delta a_m \right) \leq \\
 &\leq R_d = R \left(\gamma_{F;i} F_{\text{rep};i}, \frac{X_{k;j}}{\gamma_{M;j}}, a_k \pm \Delta a_m \right) / \gamma_R
 \end{aligned}
 \tag{2.13}$$

Ovim izrazom su obuhvaćeni svi mogući slučajevi postavljanja parcijalnih koeficijenata, bilo neposredno uz uzorke učinaka (djelovanja) i uzroke otpornosti (parametri materijala i tla), bilo neposredno na same učinke ili same otpornosti.

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

Granično stanje	Provjera otpornosti	Napomene
EQU	$E_{dst;d} \leq E_{stb;d} + T_d$	$E_{dst;d}$ je destabilizirajući, a $E_{stb;d}$ stabilizirajući proračunski učinak djelovanja, a T_d je moguća otpornost tla
STR/GEO	$E_d \leq R_d$	E_d je proračunski učinak djelovanja, a R_d proračunska otpornost
UPL	$V_{dst;d} \leq G_{stb;d} + R_d$	$V_{dst;d} = G_{dst;d} + Q_{dst;d}$ je kombinacija trajnog (G) i prolaznog (Q) proračunskog destabilizirajućeg vertikalnog djelovanja, a $G_{stb;d}$ je proračunsko stabilizirajuće vertikalno trajno djelovanje; R_d je moguća proračunska otpornost tla na izdizanje konstrukcije
HYD	$u_{dst;d} \leq \sigma_{stb;d}$ ili $S_{dst;d} \leq G'_{stb;d}$	$u_{dst;d}$ odnosno $S_{dst;d}$ su proračunski destabilizirajući tlak porne vode na dnu stupca tla odnosno strujna sila u stupcu tla, a $\sigma_{stb;d}$ odnosno $G'_{stb;d}$ su ukupno proračunsko vertikalno naprezanje na dnu stupca odnosno efektivna težina stupca tla

Tablica 2-3 Granično stanje STR i GEO: parcijalni koeficijenti za djelovanja i učinke djelovanja (za oznake A1 i A2, vidi poglavlje o tri proračunska pristupa za granično stanje STR/GEO)

(1) Parcijalni koeficijenti za djelovanja (γ_F) i učinke djelovanja (γ_E)				
Djelovanja		simbol	A1	A2
trajna	nepovoljna	γ_G	1.35	1
	povoljna	γ_G	1	1
prolazna (povremena)	nepovoljna	γ_Q	1.5	1.3
	povoljna	γ_Q	0	0

Tablica 2-4 Granično stanje STR i GEO: parcijalni koeficijenti za parametre tla (za oznake M1, M2, vidi poglavlje o tri proračunska pristupa za granično stanje STR/GEO)

(2) Parcijalni koeficijenti za geotehničke parametre (γ_M)			
Svojstvo	simbol	M1	M2
tangens efektivnog kuta trenja	$\gamma_{\varphi'}$	1	1.25
efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1	1.25
nedrenirana i jednoosna čvrstoća	γ_{cu} i γ_{qu}	1	1.4
gustoća	γ_{ρ}	1	1

Tablica 2-5 Granično stanje STR i GEO: parcijalni koeficijenti za otpornosti (za oznake R1, R2, R3 i R4 vidi poglavlje o tri proračunska pristupa za granično stanje STR/GEO)

(3) Parcijalni koeficijenti otpornosti (γ_R)						
Otpornost		simbol	R1	R2	R3	R4
plitki temelji	nosivost	$\gamma_{R,v}$	1	1.4	1	-
	klizanje	$\gamma_{R,h}$	1	1.1	1	-
zabijeni piloti	stopa	γ_b	1	1.1	1	1.3
	plašt (tlak)	γ_s	1	1.1	1	1.3
	stopa+plašt (tlak)	γ_t	1	1.1	1	1.3
	plašt (vlak)	$\gamma_{s,t}$	1.25	1.15	1.1	1.6
bušeni piloti	stopa	γ_b	1.25	1.1	1	1.6
	plašt (tlak)	γ_s	1	1.1	1	1.3
	stopa+plašt (tlak)	γ_t	1.15	1.1	1	1.5
	plašt (vlak)	$\gamma_{s,t}$	1.25	1.15	1.1	1.6
prednapeta sidra	privremena	$\gamma_{a,t}$	1.1	1.1	1	1.1
	trajna	$\gamma_{a,p}$	1.1	1.1	1	1.1
potporne konstrukcije	nosivost	$\gamma_{R,v}$	1	1.4	1	-
	klizanje	$\gamma_{R,h}$	1	1.1	1	-
	otpor tla	$\gamma_{R,e}$	1	1.4	1	-
kosine i opća stabilnost	otpor tla	$\gamma_{R,e}$	1	1.1	1	-

Napomena: EN 1997-1 još definira posebne parcijalne faktore za uvertane pilote koji su ovdje izostavljeni

Tablica 2-6 Granična stanja EQU, UPL i HYD: parcijalni koeficijenti za djelovanja

(1) Parcijalni koeficijenti za djelovanja (γ_F)					
Djelovanja		simbol	EQU	UPL	HYD
trajna	nepovoljna (destabilizirajuća)	γ_G	1.1	1	1.35
	povoljna (stabilizirajuća)	γ_G	0.9	0.9	0.9
prolazna (povremena)	nepovoljna (destabilizirajuća)	γ_Q	1.5	1.5	1.5
	povoljna (stabilizirajuća)	γ_Q	0	0	0

Tablica 2-7 Granična stanja EQU, UPL i HYD: parcijalni koeficijenti za geotehničke parametre i otpornosti

(2) Parcijalni koeficijenti za geotehničke parametre (γ_M) i otpornosti (γ_R)			
Svojstvo	simbol	EQU	UPL
tangens efektivnog kuta trenja	$\gamma_{\varphi'}$	1	1.25
efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1	1.25
nedrenirana i jednoosna čvrstoća	γ_{cu} i γ_{qu}	1	1.4
gustoća	γ_{ρ}	1	1
vlačna otpornost pilota	$\gamma_{s;t}$	-	1.4
otpornost sidra	γ_a	-	1.4

Tri proračunska pristupa za granično stanje nosivosti STR/GEO

Prednorma Eurokoda 7 je predviđala tri kombinacije parcijalnih koeficijenata, A, B i C, s kojima se trebala provjeriti otpornost 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 predstavnici mnogih zemalja nisu bili zadovoljni te su predloženi i drugačiji proračunski 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 proračunski pristupi za različite vrste konstrukcija i da se parcijalni koeficijenti prilagode vlastitim potrebama i uvjetima. Predloženi parcijalni koeficijenti izabrani su tako da se konstrukcije dimenzionirane po različitim pristupima razlikuju što manje, ali određene razlike, ne uvijek beznačajne, su ostale. Načelno je moguće i da se neka zemlja ne odredi te da time prihvati ravnopravno primjenu sva tri proračunska pristupa. Ovdje će se ukratko prikazati ta tri pristupa. U trenutku pisanja ovog teksta Hrvatska se još nije odlučila koji će pristup (ili pristupe) prihvatiti.

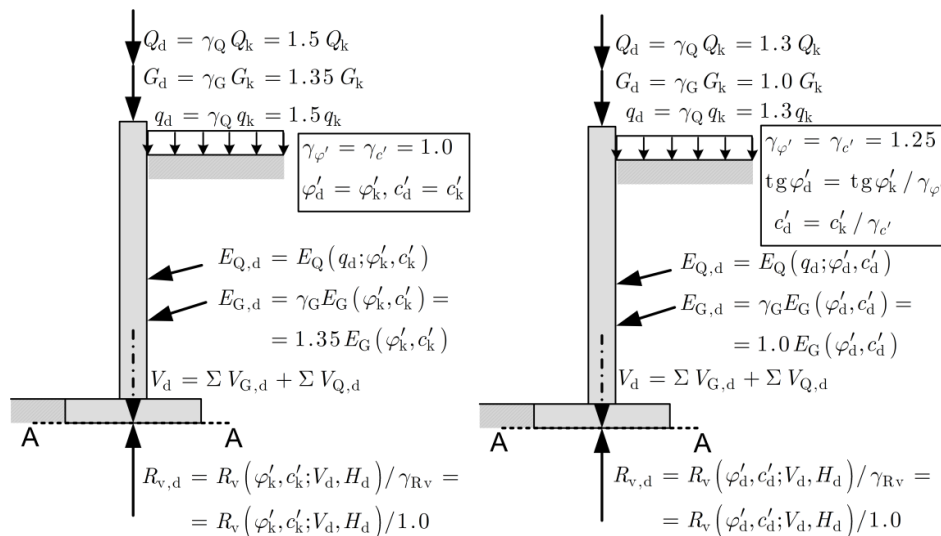
Navedena tri pristupa analizi odnose se na granično stanje STR i GEO, dok je za ostala granična stanja zadržan jedinstveni pristup. Tri se pristupa uglavnom razlikuju po fazi proračuna u kojoj će se primijeniti parcijalni faktori: da li na ulazne podatke (djelovanja i svojstva materijala) ili na rezultate proračuna (učinke djelovanja i otpornosti). Pristupi proračunu pobliže definiraju varijante izračuna proračunskog djelovanja (E_d) i proračunske otpornosti (R_d) 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.

Parcijalni koeficijenti podijeljeni su za svaki proračunski pristup u grupu A za djelovanja, grupu M za svojstva materijala i grupu R za otpornosti. Kombinacije pojedinih skupina za svaki od tri proračunska pristupa

prikazuje . Prikaz primjene pojedinog proračunskog pristupa na primjeru nosivosti tla ispod potpornog zida prikazuju Slika 2-2, Slika 2-4 i Slika 2-3.

Tablica 2-8 Tri proračunska pristupa (PP) za granična stanja nosivosti STR i GEO: kombinacije grupa parcijalnih koeficijenata A (djelovanja), M (materijal) i R (otpornosti); u PP1 provjerava se otpornost za obje kombinacije parcijalnih koeficijenata (K1 i K2)

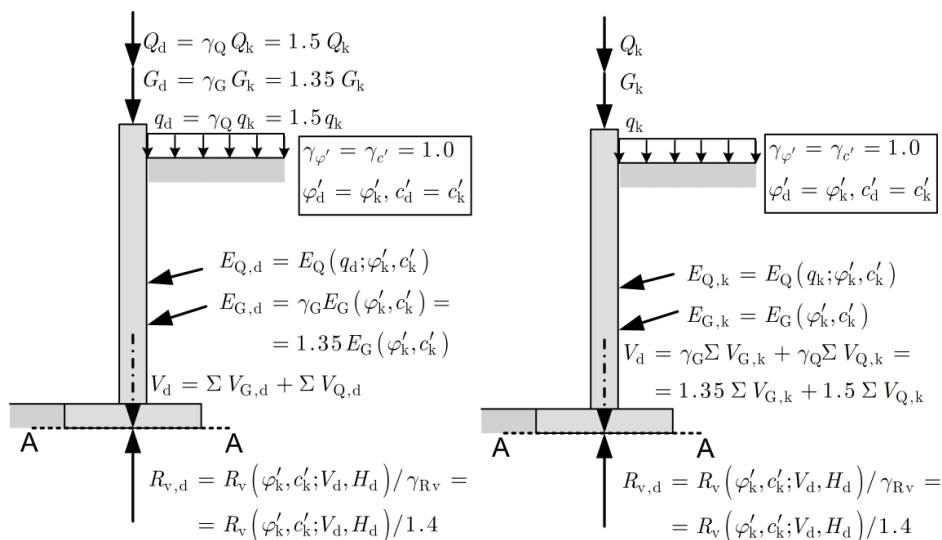
PP1	PP2	PP3 ⁹
osno opterećeni piloti i sidra		
kombinacija 1 (K1)		
A1 + M1 + R1		
kombinacija 2 (K2) ¹⁰		
A2 + (M1 ili M2) + R4		
<hr/>		
sve ostale konstrukcije		
kombinacija 1 (K1)		
A1 + M1 + R1		
kombinacija 2 (K2)		
A2 + M2 + R1		



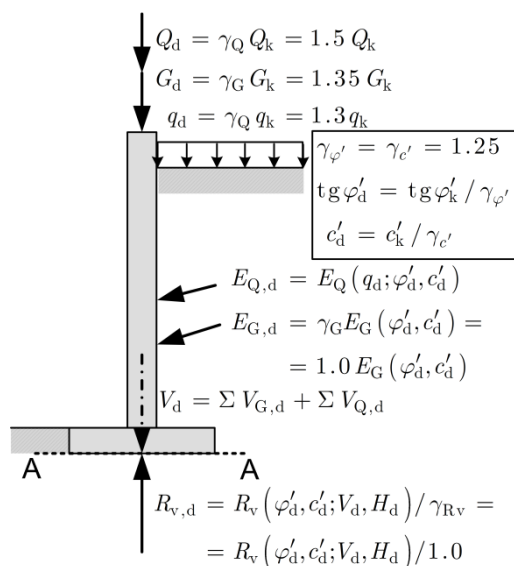
Slika 2-2 Proračunski pristup 1 (PP1), Kombinacija 1 (lijevo) i Kombinacija 2 (desno), za granično stanje nosivosti tla ispod temelja potpornog zida (presjek A-A); radi jednostavnosti razmatrana su samo nepovoljna djelovanja u vertikalnom smjeru (prerađeno prema Frank i dr. 2004)

⁹ A1 za sile od konstrukcije, a A2 za „geotehničke“ sile (sile od tla ili koje se prenose kroz tlo)

¹⁰ M1 za pilote i sidra, a M2 za nepovoljno djelovanje negativnog trenja ili bočnog opterećenja pilota



Slika 2-4 Proračunski pristupi 2, PP2 (lijevo), i varijanta 2*, PP2* (desno) za granično stanje 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 2-3 Proračunski pristup 3, PP3, za granično stanje 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)

Jedan od osnovnih razloga uvođenja sustava eurokodova je jedinstveni pristup proračunu svim konstrukcijama, uključivo i geotehničke. Iz tog se razloga „konstrukterski“ parcijalni koeficijenti u geotehničkim konstrukcijama, koji su izabrani mnogo ranije nego se geotehnika "uključila" u eurokodove, ne bi trebali mijenjati. Tako je za odabir „geotehničkih“ parcijalnih koeficijenta, tj. onih 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 trebalo je ipak nekako obuhvatiti. To se postiglo proračunskim pristupom PP1 s dvije kombinacije proračuna, K1 i K2¹¹, a s obrazloženjem da je vrlo mala vjerojatnost istovremene pojave parametara tla slabijih, a opterećenja većih od njihovih karakterističnih veličina. Na taj se način pretpostavlja da su dovoljno obuhvaćene i nesigurnosti u izboru veličine računskih parametara tla i računskih djelovanja, a bez uvođenja većeg stupnja konzervativnosti od onog koji se pokazao prihvatljivim kroz dosadašnju praksu. Jasno, time je gotovo udvostručen opseg proračuna u odnosu na raniju praksu, što je kod nekih projekatnata izazvalo zabrinutost i negativan stav prema takvom pristupu. Predloženi su zato i drugi proračunski pristupi, PP2 i PP3, po kojima opseg proračuna ostaje više ili manje u ranijim granicama, ali pak prema nekima, imaju druge mane. Kako na razini Europe nije došlo do potrebnog konsenzusa, ostavljeno je svakoj zemlji na izbor koji će proračunski pristup na svom ozemlju propisati.

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 prednormi Eurokoda 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, kao što je rečeno, povećava opseg proračuna u projektiranju jer za svako kritično stanje u nekoj projektnoj situaciji zahtijeva dva nezavisna proračuna. Takav pristup preuzet je u Eurokodu 7 kao Proračunski pristup 1. Slikovito je taj pristup prikazan na primjeru provjere stabilnosti tla ispod temelja potpornog zida na Slika 2-2.

¹¹ u prednormi ENV 1997 te kombinacije su imale oznaku B i C.

S druge strane, u mnogim se zemljama dosadašnja praksa koristila pristupom provjeri otpornosti 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, to jest $GFS = R_k/E_k$. "Sigurna" konstrukcija smatrana je onom za koju se moglo dokazati da *GFS* nigdje i nikada ne pada ispod neke propisane veličine (obično oko 2). Provjera otpornosti tražila je samo jedan proračun provjere neke proračunske situacije.

Analizirajući moguće varijante izračuna proračunskih učinaka djelovanja i proračunskih otpornosti, uočava se za slučaj primjene parcijalnih koeficijenata na izlazu iz modela proračuna (to jest kad se koristi varijanta $R_d = R_k/\gamma_R$ i $E_d = \gamma_E E_k$) da je tada $GFS = (R_d/E_d)(\gamma_R/\gamma_E)$, što pri optimalnom dimenzioniranju konstrukcije, 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 Proračunski pristup 2.

Proračunski pristup 2 slikovito prikazan na Slika 2-4. 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 kojoj se ukupno "faktoriziranje" provodi na izlasku iz proračunskog modela. Proračunski se pristup 2, a pogotovo 2*, time potpuno odmaknuo od osnovnog motivacije korištenja parcijalnih koeficijenata, po kojoj se, prema suvremenoj teoriji analize rizika, parcijalni koeficijenti trebaju primijeniti na izvoru rizika, to jest na parametre tla i djelovanja.

Proračunski pristup 3 otišao je u suprotnu krajnost u odnosu na PP2*, ali se kao i PP1 najviše približio osnovnom konceptu parcijalnih koeficijenata. U njemu se svi parcijalni koeficijenti unose na izvoru, na ulazu u proračunski model, i to, za razliku od PP1, istovremeno ograničavajući analizu nosivosti na jedan proračun za jedno granično stanje. Time se dobilo na eleganciji, ali uz cijenu ponekad povećane konzervativnosti u projektnom rješenju. Povećana konzervativnost može se najlakše uočiti na primjeru gravitacijskog potpornog zida. Prema Proračunskom pristupu 3 aktivni se tlak na zid računa s proračunskim parametrima tla manjim od karakterističnih. Time se dobiva veći računski pritisak na zid u odnosu na dosadašnju praksu. Primjena PP3 na primjeru nosivosti tla ispod temelja potpornog zida prikazuje Slika 2-3.

Kao što je već rečeno, konsenzus oko toga 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 proračunskim 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). Mala razlika za različite proračunske pristupe to je manje značajna ako se uzme u obzir činjenicu da ekonomičnost neke konstrukcije ovisi o različitim

faktorima od koji mnogi nemaju puno veze sa proračunskim pristupima iz Eurokoda 7. Neke analize dokazuju ozbiljne zamjerke na PP2 i PP2* (Simpson 2000, Simpson i Powrie 2001). Glavni pobornik PP2* je Njemačka (Vogt i dr. 2006) i Francuska (uz korištenje PP3 za globalnu stabilnost i stabilnost kosina), pobornik PP1 je Velika Britanija i Portugal, dok PP3 zagovara Nizozemska. Irska za sada omogućuje ravnopravnu primjenu sva tri pristupa. Vrijeme i praksa će, kao i uvijek, pokazati kojim pristupom treba ići u budućnosti.

S obzirom na sve rašireniju uporabu složenih proračunskih modela za provjeru doseganja 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 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 doseganju 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 $E_d \leq R_d$ metodom $c-\varphi$ redukcije razlikovat će se između proračunskog pristupa u kojem se varijable "faktoriziraju" prije ulaska u proračunski model, i proračunskog pristupa u kojem se "faktoriziraju" rezultati proračuna, učinci djelovanja i otpornosti. U prvom se slučaju (proračunski 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 $E_d \leq R_d$ biti zadovoljen ako je $FS \geq \gamma_{M2}$. U drugom slučaju (proračunski pristup 2*) $c-\varphi$ redukcija se provodi bez prethodnog

"faktoriziranja" vanjskih sila. Uvjet $E_d \leq R_d$ će biti zadovoljen ako je $FS \geq \gamma_{A1}\gamma_{R2}$ 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 $Q_k \times (\gamma_Q/\gamma_G)$, a uvjet $E_d \leq R_d$ će biti zadovoljen ako je $FS \geq \gamma_G$). Već površnom usporedbom proračunskih pristupa u svjetlu ovih argumenata, uočava se da će za granična stanja opće stabilnosti (u kojoj se slom javlja samo kroz tlo) PP2* biti znatno konzervativniji od PP3, a pogotovo od PP1. To je i razlog da će se zemlje koje su pristalice PP2*, za probleme opće stabilnosti vjerojatno opredijeliti na PP3.

Možda je zanimljivo razmotriti dosadašnju projektantsku praksu u Hrvatskoj u svjetlu predloženih proračunskih pristupa. U slučaju nosivosti tla ispod plitkih temelja kao i nosivosti vertikalno opterećenih pilota, dosadašnjim propisima u Hrvatskoj najbliži je PP3. Isti proračunski pristup najbliži je dosadašnjoj praksi proračuna stabilnosti kosina. Izgleda da se najveća razlika u odnosu na domaću praksu javlja kod proračuna 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 7, bez obzira o kojem se pristupu radi, zid će trebati dimenzionirati na jači pritisak.

Četiri metode provjere bitnih zahtjeva na građevinu

Geotehnička praksa poznaje i alternativne načine provjere bitnih zahtjeva na konstrukciju osim proračunskih modela. Uvažavajući tu praksu, Eurokod 7 razlikuje četiri temeljna načina geotehničkog projektiranja:

- *proračunom*, koristeći proračunske postupke određivanja učinka djelovanja (E) i otpornosti (R) konstrukcija ili njenih dijelova temeljem analitičkih, polu-empirijskih i numeričkih modela; to je pretežit postupak provjere bitnih zahtjeva za većinu geotehničkih konstrukcija (obično za geotehničke razrede 2 i 3); glavnina sadržaja Eurokoda 7 odnosi se na ovaj način provjere bitnih zahtjeva;
- *propisanim mjerama* koje se sastoje od uobičajenih i općenito konzervativnih, na nacionalnoj razini utvrđenih, pravila i postupaka projektiranja bez eksplicitne provjere bitnih zahtjeva na konstrukciju; ove mjere uključuju i kontrolu 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 geotehnički razred, pravila kontrole kvalitete, nadzora i slično);

- *eksperimentalnim modelima* koji uključuju fizičke modele kao što su probna opterećenja na dijelovima konstrukcije ili na modelima u realnom ili umanjenom mjerilu; to su postupci koji se najčešće koriste pri projektiranju geotehničkih sidara i pilota, a rjeđe kod drugih geotehničkih konstrukcija ili njihovih dijelova; na ovim se modelima eksperimentalnom metodom neposredno utvrđuje najčešće karakteristična otpornost (R_k) konstrukcije ili njenog dijela;
- *metodom opažanja* (Nicholson i dr. 1999, Szavits-Nossan 2006) kojom se projekt tijekom građenja neprekidno preispituje temeljem sustavnog opažanja; ovom metodom se proračunske pretpostavke, kao što su geotehnički i proračunski model, neprestano kalibriraju prema rezultatima opažanja i mjerenja tijekom izgradnje te se temeljem toga, ako okolnosti dozvoljavaju, mijenjaju pojedine dimenzije konstrukcije i građevinskog zahvata općenito ili se mijenjaju detalji izvedbe; ovaj inače stari postupak, čijom primjenom je Terzaghi stekao dobar dio svoje slave, a Peck (1967) ga formalizirao, izgleda dobiva razvojem tehnika opažanja sve više pobornika; po složenosti postupka ova metoda obično geotehnički zahvat svrstava u 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.

Izveštaj o geotehničkim istražnim radovima i geotehnički projekt

Na zadovoljenje bitnih zahtjeva na građevinu pouzdanost izbora geotehničkih parametara od najvećeg je značaja. Geotehnički parametri opisuju mehanička svojstva vrlo složenog prirodnog materijala, tla ili stijene, čija se svojstva i prostorni raspored mogu kretati u vrlo širokom rasponu pa treba očekivati da će skoro svaka lokacija budućeg građevinskog zahvata predstavljati gotovo jedinstveni slučaj. Svaki takav slučaj treba istražiti u mjeri koja će omogućiti pouzdano planiranje sigurne i ekonomične gradnje. Iz tog razloga svako projektiranje geotehničke konstrukcije ili zahvata

počinje geotehničkim istražnim radovima. Ove okolnosti čine geotehničko projektiranje posebnim u odnosu na projektiranje konstrukcija izgrađenih iz industrijski proizvedenih materijala čija su svojstva tvornički garantirana. Tu činjenicu uvažava i Eurokod 7 koji planiranju, izvedbi i interpretaciji istražnih radova pridaje veliku važnost, često izričito veću od važnosti izbora nekog više ili manje složenog proračunskog modela.

Kako planiranje, istraživanje i izvedba geotehničkog zahvata čine skup složenih postupaka koji se izvode u fazama i često uključuju rad većeg broja sudionika, od posebne je važnosti osiguranje pouzdanog i točnog prijenosa informacija među sudionicima gradnje. Da bi se to osiguralo, postupke u planiranju, istraživanju i gradnji treba jasno i precizno dokumentirati. Eurokod 7 traži dvije vrste bitnih dokumenata: *izvještaj o geotehničkim istražnim radovima* i *geotehnički projekt*. Za obje vrste dokumenata Eurokod 7 navodi dosta precizne zahtjeve i upute o njihovom sadržaju od kojih će se ovdje opisati samo oni osnovni i najvažniji.

Zbog različitih situacija u praksi stroga podjela sadržaja između izvještaja o geotehničkim istražnim radovima i geotehničkog projekta nije moguća, ali načelno podjela slijedi podjelu koju prikazuje Slika 2-1. Opis i podaci o lokaciji, zatim svrha, opseg, raspored, opis, vrijeme izvođenja i opravdanost postupaka, opreme, primijenjenih standarda, načina obrade i interpretacija terenskih i laboratorijskih istražnih radova za tlo, stijenu i podzemnu vodu, zatim neposredno određivanje parametara tla i stijena iz rezultata odgovarajućih pokusa kao i posredno određivanje izvedenih veličina parametara temeljem priznatih i dobro utemeljenih korelacija, kao i drugih raspoloživih relevantnih podataka, uključivo geološke podatke, podatke o susjednim građevinama i druge podatke od važnosti za buduću izgradnju planiranog zahvata čine sadržaj izvještaja o geotehničkim istražnim radovima. Tim se sadržajem u najvećoj mjeri bavi drugi dio Eurokoda 7 (EN 1997-2).

Izbor karakterističnih vrijednosti geotehničkih parametara kao oprezna procjena neposredno određenih parametara, izvedenih parametara te ostalih relevantnih podataka i usporedivog iskustva, zatim opis, podaci i nacrti geotehničke konstrukcije i njenih dijelova, određivanje proračunskih vrijednosti geotehničkih parametara, izbor proračunskih situacija sa svim dokazima o ispunjavanju bitnih zahtjeva na geotehničku građevinu i njene dijelove s pripadnim nacrtima i proračunima, izjava o korištenim normama i standardima, izjava o općoj pogodnosti lokacije za planiranu gradnju i razinu prihvatljivog rizika te popis kontrola, opažanja i održavanja potrebnih tijekom gradnje i tijekom korištenja građevine čini sadržaj geotehničkog projekta. Tim se sadržajem u najvećoj mjeri bavi prvi dio Eurokoda 7.

2.6. Vrste, planiranje i opseg geotehničkih istražnih radova

Vrste i primjenjivost pojedinih ispitivanja

Cilj geotehničkih istražnih radova je da prikupi podatke o temeljnom tlu i stijeni, podzemnoj vodi, geologiji, geomorfologiji, hidrologiji, seizmičnosti, relevantnim pojavama na lokaciji (kao što su na primjer klizišta), okolnim građevinama te drugim relevantnim podacima o lokaciji potrebnim za projektiranje, izgradnju i korištenje otporne, stabilne, uporabive i trajne konstrukcije. Ti podaci se mogu prikupljati postupno, ali tako da pravodobno budu dostupni oni relevantni za pojedinu fazu projektiranja ili gradnje. Dio tih podataka koji puta je dostupan od ranije ili sa susjednih lokacija što može znatno olakšati, ubrzati i smanjiti opseg istraživanja.

Za ispitivanje tla i stijena na raspolaganju postoje brojni i različiti postupci s odgovarajućom opremom. Uzroci brojnosti tih postupaka su mnogobrojni: primjerenost pojedinih postupaka ispitivanja samo za neke vrste tla, brojnost parametara tla i postupaka potrebnih za dokazivanje bitnih zahtjeva na građevinu, pouzdanost, uporabivost i cijena pojedinih postupaka, ovisnost izbora pojedinih postupaka ispitivanja tla o vrsti geotehničkog zahvata kao i mnogi drugi.

Ispitivanja tla se općenito mogu podijeliti na terenska i laboratorijska. Terenska ispitivanja se mogu podijeliti na istražne jame, bušenje bušotina s uzimanjem uzorka tla i stijena te raznim ispitivanjima u bušotini, ispitivanja statičkim ili dinamičkim penetracijama različitih sondi bez korištenje bušotine, geofizička ispitivanja s površine terena, te razne postupke opažanja i mjerenja deformacija, naprezanja i pornih tlakova.

Istražne jame su plitkog dosega od najviše nekoliko metara i služe za uzimanje plitkih uzoraka tla i vizualnu inspekciju tla.

Bušenje bušotina služi za određivanje rasporeda slojeva i zona u tlu i stijeni, za vađenje poremećenih i neporemećenih uzoraka tla i stijene koji će se dalje ispitivati u laboratoriju, za izvođenje različitih postupaka ispitivanja tla i stijene neposredno u bušotini, te za mjerenje razine i pritisaka podzemne vode i deformacija tla.

Ispitivanje statičkom ili dinamičkom penetracijom raznih sondi na terenu mjere se otpori prodiranja sonde kao i neki drugi parametri tijekom prodiranja sondi u temeljno tlo. Ti parametri posredno opisuju mehanička svojstva tla pa su pogodni za primjenu samo ako postoje pouzdane korelacije

s temeljnim parametrima kao što su čvrstoća i krutost. Ta ispitivanja su vrlo atraktivna jer su pravilu jeftinija i brža od ispitivanja koja traže bušenje, vađenje uzoraka i ispitivanje u laboratoriju, ali im je primjene ograničena postojećim korelacijama. Ova se ispitivanja često koriste u kombinaciji s bušenjem, vađenjem uzoraka i laboratorijskim ispitivanjem uzorka na način da se utvrđuju lokalne korelacije između parametara dobivenih penetracijom i temeljnih parametara tla i stijena dobivenih ispitivanjem u laboratoriju na neporemećenim uzorcima tla i stijena.

Geofizička ispitivanja mogu se provoditi iz bušotina, ali i s površine terena bez izvođenja bušenja. Njima se ispituju različita svojstva tla kao što su brzina širenja seizmičkih valova, otpori prolasku električne struje, magnetska i radioaktivna svojstva i druga. Nekad su služila uglavnom za grubu procjenu prostornog rasporeda pojedinih vrsta tla i stijena, a danas neka služe i za neposredno određivanje nekih mehaničkih svojstava tla i stijena što ih čini sve više atraktivnima.

Posebna vrsta ispitivanja tla i stijena su ona koja služe za praćenje deformacija, naprezanja i pornih tlakova u tlu, posebno tijekom izgradnje i korištenja građevine, a služe za kontrolu ponašanja konstrukcije i tla i za utvrđivanje odstupanja tog ponašanja od onog predviđenog u projektu. Koriste se u postupcima kontrole kvalitete, ali i u ranije spomenutom postupku projektiranja metodom opažanja.

Posebni problem ispitivanja tla je stanje poremećenosti uzoraka koji služe za određivanje parametra tla u laboratoriju. Postupci vađenja uzorka iz bušotina u većoj ili manjoj mjeri poremećuju strukturu tla što dovodi u pitanje pouzdanost parametra tla određenih u laboratoriju. Neki od tih parametra su više, a neki manje osjetljivi na poremećenje. Intenzitet poremećenja ne ovisi samo o postupku vađenja, već i o vrsti tla. Najosjetljiviji parametri na poremećenje su krutost i čvrstoća tla, najosjetljivija tlo na poremećenje su pijesak, iz kojeg je vrlo teško izvaditi neporemećeni uzorak, a pogotovo gotovo nemoguće ugraditi ga neporemećenog u odgovarajući laboratorijski uređaj, zatim šljunak iz kojeg je nemoguće dostupnim tehnologijama vaditi neporemećen uzorak, te meke gline za koje su potrebni posebni postupci vađenja neporemećanih uzoraka (na primjer tankostijenim uzorkivačem s nepomičnim klipom i vrlo oštrim kutom noža).

Eurokod 7 definira pet kategorija kvalitete uzorka za laboratorijsko ispitivanje pojedinih parametara tla. Krutost i čvrstoću moguće je ispitivati samo iz uzoraka najbolje klase kvalitete koja karakterizira neporemećeni uzorak. Neka druga svojstva, koja su manje osjetljiva na poremećenja, mogu se određivati i iz uzorka niže klase kvalitete. Pojedine klase kvalitete mogu postići samo određeni postupci uzorkovanja iz bušotine. Posebna europska

norma klasificira tri klase uzorkovanja, A, B i C. Vezu između klasa uzorkovanja, klasa uzoraka i parametra koji se iz njih mogu odrediti pouzdano prikazuje Tablica 2-9.

Mogućnost laboratorijskog određivanja osnovnih (klasifikacijskih) parametra tla u odnosu na vrstu tla i stupanj poremećenja uzoraka prikazuje Tablica 2-10. Kao što je već naglašeno, reprezentativne parametre krutosti i čvrstoće iz odgovarajućih laboratorijskih pokusa moguće je odrediti samo iz neporemećenih uzoraka klase 1, dok je vodopropusnost moguće određivati i iz malo poremećenih uzoraka (klasa 2).

Laboratorijske pokuse koji služe za određivanje krutosti, čvrstoće, konsolidacijskog svojstva, gustoće i vodopropusnosti za pojedine vrste tla prikazuje Tablica 2-11. Tablica 2-12 prikazuje listu parametara tla koji se mogu odrediti iz laboratorijskih pokusa, a koje svakako treba navesti u izvještaju o geotehničkim istražnim radovima za one pokuse koji su tim istražnim radovima izvedeni.

Stupanj primjenjivosti terenskih istražnih radova za odabir pojedinih parametara tla prikazuje Tablica 2-13. Tablica 2-14 prikazuje listu parametara tla koji se mogu odrediti iz terenskih pokusa, a koje svakako treba navesti u izvještaju o geotehničkim istražnim radovima za one pokuse koji su tim istražnim radovima izvedeni.

Tablica 2-9 Potrebne klase kvalitete uzoraka za laboratorijsko ispitivanje tla i odgovarajuće klase uzorkovanja (prema EN 1997-2: 2006)

Svojstvo tla/klasa kvalitete	1	2	3	4	5
Nepromijenjeno svojstvo					
veličina čestica	*	*	*	*	
vlažnost	*	*	*		
gustoća, indeks gustoće, vodopropusnost	*	*			
krutost, čvrstoća	*				
In situ svojstva koja se mogu utvrditi					
redosljed slojeva	*	*	*	*	*
granice slojeva – grubo	*	*	*	*	
granice slojeva – fino	*	*			
granice konzistencije, gustoća čestica, sadržaj organske tvari	*	*	*	*	
vlažnost	*	*	*		
gustoća, indeks gustoće, koeficijent pora, vodopropusnost	*	*			
krutost, čvrstoća	*				
Kategorija uzorkovanja prema EN ISO 22475-1 (primjeri za tlo: A tankostijeni uzorkivač, B – sržna cijev ili SPT, C – bušenje ispiranjem)	A				
	B			C	

Tablica 2-10 Klasifikacijski parametri prema vrstama tla i potrebna kvaliteta uzorka za određivanje reprezentativnih vrijednosti

parametar	vrsta tla							
	glinovita			prašinarsa			pjeskovita, šljunkovita	
	kvaliteta uzorka			kvaliteta uzorka			kvaliteta uzorka	
	neporemećen	poremećen	pregnjen	neporemećen	poremećen	pregnjen	poremećen	pregnjen
geološki opis i klasifikacija	X	X	X	X	X	X	X	X
vlažnost	X	(X)	(X)	X	(X)	(X)	(X)	(X)
gustoća	X	(X)	-	X	(X)	-	-	-
najmanja i najveća gustoća	-	-	-	(X)	(X)	(X)	X	X
granice konzistencije	X	X	X	X	X	X	-	-
granulometrija	X	X	X	X	X	X	X	X
nedrenirana čvrstoća	X	-	-	(X)	-	-	-	-
vodopropusnost	X	-	-	X	(X)	(X)	(X)	(X)
osjetljivost	X	-	-	-	-	-	-	-

X moguće odrediti reprezentativnu vrijednost
(X) moguće odrediti, ali vrijednost ne mora biti reprezentativna
- nije primjenjivo
Napomena: za neke vrste tla i drugi klasifikacijski parametri se određuju (na primjer sadržaj organske tvari, gustoća čvrstih čestica, aktivnost)

Tablica 2-11 Laboratorijski pokusi za određivanje geotehničkih parametara

geotehnički parametar	vrsta tla					
	šljunak	pijesak	prašina	normalno konsolidirana glina	pre-konsolidirana glina	treset i organska glina
edometarski modul (E_{oad}) i indeks stišljivosti (C_c)	(OED) (TX)	(OED) (TX)	OED (TX)	OED (TX)	OED (TX)	OED (TX)
Youngov modul (E) i modul posmika (G)	TX	TX	TX	TX	TX	TX
efektivni parametri čvrstoće (c' , φ')	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB	TX SB
rezidualni parametri čvrstoće (c'_R , φ'_R)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)	RS (SB)
nedrenirana čvrstoća (c_u)	-	-	TX DSS SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT	TX DSS (SB) SIT
gustoća (ρ)	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD	BDD
koeficijent konsolidacije (c_v)	-	-	OED TX	OED TX	OED TX	OED TX
vodopropusnost (k)	TXCH PSA	TXCH PSA	PTC TXCH (PTF)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)	TXCH (PTF) (OED)
<p>- nije primjenjivo () samo djelomično primjenjivo Kratice laboratorijskih pokusa BDD određivanje gustoće DSS direktno jednostavno smicanje OED edometarski pokus PTF pokus vodopropusnosti s padajućim potencijalom PTC pokus vodopropusnosti sa stalnim padom potencijala RS rotacijsko (kružno) smicanje SB direktno smicanje SIT pokus s padajućim stošcem (obično samo u preliminarnoj fazi) PSA iz granulometričkog dijagrama TX troosni pokus TXCH pokus s konstantnim padom potencijala u troosnoj ćeliji</p>						

Tablica 2-12 Lista parametara tla iz rezultata laboratorijskih pokusa koje treba prikazati u izvještaju o geotehničkim istražnim radovima (za pokuse koji su izvedeni); prema EN 1997-2:2006

Laboratorijski pokus	Rezultati prema standardima pokusa
vlažnost	w
gustoća	ρ
gustoća čvrstih čestica	ρ_s
granulometrija	granulometrički dijagram
granice konzistencije	granice plastičnosti i tečenja w_p, w_L
indeks gustoće	e_{\max}, e_{\min} , indeks gustoće $I_D = (e_{\max} - e) / (e_{\max} - e_{\min})$
sadržaj organske tvari	C_{OM}
sadržaj karbonata	C_{CaCO_3}
sadržaj sulfata	C_{SO_4} ili C_{SO_3}
sadržaj klorida	C_{Cl}
pH	pH vrijednost
edometerski pokus	krivulje: edometerska, konsolidacijske, puzanje, E_{oed} (interval naprezanja), pritisak prekonsolidacije σ'_p , indeks puzanja C_α , ili indeksi stišljivosti C_c , rasterećenja C_s . puzanja C_α, σ'_p
laboratorijska krilna sonda	indeks čvrstoće (nedreniran čvrstoća) c_u
pokus padajućeg šiljka	indeks čvrstoće (nedreniran čvrstoća) c_u
jednoosna čvrstoća	$q_u = 2c_u$
nekonsolidirana nedrenirana kompresija	nedrenirana čvrstoća c_u
konsolidirani troosni pokus	odnosi naprezanja i deformacija te pornog tlaka i deformacija, tragovi naprezanja, Mohrovi krugovi, parametri čvrstoće c', φ' ili c_u , ovisnost c_u o pritisku konsolidacije σ'_c , Youngov modul efektivni E' ili nedrenirani E_u
konsolidirano direktno smicanje	odnos naprezanja i pomaka, $\tau_f - \sigma'_c$ dijagram, c', φ' , rezidualni parametri čvrstoće
kalifornijski kvocijent nosivosti (CBR)	CBR indeks I_{CBR}
vodopropusnost	koeficijent vodopropusnosti k iz mjerene vodopropusnosti ili edometerskog pokusa

Tablica 2-13 Primjenjivost terenskih istražnih radova prema EN 1997-2:2006

Metode terenskih istraživanja	Kategorije uzorkovanja			Terenski pokusi										Mjerenje podzemne vode					
	tlo			stijena			CPT ! CPTU	Preslometar	RDT	SDT	SPT	DPL/DPM	DPH/DPSH	WST	FVT	DMT	PLT	Otvoreni sustav	Zatvoreni sustav
	A	B	C	A	B	C													
Parametar tla																			
Osnovne informacije																			
Vrsta tla	C1 F1	C1 F1	C2 F2	-	-	-	C2 F2	C3 F3	-	C3 F3	C2 F1	C3 F3	C3 F3	-	-	C2 F2	-	-	-
Vrsta stijene	-	-	-	R1	R1	R2	R3	R3	R2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Raspored slojeva	C1 F1	C1 F1	C3 F3	R1	R1	R2	C1 F1	C3 F3	R3	C3 F3	C2 F2	C1 F2	C1 F2	F2	-	C2 F1	-	-	-
Razina podzemne vode	-	-	-	-	-	-	C2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Pritisak podzemne vode	-	-	-	-	-	-	C2 F2	F3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Geotehnički parametar																			
Veličina zrna	C1 F1	C1 F1	-	R1	R1	R2	-	-	-	-	C2 F1	-	-	-	-	-	-	-	-
Vlažnost	C1 F1	C2 F1	-	-	-	-	-	-	-	-	C2 F2	-	-	-	-	-	-	-	-
Atterbergove granice	F1	F1	-	-	-	-	-	-	-	-	F2	-	-	-	-	-	-	-	-
Gustoća	C2 F1	C3 F3	-	R1	R1	-	C2 F2	-	-	-	C2 F2	C2	-	-	C2 F2	-	-	-	-
Posmična čvrstoća	C2 F1	-	-	R1	-	-	C2 F1	C1 F1	-	-	C2 F3	C2 F3	C2 F3	C2 F1	C2 F1	C1 F1	R2	-	-
Krutost	C2 F1	-	-	R1	-	-	C1 F2	C1 F1	R1	F1	C2 F2	C2 F2	C2 F2	C2	C2 F1	C1 F1	-	-	-
Vodopropusnost	C2 F1	-	-	R1	-	-	C3 F2	F3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Kemijski pokusi	C1 F2	C1 F1	-	R1	R1	-	-	-	-	-	C2 F2	-	-	-	-	-	-	-	-

Legenda

CPT statička penetracija
 DPL dinamička penetracija lagana
 DPSH dinamički penetracija superteška
 RDT dilatometar za stijenu
 WST statička penetracija s utegom
 Otvoreni sustav: piezometar koji mjeri pritisak težinom stupca vode; Zatvoreni sustav: piezometar koji mjeri tlak vode neposredno (mali dotok vode)
 Primjenjivost: C-kрупnozrno tlo; F-sitnozrno tlo; R-stijena; 1-jaka; 2-srednja; 3-slabla primjenjivost
 Kategorije uzorkovanja za tlo (prema EN ISO 22475-1): A-tankostijeni uzorkivač; B-uzorak iz sržne cijevi ili SPT-a; C-uzorak iz bušenja ispitiranjem

CPTU statička penetracija s mjerenjem pornog tlaka
 DPM dinamička penetracija srednja
 FVT terenska krilna sonda
 SDT dilatometar za tlo

DMT plosnati dilatometar
 DPH dinamička penetracija teška
 PLT probna ploča (u bušotini)
 SPT standardni penetracijski pokus

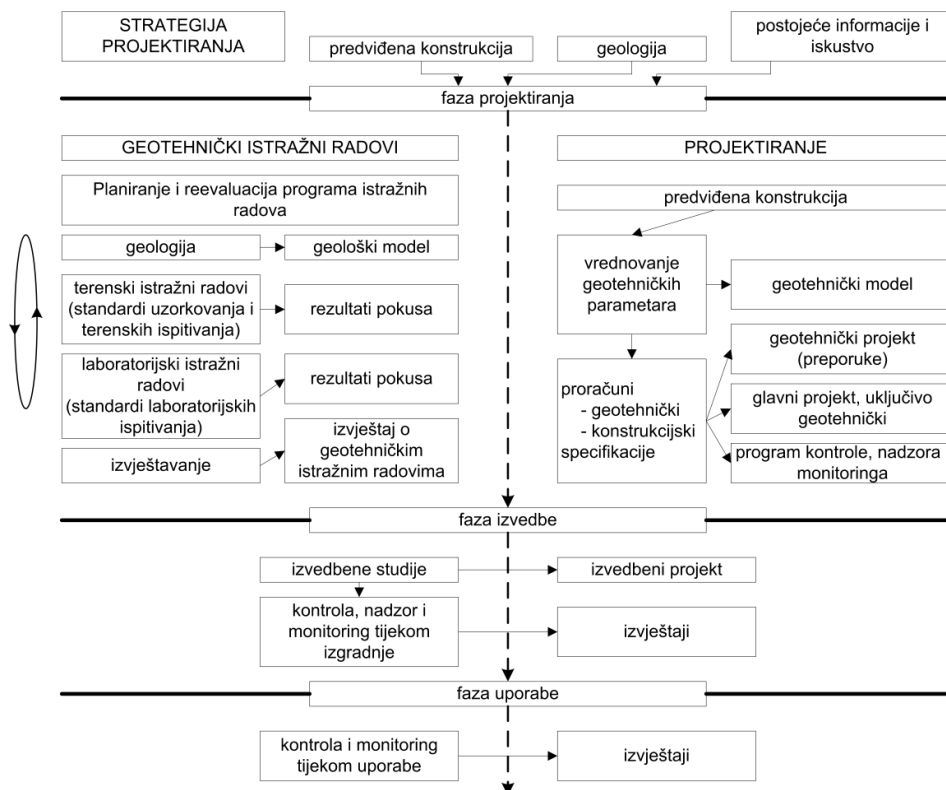
Tablica 2-14 Lista parametara tla iz rezultata terenskih pokusa koje treba prikazati u izvještaju o geotehničkim istražnim radovima (za pokuse koji su izvedeni); prema EN 1997-2:2006

Terenski pokus (s kraticom)	Rezultati prema standardima pokusa
CPT: statički penetracijski pokus	- otpor šiljka q_c - lokalni otpor bočnog trenja f_s - kvocijent trenja $R_f = f_s / q_c$
CPTU: statički penetracijski pokus s mjerenjem pornog tlaka	- ispravljeni otpor šiljka $q_t = q_c - (1 - a)u_2$
DP: dinamička penetracija (DPL lagana, DPM srednja, DPH teška, DPSH superteška)	- broj udaraca N_{10} za DPL, DPM, DPH - broj udaraca N_{10} ili N_{20} za DPSH
SPT: standardni penetracijski pokus	- broj udaraca N - korekcija energije E_r - opis tla
MPM: Menardov presiometar	- presiometarski modul E_M - pritisak puzanja p_f - granični pritisak p_{LM} - krivulja ekspanzije
FDT: savitljivi presiometar	- dilatometarski modul E_{FDT} - krivulja deformacije
svaki drugi presiometar	- krivulja ekspanzije
FVT: krilna sonda (terenska)	- nedrenirana čvrstoća (nekorigirana) c_{fv} - pregnječena nedrenirana čvrstoća c_{rv} - krivulja torzijski moment/rotacija
WST: sondiranje utegom	- kontinuirani zapis otpora sondiranju - otpor sondiranju je: - ili dubina prodiranja standardne težine - ili broj poluokretaja potrebnih za svakih 0.2 m prodiranja pri standardnoj težini od 1 kN
PLT: probna ploča (u bušotini)	- granični kontaktni pritisak p_u
DMT: plosnati dilatometar (Marchetti)	- korigirani pritisak odvajanja p_0 - korigirani pritisak ekspanzije p_1 pri 1.1 mm - dilatometarski modul E_{DMT} , materijalni indeks I_{DMT} i indeks vodoravnog pritiska K_{DMT}

Planiranje i faze istražnih radova

Planiranje geotehničkih istražnih radova često je složen postupak jer njihov sadržaj i opseg ovise o karakteristikama temeljnog tla, o kojima se unaprijed u pravilu malo zna, ali i o karakteristikama same geotehničke konstrukcije, načinima njene izvedbe i rizicima koje ona uključuje, što sve opet ovisi o karakteristikama temeljnog tla. Iz razloga ove međuovisnosti geotehnički se istražni radovi često provode u fazama i iterativno dok svi potrebni podaci ne budu dostupni, a konstrukcija, njena izvedba i uključeni rizici budu poznati. Složenost međuovisnosti istražnih radova, temeljnog tla i konstrukcije prikazuje Slika 2-5.

Cilj geotehničkih istražnih radova je da prikupi podatke o temeljnom tlu, podzemnoj vodi i drugim relevantnim podacima o lokaciji potrebnim za projektiranje, izgradnju i korištenje otporne, stabilne, uporabive i trajne



Slika 2-5 Faze ispitivanja temeljnog tla pri geotehničkom projektiranju, izvođenju i korištenju konstrukcije (prerađeno prema EN 1997-2:2006)

konstrukcije. Ti podaci se mogu prikupljati postupno, ali tako da pravodobno budu dostupni oni relevantni za pojedinu fazu projektiranja ili gradnje.

Uvažavajući ove okolnosti, Eurokod 7 predviđa općenito tri faze geotehničkih istražnih radova:

- *preliminarna faza* u kojoj se utvrđuju parametri tla bitni za određivanje opće stabilnosti lokacije, procjenu pogodnosti lokacije za buduću gradnju, smještaj građevine u prostoru, procjenu utjecaja gradnje na susjedne građevine, utvrđivanje pozajmišta za ugradnju zemljanog materijala, procjenu načina temeljenja, ta za ispravno planiranje istražnih radova za fazu glavnog projekta; u ovoj fazi je potrebno utvrditi koje vrste tla i stijena se nalaze u zoni od utjecaja za buduću gradnju, procjenu razinu podzemne vode i profila pornih tlakova, procjenu profila čvrstoća i krutosti tla i stijena, te moguću pojavu zagađenog tla i vode od utjecaja na buduću gradnju; ova se faza može izostaviti ako postoji dovoljno prikupljenih podataka iz ispitivanja susjednih lokacija ili nekih ranijih ispitivanja;
- *projektna faza* (faza za glavni projekt) u kojoj treba prikupiti sve potrebne podatke o tlu i podzemnoj vodi za konačno projektiranje građevine i za dokazivanje zadovoljenja bitnih zahtjeva na građevinu; ovu fazu treba planirati u skladu s preporukama na koje upućuje Tablica 2-13; program ove faze istraživanja treba sadržavati plan s lokacijama i vrstama ispitivanja tla, dubine ispitivanja, vrste i kategorije kvalitete uzoraka tla (Tablica 2-9) s naznakom položaja, broja i dubine, program ispitivanja razine i tlakova podzemne vode, vrsta opreme kao i standarde postupaka laboratorijskih i terenskih ispitivanja koje treba koristiti; planiranje ove faze ispitivanja treba uskladiti s podacima koji su dobiveni u preliminarnoj fazi kao i podacima o vrsti i dimenzijama građevine koja se planira izgraditi; za identifikaciju i klasifikaciju tla barem jedna bušotina ili istražna jama mora biti izvedena; broj uzoraka za laboratorijsko ispitivanje indeksnih pokazatelja treba biti dovoljan da se mogu utvrditi parametri za svaki relevantni sloj ili zonu tla; vrstu pokusa na laboratorijskim uzorcima za određivanje parametara geotehničkih proračuna treba odrediti uvažavajući preporuke koje daje Tablica 2-11;
- *kontrolna faza i monitoring* je faza geotehničkih ispitivanja, opažanja i mjerenja koja se provodi tijekom izgradnje, a ako je potrebno, i tijekom uporabe građevine; ona uključuje najmanje provjeru da tlo i razina podzemne vode, na koje se nailazi iskopom, odgovara podacima iz glavnog projekta, a može sadržavati i mnoga druga

mjerenja i opažanja, posebno ponašanje i pomake susjednih građevina tijekom izgradnje; rezultate ispitivanja, opažanja i mjerenja u ovoj fazi također treba bilježiti i interpretirati te temeljem njih donositi odgovarajuće odluke o nastavku ili promjenama u gradnji.

Tablica 2-15 prikazuje primjer izbora terenskih ispitivanja prema vrsti tla i fazi građenja.

Opseg istražnih radova

Obzirom na vrlo različite situacije koje se mogu pojaviti u praksi vrlo je teško ili nemoguće jednoznačno propisati količinu i opseg geotehničkih istražnih radova. No Eurokod 7 daje ipak neke okvirne preporuke opsega istražnih radova za neke standardne slučajeve. Ovdje se ukratko navode ti slučajevi. Od njih se može odstupiti ako okolnosti to dozvoljavaju ili nalažu.

RAZMAK BUŠOTINA ILI DRUGIH TERENSKIH ISPITIVANJA

- za visoke i industrijske zgrade mreža ispitnih čvorova razmaka 15 do 40 m;
- za građevine koje pokrivaju široko područje razmak čvorova ne većim od 60 m;
- za linijske građevine (ceste, željezničke pruge, kanali, cjevovodi, nasipi, tuneli, potporni zidovi) razmak ispitnih mjesta od 20 do 200 m;
- za posebne konstrukcije (mostovi, temelji strojeva) dva do šest ispitnih mjesta po temelju;
- za brane i slično razmak od 25 do 75 m duž vertikalne osi.

DUBINA BUŠOTINA ILI DRUGIH TERENSKIH ISPITIVANJA

- za visoke i industrijske zgrade na temeljima samcima ili trakastim temeljima: 6 m ili 3 širine temelja ispod temeljne plohe;
- isto kao gore, ali s temeljnom pločom ili temeljima čiji se utjecaj preklapa s dubinom: 1.5 širine temeljne ploče ili grupe temelja;
- brane: 0.8 do 1.2 visine brane, ali ne manje od 6 m, mjereno od dna brane;

Tablica 2-15 Primjer izbora ispitivanja tla u različitim fazama

Preliminarni istražni radovi	Istražni radovi za glavni projekt	Kontrolni istražni radovi i opažanja
<p>Sitnozno tlo P: CPT, WST, DP B: uzorkovanje (PS, OS, CS, SPT, TP), PMT, GW</p> <p>Početak Pregled topografskih, geoloških i hidrogeoloških karata; interpretacij a aero-foto snimaka; pregled arhiva; pregled lokacije</p>	<p>Piloti P: SR, CPT, WST, DP B: uzorkovanje (PS, OS, CS, SPT), FVT, PMT, GWC O: PIL</p> <p>Preliminarni izbor temelja</p>	<p>Piloti: PIL, pokusna zabijanja pilota, mjerenja valova naprezanja u pilotu, GWC, mjerenje slijeganja, inklinometri</p> <p>Konačni izbor temelja iz glavnog projekta</p>
<p>Krupnozno tlo P: SR, CPT, WST, DP B: uzorkovanje (AS, OS, CS, SPT, TP), PMT, DMT, GW</p>	<p>Piloti P: SR, CPT, WST, DP B: uzorkovanje (PS, OS, CS, SPT, TP), DMT, PMT, GWO O: PIL</p> <p>Preliminarni izbor temelja</p>	<p>Piloti: PIL, pokusna zabijanja pilota, mjerenja valova naprezanja u pilotu, GWC, mjerenje slijeganja, inklinometri</p> <p>Konačni izbor temelja iz glavnog projekta</p>
<p>Stijena pregled lokacije, kartiranje diskontinuiteta, geofizika. Za prekrivenu ili slabu stijenu: DP, CPT, SPT, SR ili CS</p>	<p>Piloti P: SR, CPT, WST, DP B: uzorkovanje (PS, OS, CS, SPT, TP), DMT, PMT, PLT, GWO</p> <p>SR s mjerenjem otpora bušenja, kartiranje pukotina u TP i CS, DMT (za stijenu), GWO</p> <p>Preliminarni izbor temelja</p>	<p>Piloti temelji: provjera vrste tla, provjera krutosti (CPT), mjerenje slijeganja</p> <p>Piloti temelji: provjera vrste tla, provjera krutosti (CPT), mjerenje slijeganja</p> <p>Piloti: provjera sučelja stope i stijene, provjera pukotina u stijeni, vodopropusnost</p> <p>Piloti temelji: provjera karakteristika pukotinskog sustava na površini stijene</p> <p>Konačni izbor temelja iz glavnog projekta</p>
<p>Kratice P terenski pokusi bez bušenja CPT(U) statički penetracijski pokus DP dinamičko sondiranje SR udarno bušenje s grubom procjenom otpora WST sondiranje s utegom B postupci u bušotini ili jami AS vadenje uzorka svrdlanjem</p>	<p>CS uzorkovanje iz sržne cijevi DMT plosnati dilatometar FVT terenska krina sonda GW mjerenje podzemne vode (općenito) GWO mjerenje pornog tlaka otvorenim sustavom GWC mjerene pornog tlaka zatvorenim sustavom OS uzorkovanje iz otvorenog uzorkivača (tankstijeni ili debelostijeni)</p>	<p>PLT probna ploča u bušotini PMT presiometar PS uzorkivač s nepomičnim klipom SPT standardni penetrac. pokus (s uzorkovanjem) TP istražna jama O ostalo PIL probno opterećenje pilota Napomena: geodetsko snimanje, kartiranje bušotina i laboratorijska ispitivanja nisu prikazana</p>

- usjeci: 0.4 veće visine usjeka, ali ne manje od 2 m, mjereno od njegova dna;
- ceste i aerodromi niskih nasipa: 2 m ispod dna tretiranog (poboljšanog) ili originalnog tla;
- rovovi: 1.5 širine rova, ali od 2 m, mjereno od dna rova;
- iskopi s razinom piezometarske površine ispod dna iskopa: 0.4 dubine iskopa mjereno od dna iskopa ili 2 m ispod dna potporne konstrukcije, što je dublje;
- iskopi s piezometarskom površinom iznad dna iskopa: $(H + 2 \text{ m})$ ili dva metra ispod dna potporne konstrukcije, gdje je H visina piezometarske plohe iznad dna iskopa, sve mjereno ispod dna iskopa;
- iskopi u tlima u kojima do veće dubine nema slabije propusnog sloja, dubina istraživanja treba dosezati barem 5 m ispod dna potporne konstrukcije;
- za pilote: dublje od širine grupe pilota, više od 5 m, ili više od tri širine stope pilota, sve mjereno ispod stope pilota.

2.7. Norme i reference

Norme

- EN ISO 22475-1 *Geotechnical investigation and testing-Sampling by drilling and excavation and groundwater measurements-Part 1: Technical principles of execution.*
- EN ISO 22476-1 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 1: Electrical CPT and CPTU*
- EN ISO 22476-2 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 2: Dynamic probing.*
- EN ISO 22476-3 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 3: Standard penetration test.*
- EN ISO 22476-4 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 4: Ménard pressure meter test.*
- EN ISO 22476-5 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 5: Flexible dilatometer test.*
- EN ISO 22476-6 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part-Part 6: Self boring pressure meter test.*
- EN ISO 22476-8 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 8: Full displacement pressure meter test.*

- EN ISO 22476-9 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 9: Field vane test.*
- EN ISO 22476-12 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 12: Mechanical CPT.*
- EN ISO 22476-13 *Geotechnical investigation and testing-Field testing-Part 13: Plate loading test.*

Reference

- BSI 2004. BS EN 1997-1:2004; Eurocode 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, Eurocode 8: 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, Eurocode 7: Geotechnical design – General rules.* Thomas Telford, London.
- Gulvanessian, H., Calgaro, J.-A., Holicky, M. 2002. *Designers' Guide to EN 1990, Eurocode: 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 Eurocode 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 EC7-1 for geotechnical verifications used in Germany. (privatna komunikacija).