

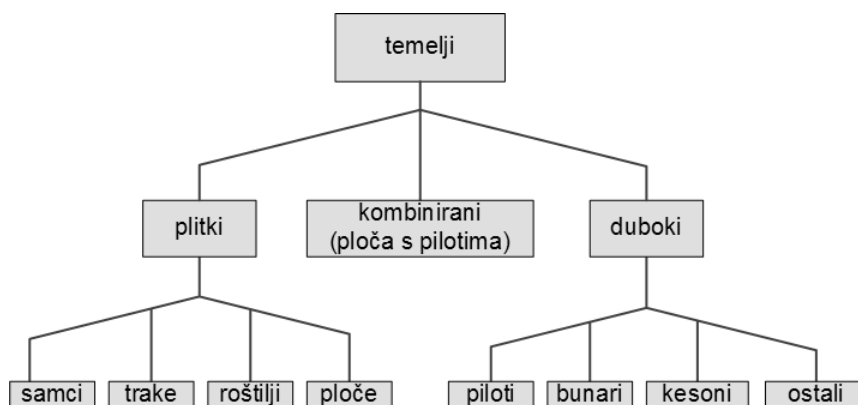
# ***4. Plitki temelji***

## ***4.1. Svrha, klasifikacija i kriteriji prihvatljivosti plitkih temelja***

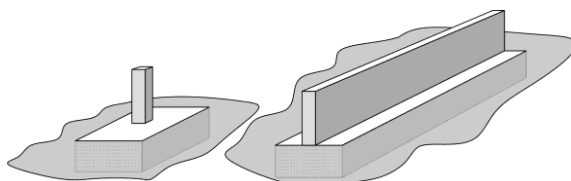
### **Svrha i klasifikacija temelja**

Temelji su dijelovi konstrukcije preko kojih se ona oslanja o tlo. Preko njih se djelovanja na konstrukciju prenose na tlo. Kako je tlo u pravilu bitno mekši i slabiji materijal od uobičajenih materijala iz kojih je izgrađena konstrukcija, temelji su prijelazni dijelovi u kojima se preraspodjeljuju unutrašnje sile iz vitkih i tankih elemenata konstrukcije u masivne i široke zone tla.

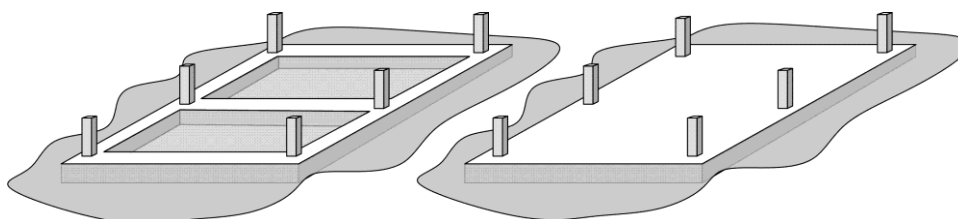
Vrste temelja su mnogobrojne i mogu se razvrstati na različite načine od kojih je uobičajen onaj po načinu prijenosa opterećenja u tlo: plitki i duboki te njihova kombinacija. Plitki temelji prenose opterećenja u plitke slojeve tla, dok duboki prenose opterećenje ili u dublje slojeve ili u sve slojeve duž njihove visine. Granica između plitkih i dubokih temelja nije strogo određena, ali se kao gruba podjela može prihvatiti ona po kojoj su odnos dubine na kojoj temelj prenosi opterećenje na tlo i širine temelja manji od 4 do 5. Plitki se, pak, temelji dalje dijele na samce, temeljne trake, temeljne roštilje, temeljne ploče te kombinaciju ploče i roštilja. Duboki se temelji dijele na pilote, bunare, kesone te neke druge manje zastupljene vrste (vidi sliku 4-1 ).



**Slika 4-1** Jedna od klasifikacija temelja



**Slika 4-2** Temelj samac (lijevo) i temeljna traka (desno)



**Slika 4-3** Temeljni roštilj (lijevo) i temeljna ploča (desno)

*Temelji samci* su manji masivni kvadri ili slična tijela ili manje ploče čiji je odnos širine i debljine takav da im je progib od savijanja zanemariv u odnosu na slijeganje<sup>1</sup> (Slika 4-2). Zbog toga se u proračunima pretpostavlja da su kruti. Prenose opterećenja pojedinačnih stupova konstrukcije. Često se koriste kao temelji stupova tvorničkih i drugih hala, strojeva i stupova mostova kad to nosivost i krutost temeljnog tla omogućuje. Nekad su se gradili od kamena i opeke, a danas od nearmiranog i armiranog betona. Najjeftiniji su način temeljenja.

<sup>1</sup> Slijeganje je vertikalni pomak temelja koji nastaje od njegovog opterećenja; o slijeganju će kasnije biti više riječi.

*Temeljne trake* su izduženi plitki temelji, obično ispod zidova zgrada i sličnih primjera (Slika 4-2). Obzirom na krutost u ravnini zidova, progib tih temelja u odnosu na njihovo slijeganje je zanemariv kao i kod samaca pa se također svrstavaju u krute temelje. Grade se na sličan način i iz istog materijala kao temelji samci. Uz temelje samce najjeftiniji su način temeljenja.

*Temeljni roštilji* su mreža temeljnih traka, ali uglavnom prenose opterećenja stupova pa savijanje traka više nije ograničeno zidovima (Slika 4-3). Zato obično njihov progib u odnosu na slijeganje više nije zanemariv pa se svrstavaju u savitljive temeljne konstrukcije. Izvode se u pravilu od armiranog betona. Koriste se u slučajevima kad nosivost i krutost temeljnog tla u odnosu na opterećenje konstrukcije ne omogućuje izbor temelja samaca i od njih su zbog povećanog utroška materijala skuplji.

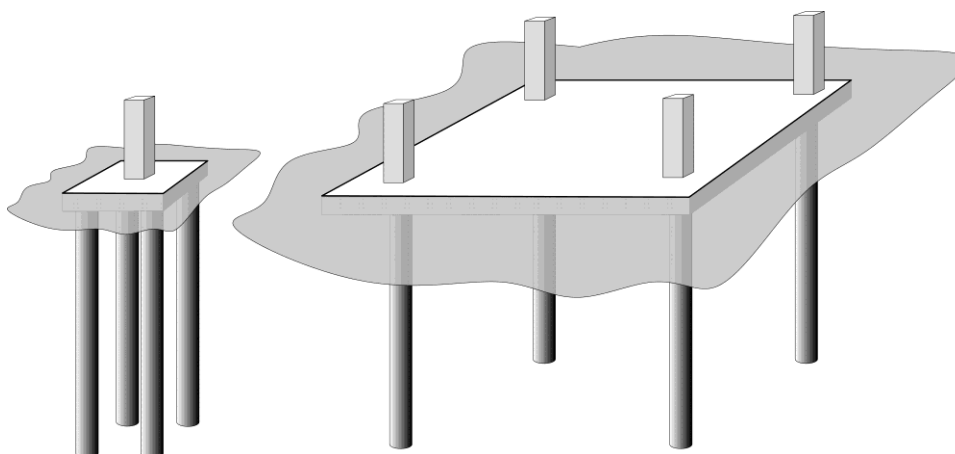
*Temeljne ploče* su plošne temeljne konstrukcije kojima progib u odnosu na slijeganje nije zanemariv pa se svrstavaju u savitljive temeljne konstrukcije. Grade se u pravilu od armiranog betona. Prenose opterećenja stupova i zidova konstrukcije, a koriste se kad nosivost i krutost tla ne omogućuju izbor temeljnog roštilja, a zbog povećanog utroška materijala od njih su skuplji (Slika 4-3).

*Kombinacija temeljne ploče i roštilja* koristi se u slučajevima većih opterećenja stupova kad bi zbog lokanih koncentracija unutarnjih sila u ploči oko stupa potrebna debljina ploče postala nerazumno debela. Grade se od armiranog betona. Sam se roštilj može izvesti ili na gornjoj ili na donjoj plohi ploče. Izbor u pojedinom slučaju je ovisan o tehnološkim zahtjevima korištenja konstrukcije (greda roštilja smeta komunikaciji i transportu u prostoru komu je ploča podni element) te zahtjeva pri izradi i kvaliteti hidroizolacije (zaštite konstrukcije od podzemne vode; roštilj s donje strane ploče smeta komotnoj izradi hidroizolacije kad ona mora biti s donje strane temelja zbog pritiska podzemne vode).

*Piloti* su štapni elementi koji se ugrađuju u tlo bušenjem, zabijanjem ili utiskivanjem, a prenose opterećenje gornje konstrukcije trenjem po svom plaštu i preko donjeg kraja<sup>2</sup> ili stope (Slika 4-4). Grade se od različitih materijala: nekad od drveta, a danas u pravilu od čelika, armiranog ili prednapetog betona. Obično se rade u grupi te spajaju s naglavnom pločom (ili gredom ako su tlocrtno poredani u pravcu) na mjestu priključenja stupa gornje konstrukcije. Koriste se kad temeljenje nije moguće izvesti plitko jer su znatno skuplji od plitkog temelja.

---

<sup>2</sup> Gornji kraj pilota se ponekad naziva glavom pilota.



**Slika 4-4** Grupa pilota s naglavnom pločom (lijevo) i temeljna ploča s pilotima (desno)

*Kombinirani temelj od ploče s pilotima* koriste se kod jako opterećenih temelja, kao što su na primjer neboderi, na tlu nedovoljne nosivosti (Slika 4-4). Mada naoko slični temeljima na pilotima, po mehanizmu prijenosa opterećenja u tlo od njih se bitno razlikuju. Dok temelji na pilotima prenose opterećenje u tlo prvenstveno preko pilota pa se utjecaj naglavne ploče na njihovu nosivost i slijevanje obično zanemaruje, kombinirani temelji prenose opterećenje u tlo podjednako preko ploče i preko pilota. Dok se temelji na pilotima trebaju dimenzionirati tako da njihovo opterećenje bude znatno manje od njihove nosivosti, kod kombiniranih temelja, kod kojih ukupna nosivost obično nije upitna, piloti se mogu iskoristiti do krajnosti što znači da se mogu opteretiti i do sloma.

*Bunari* su velike, složene i zahtjevne temeljne konstrukcije oblika sanduka otvorenog s gornje i s donje strane ili oblika šupljeg valjka koje služe za prijenos vrlo velikih opterećenja stupova velikih mostova u dublje i bolje nosive slojeve tla ili na temeljnu stijenu. Sanduk bunara obično se izvodi od armiranog ili prednapetog betona, ponekad u čeličnoj oplati. Izvode se iskapanjem tla u otvorenom iz njihove unutrašnjosti uz istovremenu dogradnju konstrukcije na površini čime se oni istovremeno grade i spuštaju u dubinu. Da bi se ostvarilo njihovo spuštanje u tlu, težina im mora biti veća od trenja sanduka s okolnim tlom.

*Kesoni* su slični bunarima, ali su s gornje strane zatvoreni kako bi se u njihovoj unutrašnjosti tijekom izgradnje i iskopa tla mogao nametnuti povećani tlak zraka radi sprečavanja prodora tla i vode kroz donji otvoreni dio sanduka. Zbog zatvorenosti sanduka kesona s gornje strane potrebno je predvidjeti posebne prelazne komore kroz koje mogu komunicirati ljudi i oprema te kroz koje se može iznositi iskopano tlo. To su vrlo zahtjevne

konstrukcije koje nameću izuzetno otežane uvjete rada pri iskopu (kesonska bolest) pa se izbjegavaju gdje god to moguće.

Osim opisanih vrsta temelja, geotehnička praksa poznaje niz drugih, posebnih i rjeđe korištenih temeljnih konstrukcija koje zadovoljavaju neke posebne uvjete nametnute okolnostima gornje konstrukcije i uvjetima u tlu. Jedan primjer takve konstrukcije je duboki temelj na vertikalnim zidovima izvedenim u tlu koja se koristi kad je potrebna izuzetna nosivost temelja na vodoravna opterećenja, na primjer zbog bočnog pritiska kliznog tijela u klizištu na duboki temelj stupa mosta. Poznati su i mnogi drugi, više ili manje egzotični oblici temelja koji su nastali kao rješenje problema izazvanim posebnim okolnostima u tlu ili okolnostima nametnutim gornjom konstrukcijom.

## **Opterećenja temelja i interakcija konstrukcija-temelj-tlo**

Opterećenja temelja uglavnom nastaju djelovanjem konstrukcije koju pridržavaju. Ta opterećenja se preko temelja prenose u tlo koje se zbog toga deformira, što pak izaziva pomake, rotacije i deformacije temelja. Zbog zajedničkog među-djelovanja konstrukcije, temelja i tla, u većini slučajeva opterećenje temelja ovisi kako o krutosti konstrukcije, tako i o krutosti temelja i krutosti tla. Drugim riječima, konstrukcija, temelj i tlo čine jedan jedinstveni sustav koji zahtijeva zajedničke pomake, rotacije, deformacije i kontaktna naprezanja na njihovim međusobnim sučeljima. To među-djelovanje konstrukcije, temelja i tla naziva se i interakcijom.

Proračunski modeli i proračuni potpune interakcije konstrukcije temelja i tla pri raznim slučajevima i kombinacijama opterećenja koja se javljaju tijekom gradnje i koja se mogu pojaviti za vrijeme korištenja konstrukcije, kako za provjeru graničnih stanja nosivosti tako i za provjeru graničnih stanja uporabivosti, očito se vrlo složen, zahtjevan i obiman problem koji se u praksi vrlo rijetko provodi u svojoj potpunosti. Vrlo su česte različita pojednostavljenja kako proračunskih modela tako i samih proračuna kako bi se problem pojednostavio i učinio praktički provedivim. Općenito se prepušta projektantu da se odluči na izbor prihvatljivih pretpostavki pojednostavljenja koje vode k jednostavnijim proračunskim modelima i jednostavnijim proračunima. Nemoguće je općenito klasificirati te pretpostavke niti je moguće dati općenite preporuke koje bi obuhvatile sve slučajeve u praksi. Zato će se ovdje zadržati samo na nekim tipičnim primjerima.

U slučaju temelja zgrada, mostova i potpornih zidova na krućem tlu, kad se očekuju manja slijeganja pa se koriste temelji samci ili temeljne trake ispod krutih zidova, ili piloti ispod takvih temelja, opterećenja temelja se obično određuju u proračunu konstrukcije uz pretpostavku da su temelji nepomični. Tako proračunate sile koje opterećuju temelje unose se u proračun stabilnosti i uporabivosti temelja kao zadane i o pomacima i deformacijama temelja neovisne veličine. Proračunom stabilnosti i uporabivosti temelja s tako izračunatim opterećenjem dokazuje se da je rizik od dosezanja graničnog stanja nosivosti dovoljno mali te da su pomaci temelja za granično stanje uporabivosti u granicama pretpostavljeno malih veličina.

U slučaju da se mora temeljiti na mekšem tlu, na temeljnim roštiljima ili temeljnoj ploči, opet se proračun gornje konstrukcije provodi kao da su temelji nepomični, ali se provodi proračun interakcije temelja i tla (bez sudjelovanja konstrukcije) s prethodno izračunatim i o pomacima temelja neovisnim opterećenjima od konstrukcije. Time je proračun interakcije samo djelomično proveden jer se zanemario utjecaj konstrukcije na opterećenje sustava temelj-tlo.

U izuzetnim slučajevima vrlo osjetljivih ili jako značajnih ili jako opterećenih konstrukcija na slabijem tlu, provodi se proračun potpune interakcije. Takvi su proračuni u praksi izuzetno rijetki.

Opterećenja na temelje mogu biti stalna i nepromjenjiva ili prolazna ili promjenjiva. Ova posljednja se mogu mijenjati relativno brzo ili relativno sporo obzirom na potrebno vrijeme konsolidacije tla pa tako, slično kao u slučaju kosina, razlikujemo dva krajnja stanja: drenirano i nedrenirano. U prvom stanju su deformacije spore u odnosu a brzinu konsolidacije, tako da se tlakovi vode u porama tla ravnaju prema zakonima stacionarnog strujanja ili su hidrostatički, znači neovisni o deformacijama tla. U nedreniranom slučaju, na tlakove od stacionarnog strujanja superponiraju se tlakovi nastali deformacijama tla u nedreniranim uvjetima. Između ova dva krajnja stanja moguća su međustanja u kojima se odvija vremenski proces konsolidacije tla. Ovi složeni, u načelu trodimenzionalni procesi u tlu, pri provjeri stabilnosti i uporabivosti temelja uzimaju se u praksi samo približno u obzir. Obično se proračuni provode posebno za nedrenirano, a posebno za drenirano stanje, dok se konsolidacija, posebno njeno trajanje, procjenjuje približno.

## Izbor temelja i kriteriji prihvatljivosti

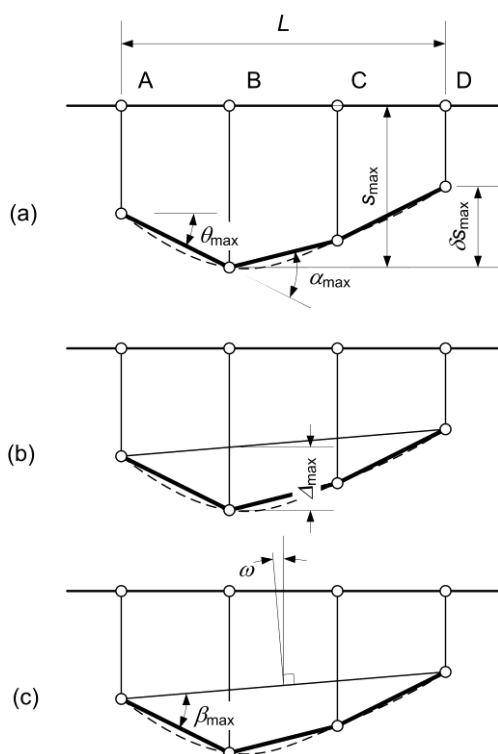
Izbor vrste i dimenzija temelja ovisit će o vrsti i karakteristikama tla na gradilištu, vrsti i veličini opterećenja, kriterijima prihvatljivosti kao što su prvenstveno stabilnost, uporabivost, trajnost i primjerena tehnologija gradnje, te o cijeni i trajanju same gradnje. Izboru se pristupa metodom pokušaja i provjere uključujući sve više detalja kako napreduju faze projektiranja. Sa stanovišta geotehnike najvažniji kriteriji prihvatljivosti su stabilnost, uporabivost i primjerena tehnologija gradnje temelja. U slučaju korištenja eurokodova, provjera stabilnosti i uporabivosti provodi se računski korištenjem proračunskih modela mehanike metodom graničnih stanja uz primjenu parcijalnih koeficijenata prema načelima kako je opisano u Poglavlju 2.

Za granična stanja nosivosti temelja najčešće su kritična stanja GEO i STR. Granična stanja GEO odnose se na pojavu sloma ili velikih deformacija u tlu ili na sučelju tla i temelja, dok se granična stanja STR odnose na pojavu sloma ili velikih deformacija u samom tijelu temelja. U pojedinim slučajevima mogu biti mjerodavna i ostala granična stanja nosivosti<sup>3</sup>. Od graničnih stanja GEO u slučaju temeljnih konstrukcija najvažnije je nosivost temeljnog tla. To je opterećenje koje u tlu izaziva slom, a time i velike i neprihvatljive pomake temelja i općenito gubitak njegove stabilnosti.

Granična stanja uporabivosti temeljnih konstrukcija proizlaze iz posljedica gubitka uporabivosti gornje konstrukcije (konstrukciji koju pridržavaju) koju pomaci, rotacije i deformacije temelja mogu izazvati bez da dosegnu neko od graničnih stanja nosivosti. Eurokod 7 definira slijedeće pojmove vezane za vertikalne pomake temelja (slijeganja), njihove rotacije i deformacije koje treba pri analizi prihvatljivosti temelja uzeti u obzir: slijeganje,  $s$ , diferencijalno slijeganje,  $\delta s$ , rotaciju,  $\theta$ , kutnu deformaciju,  $\alpha$ , relativni progib,  $\Delta$ , kvocijent progiba,  $\Delta/L$ , naginjanje,  $\omega$ , te relativnu rotaciju ili kutnu distorziju,  $\beta$  (Slika 4-5). Za neke od tih veličina Eurokod 7 preporuča granične vrijednosti, koje ne bi trebalo premašiti za neko od graničnih stanja uporabivosti, za uobičajene vrste konstrukcija ako nekim drugim zahtjevima projektanta ili budućeg korisnika gornje konstrukcije nije

---

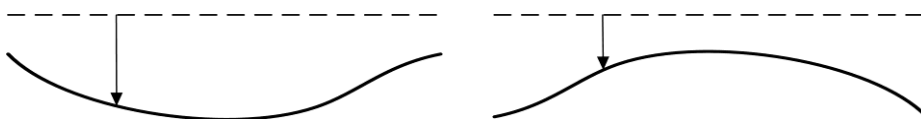
<sup>3</sup> Na primjer, temelj samac na čvrstoj goloj stijeni treba provjeriti na prevrtanje kaokrutog tijela bez sudjelovanja čvrstoće bilo tla bilo materijala temelja (granično stanje nosivosti EQU); ili, šuplji sandučasti temelj može biti izložen uzgonu podzemne vode pa mu prijete da ispliva na površinu (granično stanje nosivosti UPL); ili, temelj u dnu rijeke može biti izložen podlokavanju uslijed strujanja vode i time gubitku nosivosti (granično stanje nosivosti HYD).



**Slika 4-5 Definicije slijeganja  $s$ , diferencijalnih slijeganja  $\delta s$ , rotacija  $\theta$  i kutnih deformacija  $\alpha$  temelja (a), definicije relativnih progiba  $\Delta$  i kvocijenta progiba  $\Delta/L$  (b), te definicije naginjanja  $\omega$  i relativne rotacije ili kutne distorzije  $\beta$  (EN 1997-1:2004).**

posebno drugačije zahtijevano (Tablica 4-1). Treba naglasiti da vrijednosti u ovoj tablici nisu striktno zahtijevane, već služe projektantu za snalaženje i orijentaciju u nedostatku nekih drugih zahtjeva. Vrijednosti se mogu premašiti ako projektant uz odgovarajuću analizu sagleda sve posljedice na konstrukciju, opremu i strojeve, instalacije i njene priključke na zgradu, udobnost i prihvatljivost za ljude te neke druge moguće kriterije te na temelju toga argumentirano zaključiti da je usprkos premašenim vrijednostima konstrukcija ipak uporabiva.

Granične vrijednosti iz tablice 4-1 vrijede za ulegnuti oblik deformacija temelja, dok za pogrbljenje (Slika 4-6) vrijednosti treba preploviti.



**Slika 4-6 Ulegnuti (lijevo) i pogrbljeni (desno) oblik deformacije konstrukcije ili temelja**



**Tablica 4-1 Granične vrijednosti deformacija konstrukcija i pomaka temelja za obične konstrukcije s ujednačenim opterećenjima na temelje (EN 1997-1:2004) – ulegnuti oblik deformacija**

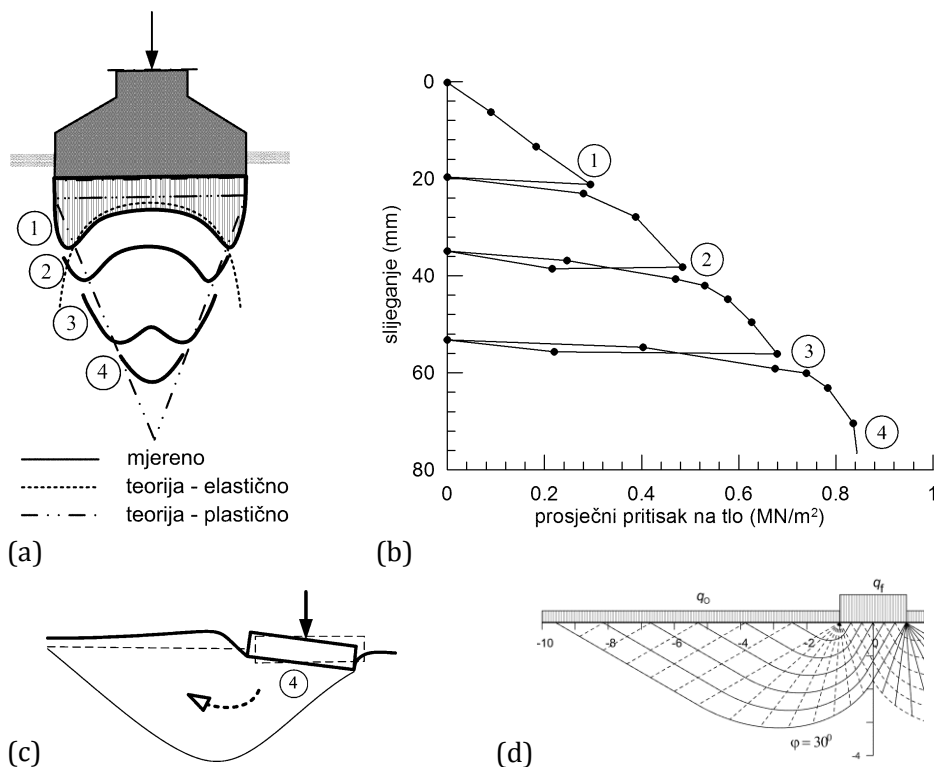
| Opis graničnog pomaka, kuta ili deformacije  | oznaka         | vrijednost  | napomena  |
|--|----------------|---|---|
| najveća dozvoljena relativna rotacija otvorenih okvirnih konstrukcija, ispunjenih okvira i nosivih zidova od opeke | $\beta_{\max}$ | $\frac{1}{2000}$ do $\frac{1}{300}$ ,<br>obično $\frac{1}{500}$ | $\beta = \frac{1}{150}$ izazvat će najvjerojatnije granično stanje nosivosti u gornjoj konstrukciji   |
| prihvatljivo najveće slijeganje  | $s_{\max}$     | 50 mm   | vrijedi za obične konstrukcije na temeljima samcima ili trakama; veća slijeganja su prihvatljiva ako relativne rotacije ostanu u prihvatljivim granicama i ako ukupna slijeganja ne izazivaju probleme s instalacijskim priključcima na zgradu, komunikaciju s okolinom, prevelika naginjanja i slično. |

## 4.2. Analiza i projektiranje plitkih temelja

### Kontaktne pritisci između temelja i tla

Temelji i tlo u koje prenose opterećenje dotiču se preko ploha koje su zajedničke granične plohe oba tijela. Kod plitkog temelja to je vrlo često vodoravna ploha koja se nazivaju još *temeljom plohom* ili *temeljom ravninom* ako su ravne. Sa stanovišta mehanike na njima mora vrijediti kompatibilnost naprezanja i pomaka između dva tijela, temelja i temeljnog tla. Kompatibilnost naprezanja znači da naprezanja na temeljnoj plohi, kojima temelj djeluje na temeljno tlo moraju biti jednaka po veličini, ali suprotnog smjera od onih kojima tlo djeluje na temelj. Kompatibilnost pomaka znači da je pomak svake točke temelja na plohi temeljenja u smjeru okomitom na tu plohu jednak po veličini i po smjeru pomaku nasuprotne točke u tlu osim, možde, u slučajevima kad je došlo do djelomičnog odvajanja temelja i tla.

Naprezanja i pomaci na temeljnoj plohi ovisni su o opterećenju temelja, geometrijskim karakteristikama i krutosti temelja i temeljnog tla te



**Slika 4-7** Probno opterećenje kvadratnog temelja samca na pijesku centričnom vertikalnom silom: (a) mjerena raspodjela normalnih kontaktnih naprezanja na temeljnoj plohi na srednjem presjeku (puna linija) i usporedba s teoretskim rješenjem za elastični poluprostor (crtkano) i za plastični slom (crta-dvotočka) u raznim fazama opterećenja; (b) odnos prosječnog kontaktnog normalnog naprezanja na temeljnoj plohi i slijeganja temelja; (c) skica sloma tla opažena u četvrtom ciklusu opterećenja; (d) slika sloma tla ( $\alpha$  i  $\beta$  karakteristika) ispod plitkog temelja prema teoriji plastičnosti za trakasto opterećenje (Prandtlovo rješenje); prerađeno prema Leussink i dr (1966).

karakteristikama temeljne plohe od kojih je hrapavost obično najvažnija. Kao što je već ranije rečeno, naprezanja u tlu i u temelju rezultat su njihove interakcije, a s građevinskog stanovišta su bitna radi dimenzioniranja temelja kao i provjere njihove stabilnosti i uporabivosti.

Kao poučan primjer razvoja naprezanja na sučelju temelja i temeljnog tla u usporedbi s teoretskim rješenjima poslužit će rezultati jednog eksperimenta u kojem je jedan plitki kvadratni temelj samac bio postavljen na pjeskovito tlo te je opterećivan do sloma tla (Slika 4-7, prema Leussink i dr., 1966). Temelj je bio opskrbljen mjernim uređajima za mjerenje normalnih naprezanja na sučelju s tlom. Opterećenje je teklo u ciklusima

opterećenje-rasterećenje sa sve većom amplitudom opterećenja do pojave velikih deformacija koje se tumače kao slom tla. Na slici 4-7 (a) prikazana je punom linijom raspodjela kontaktnih normalnih naprezanja na temeljnoj plohi za četiri različita opterećenja temelja. Na istoj slici pod (b) je prikazan odnos prosječnog normalnog naprezanja na temeljnoj plohi (sila opterećenja podijeljena s površinom temeljne plohe) i odgovarajućeg slijeganja tijekom pokusa. Na istom su dijagramu zaokruženim brojevima naznačene faze u kojima su izmjerene raspodjele kontaktnih naprezanja prikazana na slici (a). Na slici (c) je prikazana skica sloma tla iza četvrte faze opterećenja. Na slici (d) je za usporedbu prikazano teoretsko Prandtlovo rješenje sloma tla ispod trakastog opterećenja na plastičnom poluprostoru prema teoriji plastičnosti.

Kao što pokazuje slika 4-7 (a), tijekom porasta opterećenja temelja ne raste samo veličina normalnog kontaktnog naprezanja, već se bitno mijenja i oblik raspodjele tog naprezanja. U početku (faza ①) ona u srednjem dijelu temelja slični teoretskoj raspodjeli za kruti temelj na elastičnom poluprostoru (crtkana linija<sup>4</sup>), dok se na rubovima približava teoretskom rješenju za raspodjelu ispod temelja na idealnom plastičnom poluprostoru (linija crta-dvotočka<sup>5</sup>). Elastično rješenje karakteriziraju singularne točke na rubovima krutog temelja na kojima je teoretski kontaktno naprezanje beskonačno, dok je u sredini temelja to naprezanje najmanje. Ali, nosivost tla je ograničena i ne može preuzeti tako velika opterećenja pa na rubovima dolazi do njegove plastifikacije. S druge strane, teoretsko rješenje teorije plastičnosti karakterizira najveće naprezanje u sredini temelja (komponenta s faktorom  $N_y$  u izrazu za nosivost plitkih temelja), dok prema rubovima linearno pada do najmanje veličine (koja odgovara komponenti s faktorom  $N_q$  u izrazu za nosivost plitkih temelja jer komponenta s faktorom  $N_c$  ovdje nema utjecaja obzirom da pijesak nema kohezije, a komponenta uz  $N_y$  ima na rubu vrijednost nula).

Kako opterećenje temelja dalje raste, plastifikacija tla ispod temelja se širi prema njegovoj sredini pa se shodno tome mijenja i oblik raspodjele kontaktnih naprezanja (faze ②, ③ i ④). U fazi ④ tlo ispod i pored temelja je gotovo potpuno plastificirano, a raspodjela kontaktnih naprezanja se gotovo

---

<sup>4</sup> Crtkana linija odgovara raspodjeli kontaktnog pritiska ispod kružnog krutog temelja na površini linearno elastičnog izotropnog poluprostora prema rješenju Borowicka (1936); vidi u: Szavits Nossan, A. (2007).

<sup>5</sup> Linija crta-dvotočka odgovara Terzaghijevom rješenju (Terzaghi, 1943) za raspodjelu naprezanja ispod trakastog temelja na idealno plastičnom poluprostoru s Mohr-Coulombovim zakonom čvrstoće uz parametre čvrstoće  $c' = 0$ ,  $\varphi' = 30^\circ$  i jediničnu težinu tla od  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ , vidi u: kao i fusnota 4.

potpuno približila rješenju teorije plastičnosti. Iza te faze opterećenja slijedi potpuni slom tla ispod temelja kako prikazuje slika 4-7 (c). Na susjednoj slici (d) prikazane su za usporedbu zone sloma (klizne plohe ili  $\alpha$  i  $\beta$  karakteristike) za Prandtlovo rješenje plastičnog sloma ispod trakastog opterećenja na plastičnom poluprostoru (uz zanemarenu jediničnu težinu tla<sup>6</sup>).

Rezultati ovog eksperimenta te usporedbe s teoretskim rješenjima su poučni kao tipični primjer problema u geotehnici jer zorno prikazuju složenost problema interakcije tla i temelja već i na jednostavnom slučaju temelja samca na sloju pijeska. Očito je da su uobičajeni postupci proračuna slijeganja temelja prije sloma, koji se dijelom oslanjaju na rješenja teorije elastičnosti, kao i postupci određivanja graničnog stanja nosivosti temeljnog tla, koji se temelje na teoriji plastičnosti, samo gruba aproksimacija stvarne interakcije temelja i tla. Kod složenijih temelja, posebno onih savitljivih, problem postaje još složeniji. Bez obzira na te poteškoće, geotehnička struka je našla približne, prihvatljive i primjenjive postupke prognoze slijeganja temelja, nosivosti temeljnog tla kao i interakcije savitljivih temelja s temeljnim tlom. Ti se postupci temelje na odgovarajućim teoretskim rješenjima teorije elastičnosti i teorije plastičnosti, ali često uz korištenje nekih korekcija. Potvrde teoretskih rješenja ili moguće korekcije su dobivene empirijski usporedbom teorijskih rješenja i mjerenja na terenu ili na modelima. Sama teoretska rješenja bez provjere ili bez moguće korekcije temeljem opažanja na terenu na stvarnim konstrukcijama ili na modelima i bez usporedivog iskustva s njihovom primjenom u geotehničkoj struci u pravilu nisu prihvatljiva!

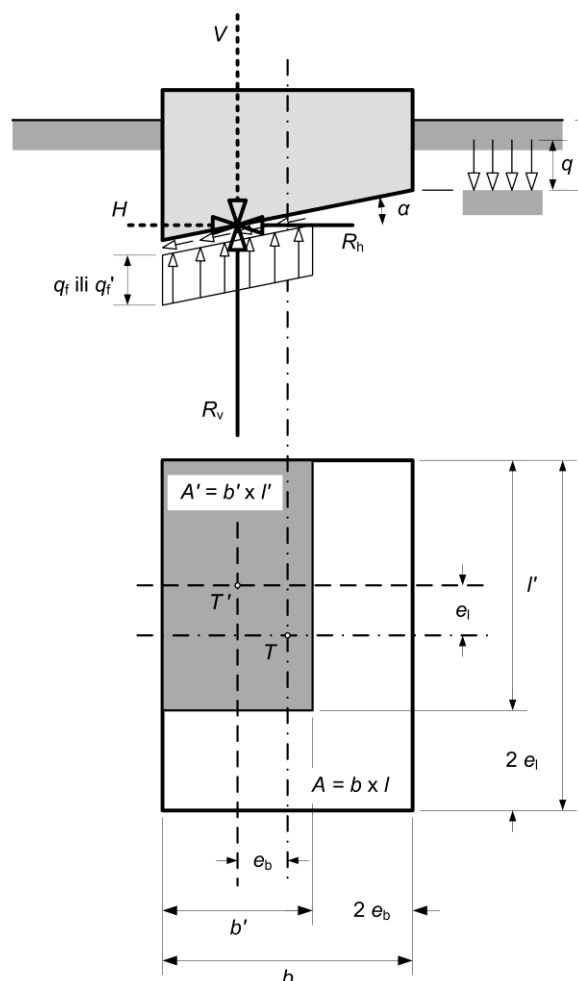
## Opći izraz za nosivost tla ispod plitkog temelja

Terzaghijevo približno rješenje za prosječno efektivno normalno kontaktno naprezanje na vodoravnoj temeljnoj plohi centrično opterećenog trakastog temelja koji izaziva slom tla, i koji se ponekad naziva *nosivost tla*, može se napisati u slijedećem obliku za drenirane uvjete u tlu

$$q_f' = c'N_c + \frac{1}{2}by'N_\gamma + q'N_q \quad (4.1)$$

---

<sup>6</sup> vidi u: kao i fusnota 4.



**Slika 4-8 Ekscentrično opterećen plitki temelj s ekvivalentnom temeljnom plohom površine  $A'$ , mjerodavnom za proračun nosivosti temeljnog tla, i dubinom temeljenja  $d$  ( $b \leq l$ ,  $b' \leq l'$ ); prema Eurokodu 7 (EN 1997-1:2004)**

U gornjem izrazu su  $N_c$ ,  $N_\gamma$  i  $N_q$  faktori nosivosti koji ovise o efektivnom parametru čvrstoće  $\varphi'$  (efektivni kut trenja) Mohr-Coulombovog zakona čvrstoće za tlo,  $c'$  je također parametar čvrstoće (efektivna kohezija) istog zakona,  $b$  je širina trakastog temelja<sup>7</sup>,  $\gamma'$  je efektivna jedinična težina tla, a  $q'$

<sup>7</sup> misli se na širinu tlocrtnog obrisa temelja; svaki taj obris ima širinu  $b$  i duljinu  $l$  pri čemu se podrazumijeva da je širina nikad nije veća od duljine ili da je uvijek  $b \leq l$ .

je efektivno vertikalno naprezanje u tlu na dubini temeljne plohe<sup>8</sup>. Za nedrenirane uvjete izraz za nosivost tla poprima jednostavniji oblik

$$q_f = c_u(2 + \pi) + q \quad (4.2)$$

gdje je sada  $q_f$  prosječno normalno kontaktno naprezanje (pazi: ukupno, a ne efektivno naprezanje) koje izaziva nedrenirani slom u tlu,  $c_u$  je nedrenirana čvrstoća tla, a  $q$  je vertikalno naprezanje u tlu na dubini temeljne plohe (pazi: ukupno, a ne efektivno naprezanje). Izrazi (4.1) i (4.2) se mogu koristiti u praksi samo pri dimenzioniranju trakastih temelja s vodoravnom temeljnom plohom opterećenih silama čija je rezultanta vertikalno linijsko opterećenje koje djeluje u uzdužnoj osi trake, dakle centrično u odnosu na poprečni presjek trakastog temelja.

U praksi se javlja potreba za dimenzioniranjem i drugačije oblikovanih temelja, posebno pravokutnih, kvadratnih ili kružnih temelja samca, kao i drugačije opterećenih temelja, posebno onih s kosim i s ekscentričnim opterećenjem. Za tako oblikovane temelje i takvu vrsta opterećenja nije izvedeno opće rješenja teorije plastičnosti, već su nađena približna rješenja za neke posebne slučajeve. Među poznatijima su radovi Meyerhofa (Meyerhof, 1951, 1953, 1955, 1963, 1982) za ukopani trakasti temelj pod vertikalnim ili kosim te centričnim ili ekscentričnim opterećenjem. Meyerhofovo rješenje za faktore nosivosti  $N_q$  i  $N_c$  jednako je Prandtl-Reissnerovom, dok je faktor  $N_\gamma$  određen približnim postupkom koji se nešto razlikuje od Terzaghijevog. Utjecaj oblika temelja te ekscentričnog ili nagnutog opterećenja na nosivost plitkih temelja proučavali su bilo teoretski bilo eksperimentalno još DeBeer (1970), Brinch Hansen (1970) i Vesić (1973, 1975). Vesić (1973, 1975) je za određivanje izraza za  $N_\gamma$  koristio približna rješenja Caquot-a i Kerisel-a (1953)<sup>9</sup> koji su pak numerički integrirali originalne diferencijalne jednadžbe Bussinesq-a (1876, 1885) koje približno opisuju stanje plastične ravnoteže u plastičnom tijelu sa

---

<sup>8</sup> Doprinos nosivosti,  $q_f'$ , člana s koeficijentom nosivosti  $N_\gamma$  u izrazu (4.1) (doprinos od efektivne vlastite težine plastičnih zona u tlu) je ovdje izražen kao prosječno efektivno normalno naprezanje, dok je stvarna raspodjela od tog doprinosa trokutna, najveća u sredina, a jednaka nuli na rubovima. U praksi se uvodi pojednostavljenje kojim se trokutna raspodjela zamjenjuje prosječnim jednolikim naprezanjem. Otuda se u tom članu izraza za nosivost pojavljuje faktor  $\frac{1}{2}$ . Vidi u: kao i fusnota 4

<sup>9</sup> Boussinesq-ove jednadžbe plastične ravnoteže prvi je numerički integrirao Caquot (1935), a zatim Caquot i Kerisel (1948)

**Tablica 4-2 Formule za članove u izrazu za nosivost tla  $q_f$  prema EN 19971:2004**

| član       | izraz  |  |
|------------|--|--|
|            | nedrenirano  | drenirano  |
| $N_q$      | 1  | $\tan\left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2}\right) e^{\pi \tan \varphi'}$   |
| $b_q$      | 1  | $(1 - \alpha \tan \varphi')^2$ ; $\alpha$ izraženo u radijanima  |
| $s_q$      | 1  | $1 + \frac{b'}{l'} \sin \varphi'$  |
| $i_q$      | 1  | $[1 - H/(V + A' c' \cot \varphi')]^m$<br>$m = m_b = [2 + \frac{b'}{l'}] / [1 + \frac{b'}{l'}]$ kad $H$ djeluje u smjeru $b$<br>$m = m_l = [2 + \frac{l'}{b'}] / [1 + \frac{l'}{b'}]$ kad $H$ djeluje u smjeru $l$ ; kad $H$ djeluje pod kutom $\theta$ u odnosu na $l$ , tada je<br>$m = m_\theta = m_l \cos^2 \theta + m_b \sin^2 \theta$ |
| $N_c$      | $2 + \pi$  | $(N_q - 1) \cot \varphi'$  |
| $b_c$      | $1 - 2\alpha/(\pi + 2)$                                    | $b_q - (1 - b_q)/(N_c \tan \varphi')$  |
| $s_c$      | $1 + 0.2 \frac{b'}{l'}$                                    | $(s_q N_q - 1)/(N_q - 1)$  |
| $i_c$      | $\frac{1}{2} \left(1 + \sqrt{1 - \frac{H}{A' c_u}}\right)$ | $i_q - (1 - i_q)/(N_c \tan \varphi')$  |
| $N_\gamma$ | 0  | $2(N_q - 1) \tan \varphi'$   |
| $b_\gamma$ | -  | $b_q$  |
| $s_\gamma$ | -  | $1 - 0.3 \frac{b'}{l'}$  |
| $i_\gamma$ | -  | $[1 - H/(V + A' c' \cot \varphi')]^{m+1}$ ; $m$ kao za $i_q$   |

nezanemarivom vlastitom težinom. Na temelju tih istraživanja autori Eurokoda 7 odlučili su se da se nosivost tla ispod plitkog temelja s pravokutnom temeljnom plohom izrazi za nedrenirano stanje kao

$$\frac{R}{A'} = q_f = (\pi + 2)c_u b_c s_c i_c + q \quad (4.3)$$

a za drenirano stanje kao

$$\frac{R}{A'} = q'_f = c' N_c b_c s_c i_c + q' N_q b_q s_q i_q + \frac{1}{2} \gamma' b' N_\gamma b_\gamma s_\gamma i_\gamma \quad (4.4)$$

pri čemu je  $R$  vertikalna otpornost tla pri slomu (sila),  $q_f$  i  $q'_f$  su vertikalna komponenta ukupnog odnosno efektivnog prosječnog kontaktnog naprezanja na temeljnoj plohi u trenutku sloma za nedrenirane odnosno za drenirane uvjete u tlu,  $c_u$  je nedrenirana čvrstoća tla,  $c'$  je efektivna kohezija tla,  $q$  i  $q'$  su vertikalno ukupno odnosno efektivno naprezanje u tlu na najmanjoj dubini temeljne plohe  $d$ , koja se naziva *dubinom temeljenja*,  $\gamma'$  je efektivna jedinična težina tla,  $N_c$ ,  $N_q$  i  $N_\gamma$  su faktori nosivosti ovisni o efektivnom parametru čvrstoće  $\varphi'$  (tablica 4-2), a  $b$ ,  $s$  i  $i$  s indeksima  $c$ ,  $q$  i  $\gamma$  su koeficijenti prikazani u tablici 4-2. Geometrijske karakteristike temelja su prikazane na slici 4-8.

Problem nosivosti ekscentrično opterećenog temelja riješen je tako da je pretpostavljeno da je  $q_f$  odnosno  $q'_f$  jednoliko rasprostrto naprezanja po dijelu temeljne plohe površine  $A'$  pa stoga otpornost  $R$  mora biti u težištu vertikalne projekcije tog istog dijela temeljne plohe. Kako djelovanje  $E$  i otpornost  $R$  pri slomu moraju ležati na istom pravcu i biti suprotnog smjera, slijedi da će pri slomu od ekscentričnog opterećenja samo dio temeljne plohe biti opterećen, a da će težište te plohe biti na mjestu probodišta rezultante opterećenja s temeljnom plohom. Umanjena temeljna ploha površine  $A'$  naziva *ekvivalentnom temeljnom plohom*. Njena površina je to manja što je ekscentričnost opterećenja veći (Slika 4-8). Prema istoj slici površina ekvivalentne temeljne plohe iznosi

$$A' = b'l' \quad (4.5)$$

gdje su  $b'$  i  $l'$  širina i dužina stranica vertikalne projekcije ekvivalentne temeljne plohe<sup>10</sup> (Slika 4-8).

Razina podzemne vode utječe na nosivost tla ispod plitkog temelja za drenirane uvjete. To se odražava na veličinu vertikalnog efektivnog naprezanja u tlu na razini temeljne plohe,  $q'_f$ , i na veličinu efektivne jedinične težine tla,  $\gamma'$ , u izrazu (4.4). U slučaju da je voda ispod zone sloma u tlu (oko

<sup>10</sup> Među reduciranim dimenzijama ekvivalentne temeljne plohe,  $b'$  se uvijek označava širina, a  $l'$  duljina plohe tako da bude zadovoljeno  $b' \leq l'$  neovisno o smjerovima stranica  $b$  i  $l$  (koje se također označuju na način da je ispunjeno  $b \leq l$ ). U pojedinim kombinacijama ekscentriciteta  $e_0$  i  $e_1$  može se pojaviti slučaj da je  $b'$  paralelno s  $l$ , a  $l'$  s  $b$ .



jedna do dvije širine temelja), za  $q'$  treba uvrstiti ukupno vertikalno naprezanje u tlu<sup>11</sup>,  $q$  (ako je tlo jedinične težine  $\gamma$ , a dubina temeljenja  $d$ , tada je  $q = \gamma d$ ), a umjesto  $\gamma'$  treba staviti  $\gamma' = \gamma$ . Ukoliko je razina podzemne vode na razini temeljne plohe,  $q'$  ostaje kao i u prethodnom slučaju, dok za efektivnu jediničnu težinu treba staviti  $\gamma' = \gamma - \gamma_w$ , gdje je  $\gamma_w$  specifična težina vode. I konačno, ako je voda na površini terena,  $\gamma'$  ostaje kao i u prethodnom slučaju, a za vertikalno efektivno naprezanje na dubini temeljenja treba staviti  $q' = \gamma' d$ .

## Otpornost na klizanje

Plitke temelje opterećene značajnijom komponentom tangencijalne sile u temeljnoj plohi (sili koja leži u ravnini temeljne plohe) treba provjeriti na opasnost od klizanja temelja po tlu na koje temelj prenosi opterećenje. Do klizanja temelje dolazi kad sila koja izaziva klizanje dosegne otpornost na klizanje na sučelju između temelja i tla. Ova otpornost ovisi o karakteru tog sučelja. Neka ispitivanja i iskustvo upućuju na održivost pretpostavke da će zbog uobičajenog načina izvedbe temelja, lijevanjem svježeg betona neposredno na pripremljenu podlogu od tla, prianjanje između temelja i tla biti toliko dobro da u potpunosti aktivirana otpornost na klizanje približno odgovara onoj koja proizlazi iz punog aktiviranja posmične čvrstoće tla. Kako je čvrstoća tla izražena preko Mohr-Coulombovog zakona  $\tau_f = c + \sigma \tan \varphi$ , mjrodavni parametri za proračun otpornosti na klizanje su parametri čvrstoće  $c$  i  $\varphi$  te normalno kontaktno naprezanje  $\sigma$  na temeljnoj plohi.

Otpornost na klizanje, izražena kao sila koja se pri klizanju temelja opire tangencijalnoj komponenti opterećenja na temelj na razini temeljne plohe, može se izraziti kao

$$R = \int_{A'} \tau_f dA' \quad (4.6)$$

gdje se integracija čvrstoće na sučelju tla i temelja provodi preko onog dijela temeljne površine preko kojeg se prenosi normalno opterećenje, a to je ekvivalentna površina  $A'$  definirana u prethodnom poglavlju izrazom (4.5). Kao i u tlu, i na sučelju između temelja i tla su prisutni bilo drenirani bilo

---

<sup>11</sup> jer je tlak porne vode jednak nuli ako se zanemari negativni tlak od kapilarnog dizanja (što se redovito iz sigurnosnih razloga zanemaruje).

nedrenirani uvjeti. Ovi posljednji praktično mogu biti mjerodavni samo u sitnozrnim tlima. U dreniranim se uvjetima pri procjeni čvrstoće u praktičnoj primjeni u pravilu zanemaruje utjecaj efektivne kohezije  $c'$  zbog moguće poremećenosti tla pri iskopu i izgradnji temelja pa je čvrstoća izražena kao  $\tau_f = \sigma' \tan \varphi'$ , dok u nedreniranim uvjetima ona iznosi  $\tau_f = c_u$ , gdje je  $c_u$  nedrenirana čvrstoća temeljnog tla. U dreniranim uvjetima treba uzeti u obzir da čvrstoća ovisi o efektivnom normalnom naprezanju  $\sigma' = \sigma - u$  na kontaktu temelja i tla, pa u račun čvrstoće treba uzeti u obzir, osim normalnog naprezanja  $\sigma$  i mogući tlak porne vode  $u$  ako su moguće okolnosti da je temelj ispod razine podzemne vode. U zoni kapilarne podzemne vode na negativni tlak vode, koji bi povećao normalno naprezanje  $\sigma$ , ne treba računati.

Često se u praksi temelj izvodi lijevanjem svježeg betona u pripremljenu jamu u tlu. Pri tome se, naročito za sitnozrno tlo, dno jame pripremi na način da se na svježe iskopano tlo nasipa i zbije tanji sloj pijeska, šljunka ili lomljenog kamena. To se izvodi kako se svježi beton ne bi lijevao na razmočenu i mekanu izloženu površinu tla te kao bi se dobila uredna ravna površina. Klizanje tako izvedenog temelja može se ostvariti bilo na sučelju između betona temelja i nasutog krupnozrnog tla bilo na sučelju nasutog krupnozrnog tla i originalnog temeljnog tla, ovisno na kojem sučelju je manja posmična čvrstoća. U oba slučaja otpornost na klizanje treba računati samo po efektivnoj površini  $A'$ , izraz (4.5), a pri proračunu posmične čvrstoće u izrazu (4.6) pretpostaviti da je raspodjela normalnog naprezanja na tom sučelju jednaka prosječnom normalnom naprezanju  $\sigma = N/A'$ , gdje je  $N$  normalna komponenta opterećenja na razini temeljne plohe.

U rijetkim slučajevima, kad se ranije u oplati izvedeni temeljni blok polaže neposredno na tlo pa mu je površina sučelja s tlom zbog izrade u oplati glatka, uobičajena je praksa da se trenje klizanja po tlu umanja na 2/3 onog koje bi bilo mjerodavno da se temelj izvodio neposrednim lijevanjem na iskopano tlo.

## Pomaci plitkih temelja

### *SLIJEGANJE ZA CENTRIČNO VERTIKALNO OPTEREĆENJE*

Opterećenje konstrukcije prenosi se preko temelja u temeljno tlo, što u tlu izaziva dodatna naprezanja u odnosu na već prisutna od njegove vlastite težine, podzemne vode i drugih uzroka. Ova dodatna naprezanja izazivaju deformacije tla, a ove pak pomake temelja koji na njemu leži. Vertikalna

komponenta tih pomaka naziva se *slijeganjem*. Obzirom na relativnu brzinu kojom se u građevinarstvu pojavljuje opterećenje u odnosu na brzinu konsolidacije u tlu, općenito je pogodno slijeganje podijeliti u tri komponente:

- $s_0$ : *trenutačno slijeganje* koje se ostvaruje istovremeno s nanošenjem opterećenja; u slabo propusnim tlima to se slijeganje obično odigrava pod nedreniranim uvjetima u tlu pri čemu se zbog tih uvjeta mijenjaju pritisci vode u porama, a ako je tlo potpuno zasićeno vodom popraćeno je i deformacijama bez promjene volumena;
- $s_1$ : *konsolidacijsko slijeganje* nastaje zbog nestacionarnog procjeđivanja vode u tlu koje je pak izazvano razlikom trenutačnih poreznih tlakova i konačnih poreznih tlakova koji odgovaraju dugotrajnom stacionarnom tečenju u dreniranim uvjetima; u početku, kad je ta razlika najveća i brzina konsolidacije pa time i konsolidacijskog slijeganja je najbrža, da bi s vremenom brzina konsolidacije i konsolidacijskog slijeganja postupno padala dok konačno ne završi ulaskom tla u stanje dreniranih uvjeta;
- $s_2$ : *slijeganje izazvano puzanjem tla*; ovo slijeganje nastaje zbog vrlo sporih brzina deformacija skeleta tla pod konstantnim efektivnim naprezanjem, koje se naziva puzanjem; puzanje i pripadno slijeganje u pravilu se odvija u dreniranim uvjetima, prisutno je u svim vrstama tla, ali je praktički zamjetno najviše u sitnozrnim tlima, to više što su ona mekša i što su plastičnija i to tek unutar dužeg promatranog razdoblja; u praktičnoj geotehnici često se zanemaruju.

Slijeganje temelja je važno pri provjeri pouzdanosti konstrukcije obzirom na granična stanja uporabivosti. Mjerodavna opterećenja za ta granična stanja obično su dva do tri puta manja od onih za granično stanje uporabivosti<sup>12</sup> pa je mehaničko ponašanje tla bliže elastičnom nego plastičnom pri slomu. Zbog toga je primjereno u geotehnici uobičajeno pojednostavljenje da se pomaci temelja proračunavaju primjenom izraza iz teorije elastičnosti.

Trenutačno slijeganje centrično opterećenog plitkog temelja u nedreniranim uvjetima na potpuno vodom zasićenom tlu može se općenito izraziti izrazom iz teorije elastičnosti

---

<sup>12</sup> Svi parcijalni koeficijenti, kako za opterećenja tako i za materijalne karakteristike, pri provjeri graničnih stanja uporabivosti jednaki su jedinici!

$$s_0 = \frac{pb}{E_u} f \quad (4.7)$$

gdje je  $p$  prosječno kontaktno naprezanja na temeljnoj plohi,  $b$  je širina temelja (kraća dimenzija tlocrtnog obrisa temelja),  $E_u$  je ekvivalentni Youngov modul elastičnosti tla, a  $f$  je koeficijent slijeganja, bezdimenzionalna veličina ovisna o obliku temelja, dubini njegove ukopanosti u tlo, Poissonovom broju za tlo te relativnom odnosu prosječnog kontaktnog naprezanja i nosivosti tla<sup>13</sup>. Neke tipične vrijednosti za  $f$  prikazane su na tablici 4-3. Za nedrenirane uvjete u potpuno vodom zasićenom tlu za Poissonov broj  $\nu$  treba uvrstiti  $\nu = 0.5$ .

**Tablica 4-3 Koeficijent slijeganja  $f$  za plitke temelje na homogenom tlu**

| Opis  | Opći izraz                 | Drenirano<br>( $0 \leq \nu' \leq 0.3$ ) | Nedrenirano<br>( $\nu = 0.5$ ) |
|---|----------------------------|---|--------------------------------|
| - sredina savitljivog kružnog temelja promjera $b$ na homogenom tlu .....   | $1 - \nu^2$                | $\sim 1$                                | 0.75                           |
| - kruti kružni temelj promjera $b$ na homogenom tlu (za kruti temelj površine tlocrtnog obrisa temelja A: $b = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}$ ) ... | $\frac{\pi}{4}(1 - \nu^2)$ | $\sim 0.8$                              | $\sim 0.59$                    |

Ukupno slijeganje u dreniranim uvjetima, nakon gotove konsolidacije, može se izraziti sličnim izrazom onom u (4.7):

$$s_0 + s_1 = \frac{pb}{E'} f \quad (4.8)$$

gdje je  $E'$  ekvivalentni Youngov modul tla za drenirane uvjete određen preko efektivnih naprezanja. U izrazu (4.8)  $f$  je koeficijent slijeganja koji se za

<sup>13</sup> Navedeni izraz za slijeganje vrijedi egzaktno za slijeganje temelja na elastičnom poluprostoru, dok je on približan za realna tla čiji je odnos naprezanja i deformacija nelinearan i u kojem na mjestima koncentracije naprezanja može doći do plastifikacije materijala. U tom slučaju  $E_u$  je neki prosječni sekantni modul nelinearnog tla koji uvršten u ovaj izraz daje stvarno slijeganje. Više o problemu slijeganja i praktičnim postupcima procjene slijeganja vidi u: kao napomena 4.

jednostavne slučajeve može preuzeti iz tablice 4-3 uz odgovarajući Poissonov broj tla za drenirane uvjete (kako je za drenirane uvjete Poissonov broj tla relativno mali, od 0.1 do 0.3, njegovo zanemarivanje neće u procjenu slijeganja unijeti nezanemarivu pogrešku). U slučaju nehomogenog tla, u kojem se na utjecajnim dubinama nalaze slojevi bitno različite krutosti, pogotovo ako se radi o mekšim slojevima, treba koristiti pogodnije postupke procjene slijeganja od ovih iz izraza (4.7) i (4.8)<sup>14</sup>.

Poučno je procijeniti odnos trenutnog,  $s_0$ , i konačnog slijeganja,  $s_0 + s_1$ , za slučaj potpuno vodom zasićenog sitnozrnog tla ako se zanemari puzanje. Iz izraza (4.7) i (4.8) te tablice 4-3 za kružni temelj slijedi

$$\frac{s_0}{s_0 + s_1} = \frac{0.75}{1 - (v')^2} \frac{E'}{E_u} \quad (4.9)$$

Kako je  $E' = 2G'(1 + v')$ ,  $E_u = 2G_u(1 + 0.5) = 3G_u$ , a uvijek je  $G' = G_u$ , slijedi uvrštavanjem u (4.9)

$$\frac{s_0}{s_0 + s_1} = \frac{1}{2(1 - v')} \quad (4.10)$$

Ovaj izraz vrijedi samo ako je temelj na homogenom sloju tla čija debljina nije manja od utjecajne dubine temelja (dubine do koje deformacije tla još doprinose slijeganju temelja). U tom slučaju, obzirom na mogući raspon efektivnog Poissonovog broja između 0 i 0.3, slijedi da će trenutno slijeganje biti između 50 % i 80 % konačnog slijeganja plitkog temelja na sitnozrnog tlu. Jasno, kod krupnozrnog tla, kod kojeg se konsolidacija odvija usporedno s opterećenjem, trenutno slijeganje će ujedno biti i konačno.

Samo slijeganje od konsolidacije,  $s_2$ , sitnozrnog tla dobije se oduzimanjem izraza (4.7) od izraza (4.8). Za grubi proračun, sam tijek konsolidacije, slijeganja u vremenu, može se dobiti iz izraza

$$s_1(t) \approx s_1 U(t) \quad (4.11)$$

gdje je  $U(t)$  prosječni stupanj konsolidacije iz Terzaghijeve jedno-dimenzionalne teorije konsolidacije<sup>15</sup>.

Obilježje slijeganja uslijed puzanja je logaritamska zakonitost u vremenu. To znači da će približno vrijediti

<sup>14</sup> vidi detaljnije u: kao i fusnota 4.

<sup>15</sup> vidi detaljnije u: kao i napomena 4.

$$s_2(t_2) - s_2(t_1) = \log \frac{t_2}{t_1} \quad (4.12)$$

gdje je  $t$  vrijeme. Veličinu slijeganja od puzanja, bez kvalitetnih laboratorijskih pokusa na kvalitetnim neporemećenim uzorcima, obično nije moguće pouzdano utvrditi.

U geotehničkoj praksi najveći je problem pouzdane prognoze slijeganja leži u pouzdanosti procjeni krutosti tla odnosno pouzdanom utvrđivanju ekvivalentnih Youngovih modula iz izraza (4.7) ili (4.8), a vremenskog toka slijeganja iz pouzdanog utvrđivanja koeficijenta konsolidacije,  $c_v$ , koji se koristi za određivanje prosječnog stupnja konsolidacije,  $U(t)$ , u izrazu (4.11). Tu se treba pridržavati preporuka Eurokoda 7-2, kao je naznačeno u Poglavlju 2, te preporuka suvremene mehanike tla. Općenito se u praksi najbolji rezultati dobiju korištenjem kvalitetnih edometarskih pokusa na kvalitetnim neporemećenim uzorcima za meka do srednje kruta (normalno konsolidirana do malo prekonsolidirana) sitnozrna tla, a korelacijama iz terenskih pokusa (CPT, CPTU, SPT, geofizička mjerenja brzina posmičnih valova i druga) za kruta (jako prekonsolidirana) sitnozrna tla i za sva krupnozrna tla.

#### ROTACIJA KRUTIH TEMELJA

Analize slijeganja u prethodnom poglavlju odnosile su se na centrično opterećene temelje kod kojih vertikalno opterećenje djeluje u težištu temeljne plohe. U praksi se, međutim, gotovo redovito na temelju pojavljuje ekscentrično opterećenje ili moment sila. Takvo opterećenje će, osim slijeganja, izazvati i naginjanje temelja. Ono se u praksi rjeđe računa, ali ponekad može biti značajno za pouzdanost konstrukcije u graničnom stanju uporabivosti. Ovdje će se prikazati jednostavan primjer proračuna naginjanja krutog kružnog temelja pri površini tla koje je homogeno u zoni utjecajne dubine temelja, znači jedne do dvije njegove širine. Ovaj proračun može poslužiti i za približnu procjenu naginjanja i u drugim slučajevima, ako točnost nije naročito značajna.

Vertikalna krutost krutog kružnog temelja promjera  $b$  na površini elastičnog poluprostora dana je izrazom<sup>16</sup>

---

<sup>16</sup> vidi Szavits-Nossan (2007)

$$K_v = \frac{V}{s} = \frac{2Gb}{1-\nu} = \frac{Eb}{1-\nu^2} \quad (4.13)$$

gdje je  $V$  vertikalna centrična sila (opterećenje u težištu temeljne plohe),  $s$  je slijeganje temelja pod tom silom,  $E$  i  $\nu$  su Youngov modul elastičnosti i Poissonov broj elastičnog poluprostora. Rotacijska krutost istog temelja na moment sila  $M$  dana je izrazom

$$K_r = \frac{M}{\tan \omega} = \frac{Gb^3}{3(1-\nu)} = \frac{Eb^3}{6(1-\nu^2)} \quad (4.14)$$

gdje je  $\omega$  kut nagnjanja temelja (Slika 4-5). Ako se  $s$   $e$  označi ekscentricitet sile  $V$  koji daje moment  $M$

$$M = Ve \quad (4.15)$$

slijedi iz izraza (4.13), (4.14) i (4.15) za tangens kute nagnjanja  $\omega$  jednostavan izraz

$$\tan \omega = \frac{6es}{b^2} \quad (4.16)$$

U slučaju pravokutnog temelja izraz (4.16) može poslužiti za približne procjene nagnjanja ako se za  $e$  i  $b$  uvrste komponenta ekscentriciteta i stranica temeljne plohe istog smjera (na primjer  $e_b$  i  $b$  ili  $e_l$  i  $l$ ). Kao i kod slijeganja, i za nagnjanje bi se mogle definirati njegove trenutačne, konsolidacijske i pužeće komponente, ali to u praksi nije uobičajeno.

Ovdje nije na odmet naglasiti da se slijeganje i nagnjanje temelja računa pri provjeri graničnog stanja uporabivosti što znači da se za temeljno tlo vrijede približno pretpostavke teorije elastičnosti te da je mehaničko ponašanje tla daleko od sloma i odgovarajućeg graničnog stanja nosivosti. To znači da pojam ekvivalentne temeljne plohe, reducirane veličine u odnosu na ukupnu temeljnu plohu, pri proračunu slijeganja i nagnjanja nema smisla i značenja. Primjena ekvivalentne plohe  $A'$  sa slike 4-8 ima samo smisla pri određivanju nosivosti temeljnog tla za granično stanje nosivosti.

#### **SAVITLJIVI TEMELJI: INTERAKCIJA KONSTRUKCIJA-TEMELJ-TLO**

Prethodne analize slijeganja i nosivosti temelja pretežno su se odnosila na krute temelje kao što su temelji samci ili temeljne trake ispod zidova. Kad

dimenzije temeljne plohe u odnosu na debljinu temelja postanu značajne, što je slučaj kod većih temeljnih stopa temelja samaca ili traka, kod temeljnih roštilja i temeljnih ploča, ili kad deformacija temelja izazove značajniju promjenu kontaktnih naprezanja između temelja i tla, neke od pretpostavki ranije opisanih proračuna mogu griješiti na strani nesigurnosti. U tim slučajevima treba provesti proračun interakcije temelj-tlo ili konstrukcija-temelj-tlo.

Poseban je problem dimenzioniranja samog betonskog konstruktivnog elementa temelja na granično stanje nosivosti (granično stanje STR) u slučaju kad je za dimenzioniranje tlocrtnih dimenzija temelja mjerodavno granično stanje uporabivosti. To je prvenstveno slučaj kod temelja većih dimenzija (recimo širina preko 10 m) kao što su temeljne ploče. U tom je slučaju raspodjela kontaktnih naprezanja između temelja i tla ona koja je bliža postavkama teorije elastičnosti nego onima teorije plastičnosti. Tada jednolika ili linearna raspodjela kontaktnih pritisaka više nije prihvatljiva aproksimacija. I tada treba provesti proračun interakcije temelja i tla bez obzira što se temelj u odnosu na tlo ponaša kao kruto tijelo. To proizlazi iz oblika raspodjele kontaktnih naprezanja za elastično tlo, kojeg karakterizira koncentracija kontaktnih naprezanja uz rubove temelja (vidi sliku 4-7).

Proračun interakcije konstrukcije temelja i tla zahtijeva uspostavljanje kompatibilnosti pomaka i naprezanja na međusobnim sučeljima sva tri dijela mehaničkog sustava. Očito je da je problem određivanja unutrašnjih sila u svakom od dijelova postaje vrlo složen. Danas su razvijeni praktični postupci za takve proračune i oni su uglavnom iterativni jer se kompatibilnost uspostavlja postupno i u koracima do zadovoljavajuće točnosti (Szavits-Nossan i Marenče, 1988). Detaljnije će se postupak prikazati u posebnom poglavlju.

## **Provjera pouzdanosti prema Eurokodu 7**

### *GRANIČNA STANJA NOSIVOSTI I UPORABIVOSTI*

Oblik i dimenzije temelja treba prema Eurokodu 7 izabrati tako da rizik od dosezanja bilo kojeg mogućeg graničnog stanja bude dovoljno mali. To se postiže računskim provjerama primjenom odgovarajućih parcijalnih koeficijenata. U računskim provjerama za granična stanja nosivosti koristi se jedan od tri proračunska pristupa opisana u Poglavlju 2. Ovdje će se opisati provjera prema proračunskom pristupu 1. Provjera prema ostalim proračunskim pristupima slijedi analogno uvažavajući postavke Eurokoda 7 prikazane u Poglavlju 2.



Eurokod 7 opisuje najčešća moguća granična stanja za plitke temelje te traži da se za svaki posebni slučaj u geotehničkom projektu izradi lista onih graničnih stanja koja se mogu za taj slučaj predvidjeti. Najčešća moguća granična stanja nosivosti za plitke temelje su:

- *gubitak opće stabilnosti* pri kojem neki dio temeljnog tla zajedno s temeljom i konstrukcijom postaje klizno tijelo, a mehanizam klizanja odgovara onom kod nestabilnih kosina (granično stanje GEO); ovakvi se slučajevi javljaju kad je temelj na kosini ili blizu ruba kosine<sup>17</sup>;
- *slom tla ispod temelja* izazvan pre velikim pritiskom kojim temelj opterećuje tlo (granično stanje GEO); kontakti pritiska ili kontaktno naprezanje između temelja i tla koje izaziva slom u tlu je nosivost tla;
- *gubitak stabilnosti klizanjem* pri kojem dolazi do klizanja temelja po temeljnoj plohi zbog pre velikog bočnog opterećenja temelja (granično stanje GEO);
- *kombinirani slom konstrukcije, temelja i tla* (granično stanje STR/GEO);
- *slom konstrukcije uslijed pomaka temelja pri čemu u tlu ne mora doći do sloma* (granično stanje STR); ovaj se slučaj može javiti kod temelja na mekom tlu u kojem su deformacije i pomaci veliki i prije sloma;

Najčešća granična stanja uporabivosti su:

- *prevelika slijeganja ili diferencijalna slijeganja unutar temelja ili među susjednim temeljima*;
- *preveliko izdizanje temelja* uslijed bujanja tla, djelovanja mraza i drugih uzroka;
- *neprihvatljive vibracije* koje se mogu javiti kod temelja strojeva.

Osim navedenih graničnih u pojedinim slučajevima mogu biti mjerodavna i druga granična stanja: na primjer EQU u slučaju mogućeg prevrtanja neke visoke građevine na pojedinačnom plitkom temelju, ili granično stanje HYD u slučaju mogućeg podlokavanja riječnog dna ispod

---

<sup>17</sup> Proračun globalne stabilnosti sličan po uključenim modelima proračunu nosivosti tla ispod plitkog temelja. To što se u praksi ta dva proračuna odvajaju posljedica je ograničenosti modela nosivosti tla. U nekom općem modelu, kao što su na primjer modeli mehanike neprekidnih sredina, problem globalne stabilnosti i problem nosivosti tla ispod plitkog temelja sastavni su dijelovi jednog te istog modela i rješavaju se zajednički.

plitkog temelja stupa mosta u rijeci (ovo posljednje zahtjeva provjeru mogućnosti podlokavanja koje treba spriječiti odgovarajućim mjerama).

**PRIMJER: PROVJERA POUZDANOSTI TEMELJA SAMCA OBZIROM NA GRANIČNA STANJA NOSIVOSTI I UPORABIVOSTI**

Primjer provjere graničnih stanja nosivosti za kvadratni plitki temelj samac<sup>18</sup> prikazuje slika 4-9. Temeljno tlo ima karakteristične materijalne parametre: efektivnu koheziju,  $c_k'$ , efektivni kut trenja,  $\varphi_k'$ , i jediničnu težinu,  $\gamma_k$ . Prije računa provjere treba sva opterećenja, sile i momente na temelj, vlastitu težinu temelja te vlastitu težinu nasipa iznad temelja svesti na odgovarajuće sile na temeljnoj plohi na mjestu gdje ju siječe njihova rezultanta, razdvojeno na stalnu komponentu  $G$  i dvije prolazne komponente  $Q_1$  i  $Q_2$ . Za prolazne komponente će se pretpostaviti da mogu djelovati neovisno (to ovisi o mehanizmu djelovanja na konstrukciju) pa njihovo uzimanje u računu u obzir ovisi da li je povoljno ili nepovoljno za stabilnost. Ako je povoljno, pripadni parcijalni faktor djelovanja jednak je nuli. Ako je nepovoljno, pripadni parcijalni faktor djelovanja je onaj kojeg traži pojedini projektni pristup. Razdvajanje na stalnu i prolazne komponente je potrebno zbog različitih parcijalnih koeficijenata koji se primjenjuju na odgovarajuće komponente. Treba provjeriti slijedeća granična stanja nosivosti: (a) nosivost tla ispod temelja (GEO), (b) klizanje temelja (GEO), i (c) nosivost presjeka betonskog presjeka temeljne stope na mjestu najvećeg momenta savijanja uz stup (STR). Provjera će provesti koristeći Projektni pristup 1. Po tom pristupu, kao što je opisano u Poglavlju 2, koriste se dvije kombinacije parcijalnih koeficijenata, K1 i K2. U prvoj, K1, „faktoriziraju“ se djelovanja, ali ne i parametri tla, dok se u drugoj, K2, „faktoriziraju“ parametri tla, ali ne i djelovanja (osim prolaznog).

**PROVJERA GRANIČNOG STANJA NOSIVOSTI ZA NOSIVOST TLA (GEO)**

**Kombinacija K1:**

*Djelovanja*

Vertikalno:  $E_{vd} = 1.35G + 1.50Q_1$

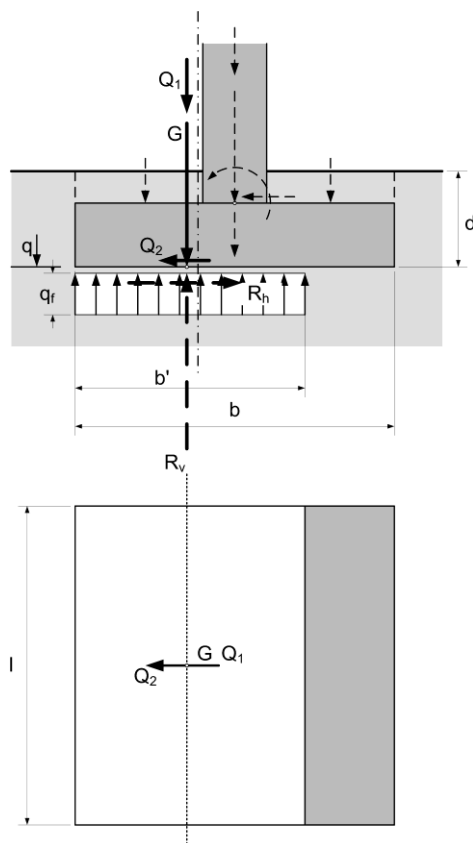
Horizontalno:  $E_{hd} = 1.50Q_2$

*Otpornost*

nosivost tla:  $q_f$  treba izračunati prema izrazu (4.4) koristeći karakteristične parametre čvrstoće za tlo  $c_d = c_k$ ,  $\varphi_d = \varphi_k'$  (parcijalni faktori na jedinične težine tla,  $\gamma$ , su uvijek i u svim kombinacijama jednaki jedinici, to vrijedi i za jediničnu težinu vode)

---

<sup>18</sup> kvadratni temelj: temelj kojemu je kvadrat tlocrtni obris temeljne plohe



Slika 4-9 Ekscentrično opterećen plitki temelj samac

Vertikalna:  $R_{vd} = q_f b' l$

Provjera graničnog stanja: ako stoji uvjet  $E_{vd} \leq R_{vd}$ , pouzdanost temelja zadovoljava, u suprotnom je dimenzija temelja pre mala.

#### Kombinacija K2:

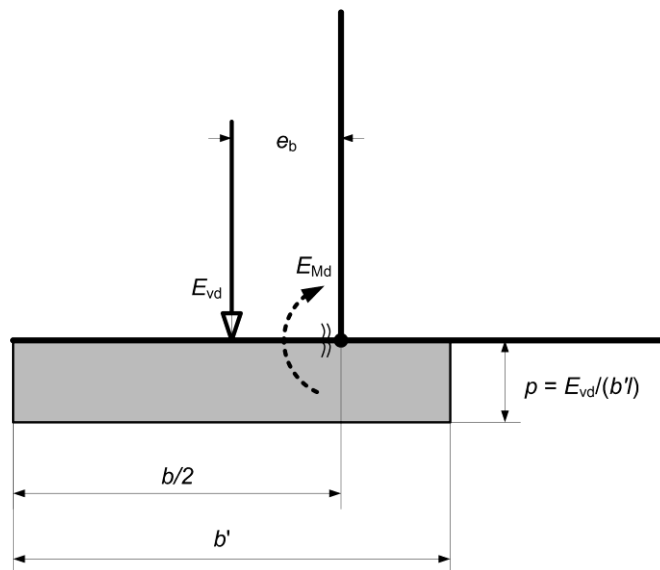
##### *Djelovanja*

Vertikalno:  $E_{vd} = 1.00G + 1.30Q_1$

Horizontalno:  $E_{hd} = 1.30Q_2$

##### *Otpornost*

nosivost tla:  $q_f$  treba izračunati prema izrazu (4.4) koristeći „faktorizirane“ parametre čvrstoće za tlo  $c_d = c_k/1.25$ ,  $\tan \varphi'_d = \tan \varphi'_k/1.25$  (parcijalni faktori na jedinične težine tla,  $\gamma$ , su uvijek i u svim kombinacijama jednaki jedinici, to vrijedi i za jediničnu težinu vode; nadalje, u slučaju nedreniranog stanja, parcijalni faktor na nedreniranu čvrstoću iznosi 1.40!)



**Slika 4-10 Dimenzioniranje presjeka konzole temeljne stope na granično stanje nosivosti (STR)**

Vertikalna:  $R_{vd} = q_f b' l$

*Provjera graničnog stanja:* ako stoji uvjet  $E_{vd} \leq R_{vd}$ , pouzdanost zadovoljava, u suprotnom je dimenzija temelja pre mala.

Komentar: kombinacija K2 bit će obično mjerodavna za određivanje dimenzije temelja, dok će kombinacija K1 biti obično mjerodavna za dimenzioniranje betonskog presjeka temelja (visine presjeka i armature) i to kako zbog različitih parcijalnih koeficijenata tako i zbog nelinearne ovisnosti veličine  $q_f$  o parametrima čvrstoće.

#### PROVJERA GRANIČNOG STANJA NOSIVOSTI ZA KLIZANJE (GEO)

Mjerodavna će biti kombinacija K1 (u slučaju dvojbe proračun treba provesti za obje kombinacije)

*Djelovanja*

Vertikalno:  $E_{vd} = 1.00G + 0.00Q_1$  (parcijalni koeficijent za povoljno djelovanje)

Horizontalno:  $E_{hd} = 1.50Q_2$

*Otpornost*

$R_{hd} = E_{vd} \tan \varphi'_k$  (zanemaren pasivni otpor ispred temelja)

*Provjera graničnog stanja:* ako stoji uvjet  $E_{hd} \leq R_{hd}$ , pouzdanost zadovoljava, u suprotnom je dimenzija temelja pre mala.

### PROVJERA GRANIČNOG STANJA NOSIVOSTI ZA NOSIVOST PRESJEKA STOPE TEMELJA (STR)

Mjerodavna će biti kombinacija K1 jer daje veće kontaktne pritiske. U slučaju dvojbe o mjerodavnosti kombinacije, treba provjeriti obje.

#### *Djelovanja*

Vertikalno:  $E_{vd} = 1.35G + 1.50Q_1$ , iz toga treba izračunati prosječni pritisak temelja na tlo  $p = E_{vd}/(b'l)$  te moment savijanja u temeljnoj stopi uz stup, ili na sredini temelja (Slika 4-10) što je na strani sigurnosti,  $E_{Md} = \frac{pb^2}{8}$  (kNm/m)<sup>19</sup>, s kojim treba provjeriti nosivost presjeka betona prema pravilima Eurokoda 2.

#### *Napomena*

Ako je za tlocrtne dimenzije temelja mjerodavno granično stanje uporabivosti može se za manje temelje računati s ovim momentom savijanja, ali bi bilo bolje s moment savijanja proračunati temeljem računa interakcije temelj-tlo po teoriji elastičnosti iz opterećenja  $E_{vd} = 1.35G + 1.50Q_1$ . Za temeljne roštilje, a pogotovo temeljne ploče, kod kojih je za tlocrtne dimenzije mjerodavno granično stanje uporabivosti, trebalo bi betonski presjek i armaturu dimenzionirati temeljem momenta savijanja dobivenog iz proračuna interakcije temelj-tlo (ili konstrukcija-temelj-tlo) uz opterećenje  $E_{vd}$ !

*Otpornost:* Proračunski moment otpornosti armirano-betonskog presjeka  $R_{Md}$  prema Eurokodu 2 (Eurokod 2 ne poznaje proračunske pristupe 1, 2 ili 3 iz Eurokoda 7 pa će se proračunska otpornost presjeka računati korištenjem odgovarajućih materijalnih parcijalnih koeficijenata za beton i betonski čelik, kako već predviđa Eurokod 2).

*Provjera graničnog stanja:* ako stoji uvjet  $E_{Md} \leq R_{Md}$ , pouzdanost presjeka temeljne stope zadovoljava, u suprotnom je dimenzija presjeka ili površina armature pre mala.

---

<sup>19</sup> ovo je izraz za moment savijanja u stopi na mjestu stupa; statički, stopa je konzola, a izraz je moment savijanja na korijenu konzole uz stup od jednolikog opterećenja.

## PROVJERA GRANIČNOG STANJA UPORABIVOSTI

### *Djelovanja*

Vertikalno:  $E_{vd} = 1.00G + 1.00Q_1$  (parcijalni koeficijenti za granično stanje uporabivosti)

*Provjera graničnog stanja:* ako stoji uvjet za najveća dozvoljena slijeganja,  $s(E_{Md}) \leq s_{max}$ , ili neki drugi zadani uvjet na pomake temelja, pouzdanost za to granično stanje zadovoljava; ako ne, treba mijenjati dimenzije temelja (ili čak vrstu temelja). Slično treba provjeriti za naginjanje ako je takav uvjet zahtijevan.

## PITANJE DOZVOLJENOG EKSCENTRICITETA

Eurokod 7 ne ograničava veličinu mogućeg ekscentriciteta djelovanja, osim što navodi da za ekscentricitet veći od 1/3 širine temelja treba poduzeti posebne mjere opreza. One uključuju posebnu provjeru načina i pouzdanosti kojom se utvrdilo opterećenje kao i uključivanje u račun moguće stvarno smanjenje dimenzije temelja zbog nepreciznosti u izvođenju. Nepreciznost do 10 cm treba pretpostaviti.

## UTJECAJ NA SUSJEDNE GRAĐEVINE

Pri izboru vrste temelja i njihovom dimenzioniranju treba voditi računa o tome da oni izazivaju slijeganje ne samo tla ispod sebe već i u neposrednoj okolini temelja. Ako se na utjecajnoj udaljenosti nalazi neka postojeća zgrada, to slijeganje može ugroziti susjedne građevine bilo da u njima izazove granično stanje nosivosti, što je rjeđe, ili granično stanje uporabivosti, što nažalost nije tako rijetko. Postoje različiti načini da se taj utjecaj smanji, ali da bi se odabralo najbolje rješenja prvo treba veličinu tog utjecaja odrediti. Tome mogu poslužiti postupci proračuna slijeganja kojima raspolaže Mehanika tla.

## NAJMANJA DUBINA TEMELJENJA

Eurokod 7 navodi da temeljenje treba izvesti tako da se izbjegne djelovanje mraza na tlo. Dugotrajnije temperature ispod 0 °C mogu dovesti do zamrzavanja tla ispod njegove površine. Smrzavanje može u tlu uzrokovati nastanak ledenih leća koje nakon otapanja ostavljaju u tlu prazan prostor podložan slijeganju. Da bi se izbjegle štetne posljedice takvog slijeganja, poželjno je temeljiti ispod dosega smrzavanja tla. U Hrvatskoj je to za nizinska područja oko 0.8 m, a za planinska 1.2 m. Obzirom da te dubine nisu

značajne, bolje se pridržavati ovih preporuka, nego dokazivati da određenim okolnostima štetnih posljedica smrzavanja nema.

#### **MJERODAVNO GRANIČNO STANJE ZA DIMENZIONIRANJE PLITKIH TEMELJA OVISNO O ŠIRINI TEMELJA**

Eurokodovi traže da pri dimenzioniranju bilo koje konstrukcije, pa tako i plitkih temelja, treba dokazati da ni jedno od graničnih stanja nosivosti te niti jedno od graničnih stanja uporabivosti neće biti prijeđeno. Provjera u praksi može brzo pokazati da su za različite konstrukcije mjerodavna različita granična stanja. Tako je i s plitkim temeljima. Kod plitkih temelja manjih dimenzija će se pokazati da je mjerodavno za njihovo dimenzioniranje pretežno granično stanje nosivosti i to uglavnom ono koje se odnosi na nosivost tla ispod temelja. Kod većih temelja, posebno temeljnih ploča, mjerodavno za njihovo dimenzioniranje bit će redovito neko od graničnih stanja uporabivosti, posebno ono koje se odnosi na dozvoljena slijeganja. Ako je to slučaj, dimenzioniranje betonskog presjeka temeljne ploče u pravilu će se provesti temeljem proračuna interakcije temelj-tlo ili konstrukcija-temelj-tlo ali za opterećenja koja odgovaraju projektnom pristupu K1 za granična stanja nosivosti, tj. za „faktorizirana“ opterećenja odgovarajućim faktorima 1.35 za stalno i 1.50 za prolazno opterećenje.

### **4.3. Proračun interakcije konstrukcija-temelj-tlo**

(dodat će se naknadno)

#### **Reference**

- Borowicka, H. (1939). Druckverteilung unter elastischen Platten. *Ingenieur Archiv*, 10 (2), 113-125.
- Brinch Hansen, J. (1970). *A Revised and Extended Formula for Bearing capacity*. Bulletin No. 28, Danish Geotechnical Institute, Copenhagen.
- Boussinesq, J.V. (1876). Essai théorique sur l'équilibre d'élasticité des massifs pulvérulents et sur la poussée des terres sans cohésion. *Mem.Acad.R. Belg.* Vol. 40. (pretiskano s malo promijenjenim naslovom - Paris: Gautier-Villars, 1876).
- Boussinesq, J.V. (1885). Sur l'intégration par approximations successive d'une équation ... dont dependent les pressions intérieurs d'un massif de sable à

- l'état éboleux'. U: *Application des potentielles à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques*. Gauthier-Villars, Paris (No. 27): 705-712.
- Caquot, A. (1935). *Equilibre des massifs à frottement interne*. Gauthier-Villars, Paris.
- Caquot, A., Kerisel, J. (1948). *Tables de butée et poussée*. Gauthier-Villars, quai des Augustins, Paris.
- Caquot, A., Kerisel, J. (1948). *Tables for the Calculation of Passive Pressure, Active Pressure and Bearing Capacity of Foundations*. Gauthier-Villars, Paris.
- Caquot, A., Kerisel, J. (1953). Sur le terme de surface dans le calcul des fondations en milieu pulvérant. *Proceedings Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Zürich, 1:336-337.
- DeBeer, E.E. (1970). Experimental determination of the shape factors of sand. *Géotechnique*, 20(4): 307
- Leussink, H., Blinde, A., Abel, P.-G. (1966). Versuche über die Sohldruckverteilung unter starren Gründungskörpern auf kohäsionslosem Sand. Veröff. 22 Inst. Bodenmech. Felsmech. TH Karlsruhe (citirano u: Smoltczyk, U. (2003). *Geotechnical Engineering Handbook*, Vol. 3., Ernst&Sohn, Berlin).
- Meyerhof, G.G. (1951). The ultimate bearing capacity of foundations. *Géotechnique*, 2, 301-332.
- Meyerhof, G.G. (1953). The bearing capacity of foundations under eccentric and inclined loads. *Proceedings of the Third International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1: 440-445.
- Meyerhof, G.G. (1955). The influence of roughness of base and ground-water conditions on the ultimate bearing capacity of foundations, *Géotechnique*, 5:227-242.
- Meyerhof, G.G. (1963). Some recent research on the bearing capacity of foundations. *Canadian Geotechnical Journal*, 1(1): 16-26.
- Meyerhof, G.G. (1982). *The bearing capacity and settlement of foundations*, Tech-Press, Technical University of Nova Scotia, Halifax.
- Szavits-Nossan, A. (2007). *Uvod u mehaniku tla*. (rukopis predavanja). Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet.
- Szavits-Nossan, A., Marenče, M. (1988), Proračun interakcije konstrukcije i temeljnog tla iterativnim postupkom. *Jugoslavenski časopis za inženjersko modeliranje*, Vol. 1, No.2, 25-31.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc. New York.
- Vesić, A.S. (1973). Analysis of ultimate loads of shallow foundations. *ASCE Journal of the soil mechanics and foundations division*, 99(SM1):45-73.
- Vesić, A.S. (1975). Bearing capacity of shallow foundations, *Foundation Engineering Handbook*, 1<sup>st</sup> edition, Winterkorn, H.F., Fang, H.-Y., eds., Van Nostrand Reinhold, New York, 121-147.