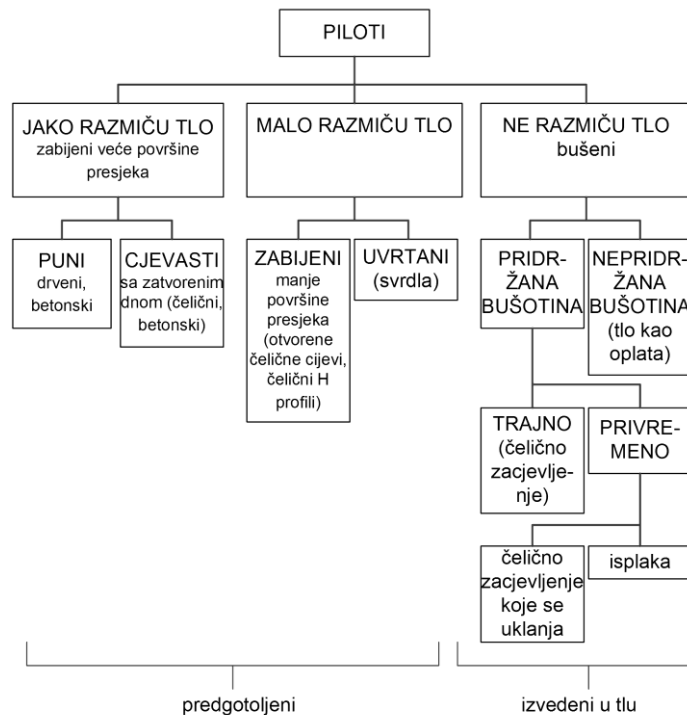


6. Temelji na pilotima

6.1. Svrha, vrste i izvedba pilota

Piloti su uspravni ili gotovo uspravni stupovi izgrađeni sa svrhom da prenesu opterećenje građevine u dublje bolje nosive slojeve tla. Brojni arheološki nalazi ukazuju da drvene pilote ljudi koriste već više tisuća godina za pridržavanje nastambi uz obale rijeka i jezera, a prvi ih spominje starogrčki povjesničar Herodot. Do početka prošlog stoljeća ugrađivali su se u tlo zabijanjem raznim napravama uz pomoć padajućih utega, da bi se sredinom prošlog stoljeća počeli koristiti i stupovi izgrađeni u posebno izvedenim bušotinama. Za bušenje tla primijenjeni su postupci koji su izrasli iz postupaka već razvijenih za istraživanje nafte. Istraživanje nafte je inače odigralo značajnu ulogu u razvoju pilota, ne samo kao izvorište ideja i postupaka za njihovo građenje, već su brojna istraživanja utjecaja na nosivost pilota provedena po narudžbi naftne industrije kad je započelo vađenje nafte i plina iz podmorskih nalazišta koje je tražilo sigurno temeljenje naftnih platformi na obično slabo nosivom morskom dnu.

Danas se u praksi susreće veliki broj različitih vrsta pilota. Te se vrste razlikuju kako po materijalu iz kojeg su piloti izrađeni, tako i po načinu njihove ugradnje u tlo. Dimenzije današnjih pilota mogu biti vrlo različite. Promjeri im se kreću od kojih desetak centimetara kod mikropilota pa do više metara kod temelja velikih mostova i platformi. Dužine im se mogu kretati od par metara do više od stotinu metara pri čemu se ove posljednje



Slika 6-1 Jedno od mogućih razvrstavanja pilota (prema Simons i Menzies, 2000)

opet susreću kod naftnih ili plinskih platformi u moru kao i kod temelja velikih mostova.

Na nosivost i deformacije pilota bitno utječu ne sama građa i dimenzije tijela pilota, već i način izvedbe, posebno njegove ugradnja u tlo. Da bi se pri projektiranju pilota ovi utjecaji razumno obuhvatili, poželjno je vrste pilota razvrstati na način koji odražava razlike u njihovom kasnijem ponašanju. Jedno takvo razvrstavanje prikazuje slika 6-1. Prikazano razvrstavanje provedeno je prvenstveno prema načinu njihove ugradnje. Tako će zabijeni piloti pri svom prodiranju razmicati tlo te time povećavati bočni pritisak tla na njegovo tijelo. O bočnom pritisku razmjerno ovisi i nosivost pilota pa će povećani bočni pritisak povećati i nosivost pilota. S druge strane, pri izvedbi bušenog pilota do razmicanja tla neće doći, već može doći čak do blagog skupljanja bušotine, a time i do smanjenja bočnog pritiska tla na pilot.

Zabijeni piloti zabijaju se danas u tlo posebnim napravama. To su obično dizelska zabijala ili dizelske makare, motorni vibrator ili rjeđe statički utiskivači. Dizelska zabijala sastoje se iz čeličnog cilindra i k čeličnog klipa koji je povezan s odgovarajućim utego u jednu cjelinu. Takvo se zabijalo priključi preko nakovnja na glavu (gornji kraj) pilota. U cilindar zabijala ubrizga se dizelsko gorivo, a klip s utegom se pusti da padne. Pri padu klip

sabije i ugrije zrak koji zapali gorivo. Gorivo pri eksploziji poveća pritisak nastalog plina, a ovaj pak uzdigne klip. Pri tome se ispusti izgorjela smjesa goriva i zraka iz cilindra. Nakon što dosegne najvišu točku, klip počne padati pa započinje novi ciklus rada zabijala. Nekad su ta zabijala radila na vodenu paru, no danas se takve naprave rijetko susreću. Rad makare pri zabijanju je vrlo bučan i izaziva prilično zamjetne i neugodne vibracije u tlu. Nakon udara klipa u nakovanj, pilotom se šire dinamički valovi koji izazivaju znatna naprezanja u pilotu. Da bi pilot pri zabijanju svladao otpor tla, a da pri tome ne bude napregnut preko do granice oštećenja, mora se unaprijed izabrati makara pogodnih karakteristika. Širenje se elastičnih valova u pilotu prilikom zabijanja može relativno jednostavno pratiti što omogućuje korisne interpretacije kako za kontrolu naprezanja tako i za procjenu buduće nosivosti pilota. Zabijeni piloti izvode se iz čelika različitih profila, armiranog ili prednapetog betona, a danas rijetko i od drveta. Mogu se izvoditi kao uspravni ili kao kosi i mogu biti stalnog ili promjenjivog presjeka, obično pri dnu uži, a pri vrhu širi.

Bušeni piloti¹ izvode se obično lijevanjem betona u prethodno izvedenu bušotinu. Bušotina se izvodi posebnim bušačkim strojem („garniturom“) uz korištenje posebnih svrdala, nabijača, grabilica i drugih naprava. Da bi se osigurala bušotina od urušavanja, u rastresitom i slabijem tlu potrebno ju je osigurati. To se može bilo uz pomoć cijevi koja se utiskuje u bušotinu kako napreduje iskop ili uz pomoć isplake, vode s dodatkom nekoliko postotaka visoko plastične gline (bentonit) i ponekad nekih drugih kemijskih dodataka. Razina se isplake drži iznad razine podzemne vode čime se nameće procjeđivanje isplake iz bušotine u okolno tlo. Time se postiže stabilnija stjenka bušotine. Kako se voda djelomično filtrira prije ulaska u okolno tlo, stvara se na stjenci bušotine tanki sloj slabo propusnog bentonita koji prenosi tlak vode na skelet okolnog tla i time dodatno učvršćuje stjenku bušotine. U gotovu bušotinu, kojoj je prethodno dobro očišćeno dno, spušta se koš čelične armature, a zatim se bušotina ispunjava svježim betonom. Ugradnja betona mora se provesti posebnim postupkom ulijevanja kroz „kontraktorsku“ cijev („kontraktor“ postupak) na dno bušotine. Kontraktorska cijev mora neprestano ostati u masi svježeg betona kako bi se izbjeglo miješanje betona i isplake što bi vrlo nepovoljno djelovalo na kvalitetu budućeg betona. Armaturni koš se može ugraditi i nakon betoniranja spuštanjem uz pomoć vibracija u svježi beton. Glavu novog pilota treba nakon stvrdnjavanja osloboditi betona koji je loše kvalitete jer je

¹ U SAD samo zabijene pilote nazivaju pilotima (engl. *pile*), dok bušene pilota nazivaju stupovima (engl. *shaft*).

bio u dodiru s bentonitnom isplakom. Zbog uvjeta ne miješanja betona s isplakom, dno kontraktor cijevi mora stalno biti u svježem betonu, a to traži da se betoniranje pilota izvede u jednom mahu bez ikakvih prekida. Bušeni se piloti uglavnom izvode uspravni, ali se uz određene poteškoće mogu izvesti i blago zakošeni.

Osim zabijenih i bušenih pilota, razvijen je i niz drugih postupaka i tehnika od kojih su mnoge patentirane u vlasništvu pojedinih izvođača. Među takvim pilotima bili su i uvtani (sistemi Atlas i drugi)².

Piloti se rijetko izvode kao izolirani stupovi, veće se češće smještaju u grupe povezane na glavama naglavnom gredom ili pločom. Osni razmak u pilotu u grupi može biti različit, ali se obično kreće od dva do deset promjera pilota. Naglavna ploča se redovito izvodi od armiranog betona u koju su piloti uklješteni.

Obzirom da pouzdanost prognoze nosivosti i deformacija pilota nije jako velika, često se provode probna ispitivanja nosivosti, pogotovo ako projekt obuhvaća veći broj pilota. Probnim ispitivanjima dolazi se do pouzdanijih pokazatelja nosivosti i općenito ponašanja pilota što omogućuje korekciju osnovne projektne zamisli.

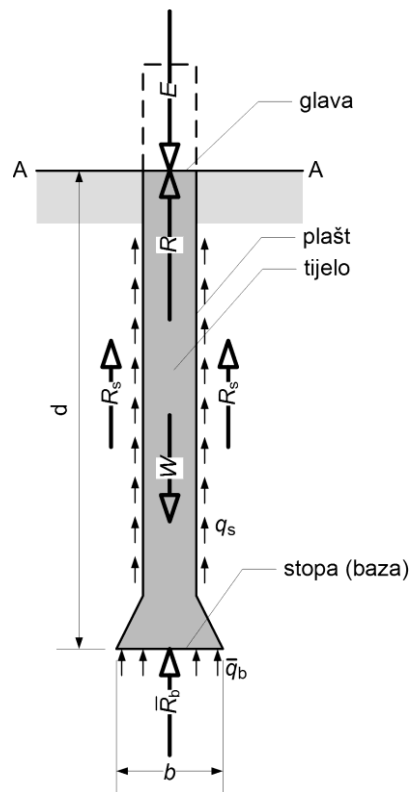
6.2. Uzdužno opterećeni piloti

Nosivost pojedinačnog pilota na uzdužno opterećenje

Opterećenje pojedinačnog pilota prikazuje slika 6-2. Opterećenje pilota E prenosi se preko glave pilota na tijelo pilota. Tom se opterećenju pridružuje težina pilota W (i težina tla iznad baze pilota ako je ova šira od tijela). Tim se težinama suprotstavlja otpor tla na bazi \bar{R}_b i otpor po plaštu pilota, R_s . Nosivost ili otpornost pilota R na vertikalno opterećenje definira se kao otpor pilota vertikalnom opterećenju na ravnini A-A pri slomu tla, kad pilot počne nekontrolirano tonuti u tlo. Prema oznakama sa slike 6-2, nosivost je dna izrazom

$$R = \bar{R}_b - W + R_s \quad (6.1)$$

² vidi na pr. detaljnije u Fleming i dr. (1992), Tomlinson (1995)



Slika 6-2 Uzdužno opterećeni pilot

Veličina $R_b = \bar{R}_b - W$ reducirana je otpornost baze pilota i jednaka je otpornosti baze umanjenoj za težinu pilota (i tla iznad baze ako je ova šira od tijela pilota). Otpornost na bazi pilota može se izraziti kao

$$\bar{R}_b = \bar{q}_b A_b \quad (6.2)$$

gdje je \bar{q}_b prosječni kontaktni pritisak između baze pilota i tla (jedinična otpornost na bazi), a A_b je površina baze. Slično se može izraziti i otpornost po plaštu pilota

$$R_s = \int_0^d q_s C dy \quad (6.3)$$

gdje je q_s jedinična otpornost po plaštu, C je opseg poprečnog presjeka pilota, d je duljina pilota ispod površine terena, a y je dubina ispod površine terena.

Ako se s q_b označi reducirana jedinična otpornost baze pilota

$$q_b = \frac{R_b}{A_b} = \frac{\bar{R}_b - W}{A_b} \quad (6.4)$$

te ako se usvoji uobičajeno pojednostavljenje da je jedinična težina pilota približno jednaka jediničnoj težini tla, odnosno da vrijedi

$$W \approx \sigma_{y;y=d} A_b \quad (6.5)$$

gdje je $\sigma_{y;y=d}$ vertikalno naprezanje u tlu na razini baze, slijedi iz (6.4)

$$q_b = \bar{q}_b - \sigma_{y;y=d} \quad (6.6)$$

Uz to pojednostavljenje nosivost pilota na razini tla može se izraziti kao

$$R = R_b + R_s = q_b A_b + \int_0^d q_s C dy \quad (6.7)$$

Ako se primijeni izraz za nosivost tla ispod plitkog temelja kao okvir za izraz za nosivost tla na bazi, odnosno ako se prihvati da nosivost baze može izraziti kao

$$\bar{q}_b = cN_c + \frac{1}{2}b\gamma N_\gamma + \sigma_{y;y=d} N_q \quad (6.8)$$

i ako se zanemari srednji član na desnoj strani gornjeg izraza jer se pokazuje malim u odnosu na druga dva člana, slijedi za reduciranu nosivost na bazi

$$q_b = cN_c + \sigma_{y;y=d}(N_q - 1) \quad (6.9)$$

U slučaju nedreniranih uvjeta za sitnozrno tlo ($c \rightarrow c_u, \varphi \rightarrow 0$) vrijedi $N_q = 1$ pa se izraz (6.9) reducira na jednostavan oblik

$$q_b = c_u N_c \quad (6.10)$$

U slučaju dreniranih uvjeta za krupnozrno tlo ($c \rightarrow c' = 0, \varphi \rightarrow \varphi', \sigma_{y;y=d} \rightarrow \sigma'_{y;y=d}$), izraz (6.9) reducira se na oblik

$$q_b = \sigma'_{y;y=d}(N_q - 1) \quad (6.11)$$

U praksi se izraz (6.10) koristi za određivanje nosivosti na bazi pilota u sitnozrnim tlima, a izraz (6.11) za određivanje nosivosti na bazi pilota u sitnozrnim tlima.

Ako se pretpostavi Coulombov zakon čvrstoće za jedinični otpor tla na plaštu pilota, može se pisati

$$q_s = a + \sigma_x \tan \delta \quad (6.12)$$

gdje su a i δ parametri trenja između tla i plašta pilota. Uobičajeno je da se za nedrenirane uvjete za sitnozrno tlo stavi $a = \alpha c_u$ i $\delta = 0$ (α -metoda) pa će jedinična otpornost po plaštu iznositi

$$q_s = \alpha c_u \quad (6.13)$$

Također je uobičajeno da se u dreniranim uvjetima za krupnozrno tlo pretpostavi da je $a' = 0$, te stavi $\sigma_x \tan \delta = \beta \sigma_y'$, pa će tada izraz (6.12) poprimiti oblik (β -metoda)

$$q_s = \beta \sigma_y' \quad (6.14)$$

Kako mnogi parametri. često teško mjerljivi, utječu na veličine α i β u izrazima (6.13) i (6.14) te na veličinu N_c u izrazu (6.10) odnosno veličinu N_q u izrazu (6.11), najbolji način za njihovo određivanje su povratne analize iz dobro opažanih probno opterećenih pilota u tlu koje odgovara karakteristikama tla za koje se traži predviđanje. Upravo je taj postupak proveo niz autora na širokoj bazi probno opterećenih pilota za različite prilike u tlu. Ova su istraživanja pokazala da treba razlikovati zabijene od bušenih pilota, što je razumljivo iz razloga objašnjenih u uvodu ovog poglavlja. Na slijedećoj tablici su prikazani često korišteni empirijski izrazi za proračun nosivosti pojedinačnog pilota za vertikalno opterećenje (Tablica 6-1). Za zabijene pilote to su preporuke Američkog instituta za naftu (API 1987), a za bušene pilote preporuke Reesa i dr. (Rees i dr. 2006).

Tablica 6-1 Empirijski izrazi za jediničnu otpornost na stopi q_b i jediničnu otpornost po plaštu q_s pojedinačnog uzdužno opterećenog pilota

vrsta pilota	nedrenirano stanje (sitnozrna tla)	drenirano stanje (krupnozrna tla)																												
zabijeni (API 1987)	$q_b = 9c_u$ $(c_u \text{ odrediti kao srednju vrijednost u području } d \leq y \leq d + 2b)$ $q_s = \alpha c_u$ $\alpha = 0.5 \left(\frac{c_u}{\sigma'_y}\right)^{-0.5}$ za $\frac{c_u}{\sigma'_y} \leq 1$ $\alpha = \min\left(1, 0.5 \left(\frac{c_u}{\sigma'_y}\right)^{-0.25}\right)$ za $\frac{c_u}{\sigma'_y} > 1$	$q_b = \sigma'_{y;y=d}(N_q - 1)$ $q_s = K \sigma'_y \tan \delta$ $(K = 0.8 \text{ cjevasti pilot})$ $K = 1.0 \text{ puni pilot})$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>N_{SPT}</th> <th>$N_q - 1$</th> <th>δ</th> <th>$q_{s;\text{max}}$</th> </tr> <tr> <th>(-)</th> <th>(-)</th> <th>($^\circ$)</th> <th>(MPa)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0- 4</td> <td>8</td> <td>15</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>4-10</td> <td>12</td> <td>20</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>10-30</td> <td>20</td> <td>25</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>30-50</td> <td>40</td> <td>30</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>50+</td> <td>50</td> <td>35</td> <td>12</td> </tr> </tbody> </table>	N_{SPT}	$N_q - 1$	δ	$q_{s;\text{max}}$	(-)	(-)	($^\circ$)	(MPa)	0- 4	8	15	2	4-10	12	20	3	10-30	20	25	5	30-50	40	30	10	50+	50	35	12
N_{SPT}	$N_q - 1$	δ	$q_{s;\text{max}}$																											
(-)	(-)	($^\circ$)	(MPa)																											
0- 4	8	15	2																											
4-10	12	20	3																											
10-30	20	25	5																											
30-50	40	30	10																											
50+	50	35	12																											
bušeni (Rees i dr. 2006)	$q_b = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{d}{b}\right) c_u N_c$ za $\frac{d}{b} < 3$ $q_b = c_u N_c$ za $\frac{d}{b} \geq 3$ <table border="1"> <thead> <tr> <th>c_u (MPa)</th> <th>N_c</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.025</td> <td>6.5</td> </tr> <tr> <td>0.050</td> <td>8.0</td> </tr> <tr> <td>0.100</td> <td>8.7</td> </tr> <tr> <td>0.200</td> <td>9.0</td> </tr> </tbody> </table> $(\text{za } c_u > 0.2 \text{ MPa tretiraj tlo kao stijenu})$ $q_s = \alpha c_u$ $\alpha = 0.55$ za $\frac{c_u}{p_a} \leq 1.5$ $\alpha = 0.55 - 0.1 \left(\frac{c_u}{p_a} - 1.5\right)$ za $1.5 \leq \frac{c_u}{p_a} \leq 2.5$ za $\frac{c_u}{p_a} > 2.5$ tretiraj tlo kao stijenu; $p_a = 0.1 \text{ MPa}$ zanemari gornjih 1.5 m ispod površine terena i donjih b m u sitnozrnom tlu	c_u (MPa)	N_c	0.025	6.5	0.050	8.0	0.100	8.7	0.200	9.0	$q_b = 60 N_{60} \frac{d}{10b}$ za $\frac{d}{b} \leq 10$ $q_b = 60 N_{60}$ za $\frac{d}{b} > 10$ $\max q_b = 3.0 \text{ MPa}$ $q_s = \beta \sigma'_y$ $\max q_s = 0.2 \text{ MPa}$ <u>pijesak</u> $\beta = \min\left(0.25, \bar{N} \left(1.5 - 0.25 (y(\text{m}))^{0.5}\right)\right)$ $\bar{N} = \frac{N_{60}}{15}$ za $N_{60} < 15$ $\bar{N} = 1$ za $N_{60} \geq 15$ <u>šljunak</u> $\beta = \bar{\beta}$ za $0.25 \leq \bar{\beta} \leq 1.8$ $\beta = 0.25$ za $\bar{\beta} < 0.25$ $\beta = 1.8$ za $\bar{\beta} > 1.8$ $\bar{\beta} = 2 - 0.15 (y(\text{m}))^{0.75}$ <u>vlačni pilot</u> $q_{s;\text{vlak}} \sim 0.75 q_{s;\text{tlak}}$ Pouzdanost za q_s : $\pm 30 \%$																		
c_u (MPa)	N_c																													
0.025	6.5																													
0.050	8.0																													
0.100	8.7																													
0.200	9.0																													

Neki autori spore opravdanost korelacije parametara otpornosti baze i otpornosti po plaštu s nedreniranom čvrstoćom i zagovaraju teoretski opravdanije korelacije s efektivnim parametrima čvrstoće (Fellenius 1999). Makar je prigovor opravdan, problem je što se u literaturi nalazi vrlo malo podataka o probno ispitanim pilotima za koje ujedno postoje podaci o efektivnim parametrima čvrstoće tla. Postojeći fond podataka omogućuju samo vrlo grube korelacije. Kao primjer tablice 6-2 i 6-3 prikazuju takve preporuke prema kojima se nosivost pilota određuje uvijek za drenirane uvjete.

Tablica 6-2 Raspon vrijednosti koeficijenta $N_q - 1$ za proračun jedinične otpornosti na stopi pilota q_b u efektivnim naprezanjima (Fellenius 1999)

Vrsta tla	efektivni kut trenja $\varphi'(^{\circ})$	$N_q - 1$ (*)
glina	25-30	3-30
prah	28-34	20-40
pijesak	32-40	30-150
šljunak	35-45	60-300

(*) služi za proračun $q_b = \sigma'_{y;y=d}(N_q - 1)$

Tablica 6-3 Raspon vrijednosti koeficijenta β za proračun jedinične otpornosti na plaštu pilota q_s u efektivnim naprezanjima (Fellenius 1999)

Vrsta tla	efektivni kut trenja $\varphi'(^{\circ})$	β (*)
glina	25-30	0.25-0.35
prah	28-34	0.27-0.50
pijesak	32-40	0.30-0.60
šljunak	35-45	0.35-0.80

(*) služi za proračun $q_s = \beta \sigma'_{y;y=d}$

Osim navedenih empirijskih izraza, u literaturi je navedeno još niz drugih. Tablice 6-4, 6-5 i 6-6 prikazuju preporuke njemačke norme DIN 1054 (2005) za jednične otpornosti na stopi i na plaštu. Usporedbom različitih prijedloga mogu se uočiti znatne razlike među rezultatima. Preporuča se u praksi koristiti više metoda kako bi se lakše ocijenilo u kojem se rasponu mogu očekivati stvarne veličine nosivosti. Također se preporuča da se tlo ispita na više načina (CPT, SPT, laboratorij) te da se usporede rezultati i utvrdi raspon nosivosti. Ako se nosivost pilota određuje računski iz prikazanih ili sličnih izraza, preporuča se primjena konzervativnog

rješenja s „faktorom sigurnosti“³ od barem 2.5 do 3. Kod značajnijih građevina svakako bi trebalo provesti probna ispitivanja pilota na terenu.

Tablica 6-4 Ovisnost jedinične otpornosti na stopi i na plaštu bušenih pilota u krupnozrnrom tlu (DIN 1054); dubina ukopavanja u nosivo tlo barem 2.5 m, promjer pilota između 0.3 i 3 m, piloti izvedeni uz pomoć zacjevljenja ili isplake, nosivo tlo ispod stope barem 3*b* ili 1.5 m

Prosječna vrijednost otpora šiljka CPT, q_c (MPa)	q_b (MPa)	q_s (MPa)
0		0
5		0.04
10	2	0.08
15	3	0.12
20	3.5	0.12
25	4	0.12

Tablica 6-5 Ovisnost jedinične otpornosti na stopi i na plaštu bušenih pilota u sitnozrnrom tlu (DIN 1054); dubina ukopavanja u nosivo tlo barem 2.5 m, promjer pilota između 0.3 i 3 m, piloti izvedeni uz pomoć zacjevljenja ili isplake, nosivo tlo ispod stope barem 3*b* ili 1.5 m

nedrenirana čvrstoća, c_u (MPa)	q_b (MPa)	q_s (MPa)
0.025		0.025
0.10	0.8	0.040
0.20	1.5	0.060
veće od 0.20		0.060

Tablica 6-6 Ovisnost jedinične otpornosti na stopi i na plaštu bušenih pilota u stijeni (DIN 1054); dubina ukopavanja u nosivo tlo barem 2.5 m, promjer pilota između 0.3 i 3 m, piloti izvedeni uz pomoć zacjevljenja ili isplake, nosivo tlo ispod stope barem 3*b* ili 1.5 m

jednoosna čvrstoća, q_u (MPa)	q_b (MPa)	q_s (MPa)
0.5	1.5	0.08
5.0	5.0	0.50
20.0	10.0	0.50

³ faktor sigurnosti = nosivost/karakteristično opterećenje

Slijeganje pojedinačnog pilota pod uzdužnim opterećenjem i aktiviranje komponenti otpornosti

Brojna mjerenja probno opterećenih pilota upućuju na zaključak da se otpornost po plaštu pilota u potpunosti aktivira već pri vrlo malim slijeganjima pilota, dok je za postizanje pune otpornosti na stopi pilota potrebno znatno veće slijeganje pilota, negdje reda veličine $\frac{1}{10}$ njegova promjera. To će se odraziti i na oblik krivulje slijeganja koja prikazuje odnos slijeganja pilota i veličine nametnutog vertikalnog opterećenja.

Teoretsko određivanje krivulje slijeganja, usprkos brojnim manje ili više složenim teorijama, često nije u skladu s mjerenjima probno opterećenih pilota. S druge strane, usporedba i analiza rezultata mjerenja brojnih probno opterećenih pilota ukazuje u većini slučajeva na postojanje pravilnosti među krivuljama koje pokazuju odnosa slijeganja pilota i otpora na njegovoj stopi. Ako se te krivulje normaliziraju tako da se otpor baze za neku vrijednost slijeganja podijeli s njenim otporom pri slijeganju koje odgovara 1/10 promjera pilota (koji se javlja približno pri slomu tla ispod stope), a slijeganje pilota s njegovim promjerom, brojne eksperimentalno mjerene krivulje padaju u jedan uski raspon tvoreći gotovo jedinstvenu krivulju odnosa normaliziranog slijeganja i normaliziranog otpora stope.

Pojednostavljeni oblik normalizirane poligonalne krivulje slijeganja stope pilota prihvatio je i njemački DIN 1054 u obliku kao prikazuje slika 6-3. Vrijednosti karakterističnih točaka na toj poligonalnoj krivulji prikazane su na tablici 6-7 za krupnozrno tlo, a na tablici 6-8 za sitnozrno tlo.

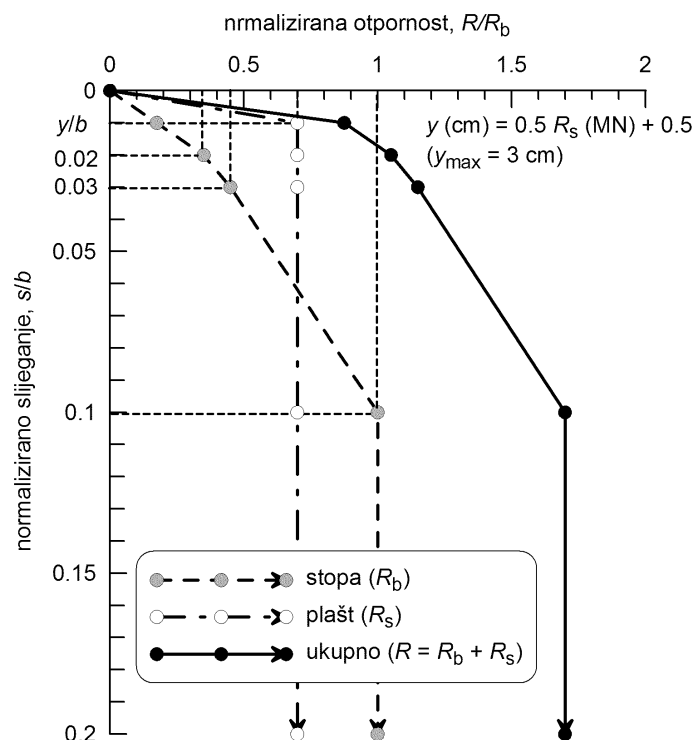
Tablica 6-7 Normalizirane otpornosti tla na stopi pilota $\frac{R_b(s)}{R_b(s=0.1b)}$ ovisno o normaliziranom slijeganju s/b pilota za različito zbijena krupnozrna tla; s = slijeganje pilota, b = promjer pilota

s/d	srednje zbijeni		dobro zbijeni		Rees, O'Neill (1988)
	(DIN 1054:2005)				
	otpor šiljka CPT-a, q_c (MPa)				
	10	15	20	25	
0	0	0	0	0	0
0.02	0.35	0.35	0.40	0.44	0.37
0.03	0.45	0.45	0.51	0.56	0.51
0.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Tablica 6-8 Normalizirane otpornosti tla na stopi pilota $\frac{R_b(s)}{R_b(s=0.1b)}$ ovisno o normaliziranom slijeganju s/b pilota za sitnozrna tla različitih nedreniranih čvrstoća; s = slijeganje pilota, b = promjer pilota

s/d	srednje do polučvrsto teško gnječivo (DIN 1054:2005)		Rees, O'Neill (1988)
	nedrenirana čvrstoća, c_u (MPa)		
	0.10	0.20	
0	0	0	0
0.02	0.44	0.60	0.77
0.03	0.56	0.73	0.88
0.10	1.00	1.00	1.00

Za usporedbu, na istim tablicama su prikazane i prosječne normalizirane vrijednosti prema sličnom istraživanju za bušene pilote Reesa i O'Neilla (1988).



Slika 6-3 Idealizirani oblik normaliziranih krivulja slijeganja za otpornost tla na stopi, na plaštu i čitav pilot (prema DIN 1054:2005)

Na slici 6-3 prikazana je i idealizirana bi-linearna krivulja mobilizacije trenja po plaštu pilota (R_s). Veličina slijeganja pilota y pri kojoj se u potpunosti mobilizira trenje po plaštu prema DIN 1054:2005 iznosi

$$y(\text{cm}) = 0.5 R_s(\text{MN}) + 0.5 \leq 3 \quad (6.15)$$

Pomoću ovih krivulja se, za određenu otpornost na stopi pilota, R_b , i za određenu otpornost na plaštu pilota, R_s , može zbrajanjem za isto slijeganje rekonstruirati prognozna krivulja slijeganja pilota koja bi se, na primjer, dobila probnim opterećenjem

$$R(s) = R_b(s) + R_s(s) \quad (6.16)$$

Takva se krivulja može u praksi koristiti za prognozu slijeganja pojedinačnog pilota pri nekoj zadanoj vertikalnoj sili.

Negativno trenje

Prilikom ugradnje pilota deformira se okolno tlo i rastu tlakovi vode. Uslijed toga započinje proces konsolidacije koji prati slijeganje tla. Kako je pilot znatno krući od tla, slijeganje tla će izazvati relativne pomake na sučelju pilota i tla, a ovo pak posmična naprezanja. U gornjim dijelovima pilota ta će naprezanja vući pilot prema dolje, znači u suprotnom smjeru od smjera posmičnih naprezanja koja nastaju prilikom opterećivanja pilota. Zbog toga se ta posmična naprezanja nazivaju negativnim trenjem. Negativno trenje opterećivat će pilot i tiskati ga u dubinu. To će pak izazvati reakciju tla u donjem dijelu pilota u istom smjeru kao i pri običnom opterećivanju pilota. Negdje unutar visine pilota postojat će vodoravna ravnina kao granica između običnog i negativnog trenja. Ta se ravnina naziva neutralnom. Presjek neutralne ravnine s pilotom mjesto je najveće uzdužne sile u pilotu nastale konsolidacijom tla. U praksi treba provjeriti otpornost tijela pilota na tu silu. Ona se može izračunati iz raspodjele pune veličine otpornosti tla na plaštu što je obično prihvatljiva pretpostavka jer su dovoljni vrlo mali relativni pomaci tla i pilota za puno aktiviranje te otpornosti. Mada negativno trenje ponekad zabrinjava inženjere jer misle da ono smanjuje otpornost tla za normalno uzdužno opterećenje pilota, ta bojazan ne stoji jer će pri prvom jačem vanjskom uzdužnom opterećenju trenje u gornjim dijelovima pilota promijeniti smjer, i tlo neće izgubiti na svojoj otpornosti. Jedina posljedica negativnog trenja je povećana uzdužna sila u pilotu. Ta će

sila s dubinom rasti od veličine uzdužne sile na glavi pilota pa sve do neutračne ravnine. Nakon toga uzdužna će sila padati do veličine optornosti tla na stopi pilota. Pri dimenzioniranju pilota tu uzdužnu silu treba uzeti u obzir.

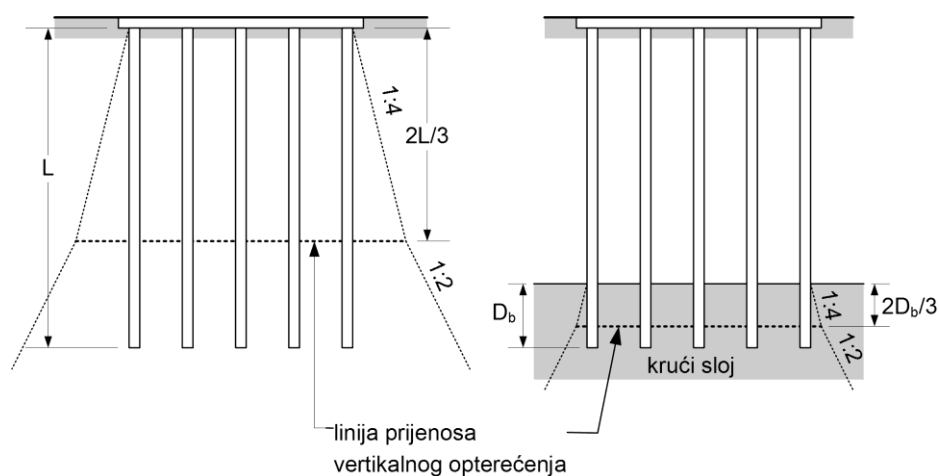
Negativno trenje može se javiti i od drugih uzroka. Jedan može biti opterećenje na površini tla u okolini pilota, a drugi može biti snižavanje razine podzemne vode.

Otpornost i slijeganje tla za vertikalno opterećenu grupu pilota

Grupa pilota je gotovo redoviti oblik temeljne konstrukcije koja uključuje pilote. Sastoji se iz naglavne grede ili naglavne ploče koja pri površini tla povezuje pojedinačne pilote u grupi. Prijenos opterećenja s naglavne konstrukcije u pilote i u tlo je složen pa korektno modeliranje takve konstrukcije dovodi do vrlo složenih, opsežnih i do nedavno praktički neprovedivih proračuna. Iz tog su razloga inženjeri pribjegli bitnom pojednostavljenju problema koje omogućuje ipak neke približne procjene. U dosadašnjoj primjeni takvi su se postupci potvrdili barem u slučajevima kad precizne prognoze deformacija i otpornosti nisu bitne. U značajnijim projektima potrebno je takav proračun interakcije provesti primjenom neke od suvremenih numeričkih metoda.

Jedan jednostavan postupak omogućuje grubu procjenu otpornosti tla za vertikalno opterećenu grupu pilota. Taj se postupak svodi na slijedeće: otpornost tla za grupu vertikalno opterećenih pilota jednaka je manjoj vrijednosti od zbroja otpornosti tla za pojedinačne pilote i otpornosti tla za blok koji omeđuje pilote u grupi s naglavnom konstrukcijom, i tretira se kao masivni pojedinačni plitki temelj.

Za slijeganje grupe pilota također se često koristi jedan pojednostavljeni model prikazan na slici 6-4. Zamisao je da se pretpostavi neko „širenje“ vertikalnog naprezanja u tlu od naglavnice u dubinu tla pod nekim nagibom, ovdje $H:V = 1:4$ u homogenom tlu. Na dvije trećine dubine pilota nalazi se vodoravna ravnina. Presječna te ravnine s formom širenja naprezanja čini tlocrtni lik na koji treba jednoliko raspodijeliti vanjsko opterećenje na grupu. Slijeganje grupe je tada slijeganje uslijed opterećenja tog tlocrtnog lika, a koji se računa uobičajenim postupcima proračuna slijeganja za plitke temelje.



Slika 6-4 Uz približni proračun raspodjele vertikalnih naprezanja ispod grupe pilota: (a) u tlu približno homogene krutosti ("plutajući" piloti), i (b) za slučaj kad piloti prenose vertikalno opterećenje u krući sloj (piloti koji nose preko kraja)

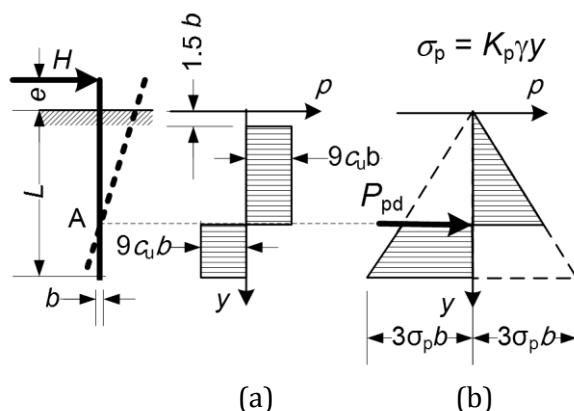
6.3. Poprečno opterećeni piloti

Nosivost na poprečno opterećenje prema Bromsu

PRETPOSTAVKE BROMSOVE TEORIJE

Broms (1964a i b⁴) je predložio teoriju nosivosti pilota na poprečno opterećenje za dva jednostavna praktična slučaja: prvi koji razmatra vodoravno opterećeni pilot u homogenom sloju tla s konstantnom nedreniranom čvrstoćom c_u , i drugi, koji razmatra vodoravno opterećeni pilot u krupnozrnom tlu konstantnog kuta trenja φ' . Na temelju onda poznatog manjeg broja ispitivanja vodoravno opterećenih pilota objavljenih u literaturi, Broms je zaključio da se podijeljeni otpor p pri slomu tla može aproksimirati veličinom $9c_u b$ za sitnozrna tla u nedreniranim uvjetima, a veličinom $3\sigma_p b$ za krupnozrna tla u dreniranim uvjetima (Slika 6-5.) Pri tome je $\sigma_p = K_p \gamma y$ mogući pasivni otpor tla prema Rankineovim uvjetima uz $K_p = \tan^2(45^\circ + \varphi')$, a γ je jedinična težina tla, pretpostavljena kao

⁴ vidi i Poulos i Davis (1980)

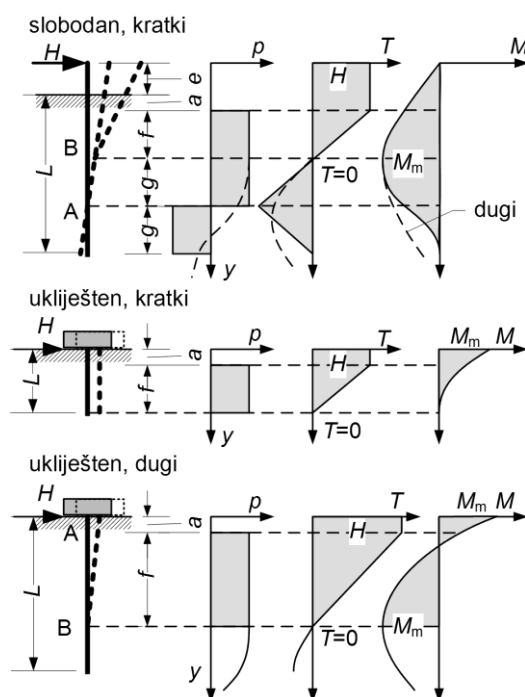


Slika 6-5 Raspodjela podijeljenog otpora p pri slomu tla vodoravno opterećenog pilota promjera b : (a) sitnozrno tlo, nedrenirano stanje, (b) krupnozrno tlo, drenirano stanje (prema Broms, 1964a i 1964b)

konstantna s dubinom⁵. Također je utvrdio da je kod sitnozrnog tla otpor pri površini tla manji pa je predložio pojednostavljenje pri kojem se zanemaruje otpor tla u tom slučaju do dubine od 1.5 širine pilota b .

Pri vodoravnom opterećenju pilot se zakreće oko točke A (Slika 6-5). To znači da će se prijelazom u veću dubinu od točke A smjer otpora tla promijeniti. Za zadanu vodoravnu silu H i njeno hvatište e dužina ukopanog dijela pilota L mora biti takova da otpornosti tla duž pilota i sila H budu u ravnoteži. Ujedno u svakom presjeku pilota otpornost presjeka na savijanje mora biti veća od momenta savijanja. U suprotnom doći će do plastičnog popuštanja presjeka. U svojim analizama Broms je pretpostavio da je karakter plastičnog popuštanja presjeka pilota duktilan što znači da će i nakon plastičnog popuštanja presjek pri daljnjem savijanju zadržati istu otpornost. Za slučaj raspodjele otpora u slučaju krupnozrnog tla, Broms je u analize uveo pojednostavljenje da se otpor tla ispod točke rotacije A može zamijeniti jednom koncentriranom pasivnom silom otpora P_{pd} . Prema Poulosu i Davisu (1980), ovo pojednostavljenje daje veće sile H za zadani pilot nego bez njega, u nekim slučajevima i preko 30 %. Međutim, prednost pojednostavljenja su znatno jednostavniji izrazi koji se dobiju analizom, pogotovo uzme li se u obzir usporedba s ispitanim pilotima te jednostavnu pretpostavku o veličini otpornosti tla p , koje ne opravdavaju veću analitičku točnost.

⁵ To je u slučaju „suhog“ tla; u slučaju da je podzemna voda pri površini terena, umjesto γ treba u izraze uvrstiti γ' , tj. $\gamma \leftarrow \gamma'$.



Slika 6-6 Raspodjela pritisaka, poprečnih sila i momenata savijanja u vodoravno opterećenom pilotu u glini (prema Broms, 1964a)

Broms je analizirao posebno slučaj za sitnozrno tlo, a posebno za krupnozrno tlo. U oba slučaja razmatrao je i slučaj da je pilot na vrhu ukliješten u naglavnu konstrukciju koja se ne može zakretati oko vodoravne osi. Također se može dodati da se rješenja za krupnozrno tlo mogu koristiti i u slučaju nedreniranih uvjeta za normalno konsolidirano sitnozrno tlo, kod kojeg nedrenirana čvrstoća raste razmjerno dubini sa zakonitošću da je $\frac{c_u}{\sigma'_v} = \text{konst.}$, ako se veličina K_p zamijeni s $3c_u/\sigma'_v$

$$K_p \leftarrow 3 \frac{c_u}{\sigma'_v} \quad (6.17)$$

SITNOZRNAO TLO, SLOBODNI VRH

U analizu je pogodno uvesti normalizirane veličine $\bar{e} = \frac{e}{b}$, $\bar{L} = \frac{L}{b}$, $\bar{a} = \frac{a}{b} = 1.5$, $\bar{y} = \frac{y}{b}$, normalizirano opterećenje $\bar{H} = \frac{H}{c_u b^2}$, normaliziranu otpornost tla $\bar{p} = \frac{p}{c_u b} = 9$ i normalizirani najveći moment savijanja u pilotu $\bar{M}_m = \frac{M_m}{c_u b^3}$. Za pilot sa slobodnim vrhom, prema slici 6-6 (slobodan, kratki), uvjet

vodoravne ravnoteže daje za \bar{f} ($\bar{f} + \bar{a}$ je dubina na kojoj je poprečna sila T u pilotu jednaka nuli)

$$\bar{f} = \frac{1}{9}\bar{H} \quad (6.18)$$

Ravnoteža momenata obzirom na hvatište sile H daje

$$\bar{g}^2 = \bar{f} \left(\bar{e} + \bar{a} + \frac{1}{2}\bar{f} \right) \quad (6.19)$$

odnosno za normalizirano opterećenje $\bar{p} = 9$ i uz izraz (6.18) slijedi za normalizirani najveći moment savijanja

$$\bar{M}_m = 9\bar{g}^2 = \bar{H} \left(\bar{e} + \bar{a} + \frac{1}{18}\bar{H} \right) \quad (6.20)$$

Normalizirana dužina ukopanog dijela pilota je tada

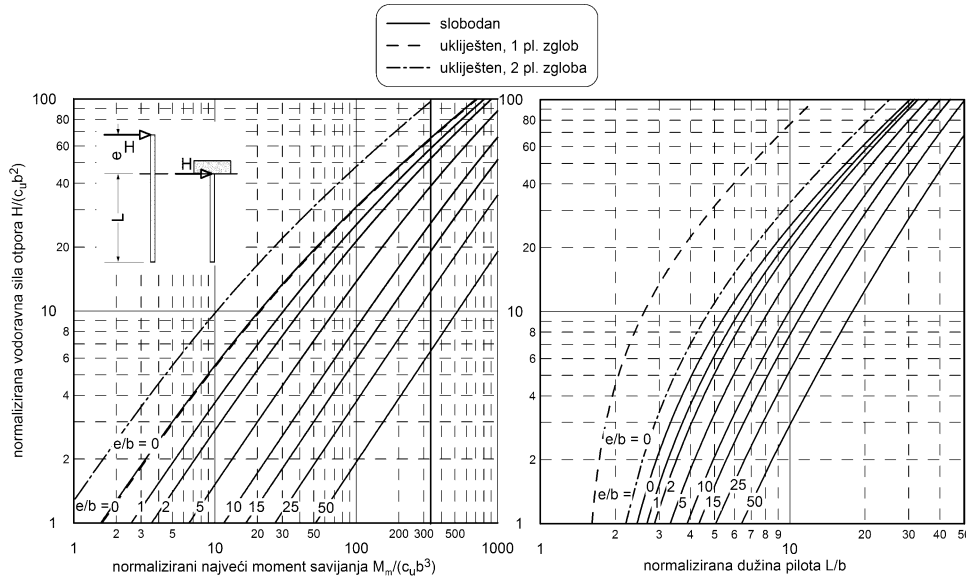
$$\bar{L} = \bar{e} + \bar{a} + \bar{f} + 2\bar{g} = \bar{e} + \bar{a} + \frac{1}{9}\bar{H} + \sqrt{\frac{1}{9}\bar{H} \left(\bar{e} + \bar{a} + \frac{1}{18}\bar{H} \right)} \quad (6.21)$$

Veće opterećenje tražit će i veću dužnu pilota da bi se održala ravnoteža. To povećanje ima smisla sve dok najveći moment savijanja M_m ne dosegne otpornost na savijanje presjeka pilota. Kad je dosegnuta ta otpornost na savijanje, moguće je daljnje savijanje pilota bez povećanja otpora presjeka i bez povećanja otpora tla, odnosno, dosegnuta je ukupna horizontalna nosivost pilota.

U praktičnoj primjeni, za zadanu silu H treba prvo odrediti najveći moment savijanja iz izraza (6.20), zatim izabrati presjek pilota koji će imati dovoljnu otpornost na taj moment savijanja, te konačno odrediti najmanju potrebnu duljinu pilota iz izraza (6.21). Ovi su izrazi predočeni grafički dijagramima na slici 6-7.

SITNOZRNO TLO, UKLIJEŠTENI VRH

Razmatrajući ukliješteni pilot u glini, slika 6-6, koristeći pritom iste oznake za normalizirane veličine kao i za slobodni pilot, moguće je predvidjeti nekoliko slučajeva. Prvi je kratki pilot koji se pomiče paralelno sa svojim osnovnim položajem. Iz ravnoteže sila u vodoravnom smjeru slijedi, kao i za slobodni pilot, izraz (6.18) za veličinu \bar{f} . Najveći moment savijanja sad je na vrhu pilota pri naglavnoj konstrukciji koja ga uklješćuje i iznosi



Slika 6-7 Najveći moment savijanja (lijevo) i potrebna duljina vodoravno opterećenog pilota u glini pri slomu tla (prerađeno prema Broms, 1964a)

$$\bar{M}_m = 9 \bar{f} \left(\bar{a} + \frac{1}{2} \bar{f} \right) = \bar{H} \left(\bar{a} + \frac{1}{18} \bar{H} \right) \quad (6.22)$$

što je jednako slučaju sa slobodnim pilotom uz $\bar{e} = 0$, izraz (6.20). Potrebna normalizirana dužina pilota je

$$\bar{L} = \bar{a} + \bar{f} = \bar{a} + \frac{1}{9} \bar{H} \quad (6.23)$$

Daljnijim povećanjem sile, raste potrebna dužina \bar{f} prema izrazu (6.18) sve dok moment savijanja ne dosegne otpornost presjeka pilota na savijanje. Za duktilni karakter nosivosti presjeka pilota moguće je daljnje povećanje sile H . Moment savijanja na vrhu pilota zadržat će svoju vrijednost pri plastičnom popuštanju, a pilot će se zakretati sve dok maksimalni moment savijanja na dubini $a + f$ ne dosegne otpornost presjeka na savijanje. U tom trenutku će pilot imati dva plastična zgloba, jedan na vrhu, a jedan na dubini $f + a$. Ako se pretpostavi da je otpornost oba presjeka na savijanje ista, normalizirani momenti savijanja u tim presjecima će iznositi (iz uvjeta ravnoteže momenata)

$$\bar{M}_m = \frac{9}{2} \bar{f} \left(\bar{a} + \frac{1}{2} \bar{f} \right) = \frac{1}{2} \bar{H} \left(\bar{a} + \frac{1}{18} \bar{H} \right) \quad (6.24)$$

a potrebna normalizirana duljina pilota je

$$\bar{L} = \bar{a} + \bar{f} + 2\bar{g} \quad (6.25)$$

gdje \bar{g} slijedi iz

$$9\bar{g}^2 = \bar{M}_m \quad (6.26)$$

što nakon uvrštavanja izraza (6.24) daje

$$\bar{g} = \sqrt{\frac{1}{2} \bar{f} \left(\bar{a} + \frac{1}{2} \bar{f} \right)} \quad (6.27)$$

i konačno uvrštavanjem u (6.25) daje za potrebnu normaliziranu duljinu pilota

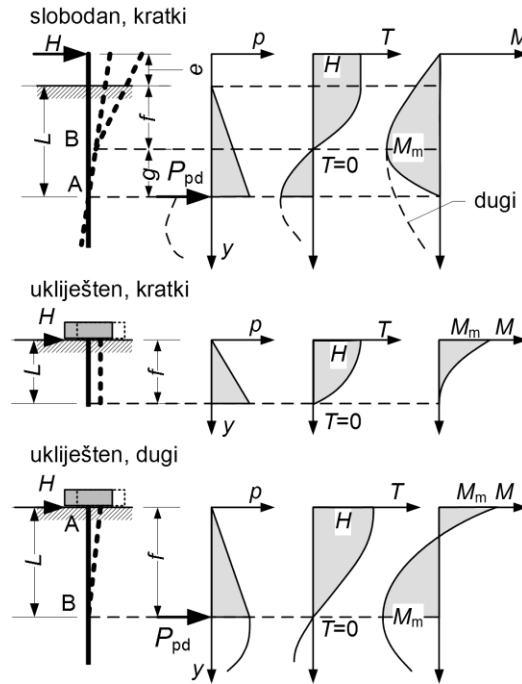
$$\bar{L} = \bar{a} + \bar{f} + 2 \sqrt{\frac{1}{2} \bar{f} \left(\bar{a} + \frac{1}{2} \bar{f} \right)} = \bar{a} + \frac{1}{9} \bar{H} + 2 \sqrt{\frac{1}{18} \bar{H} \left(\bar{a} + \frac{1}{18} \bar{H} \right)} \quad (6.28)$$

Izrazi (6.22) i (6.23) prikazani su crtkano, a (6.24) i (6.28) s crta-točka na slici 6-7. Iz ovih se analiza vidi da je za prijenos iste vodoravne sile potreban kraći ukliješten od slobodnog pilota. Slučaj s dva plastična zgloba kod ukliještenog pilota u praksi ne bi trebalo koristiti zbog mogućih velikih pomaka koji su potrebni za aktiviranje tog oblika deformacije.

KRUPNOZRNO TLO, SLOBODNI VRH

Na sličan način kao i problem pilota u sitnozrnom tlu za nedrenirano stanje, Broms je riješio i problem pilota u krupnozrnom tlu za drenirano stanje (Broms, 1964b). Pretpostavio je da otpor vodoravnom pomaku pilota pruža otpor pritisak koji je proporcionalan pasivnom otporu prema Rankineovoj teoriji pasivnog otpora prema kojoj je koeficijent pasivnog otpora $K_p = \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right)$.

Kao i u slučaju pilota u nedreniranom sitnozrnom tlu, pogodno je uvesti iste normalizirane veličine, osim za normaliziranu vodoravnu silu koja se za slučaj krupnozrnog tla definira kao $\bar{H} = \frac{H}{K_p \gamma b^3}$, za normalizirani otpor tla



6-8 Raspodjela pritisaka, poprečnih sila i momenata savijanja u vodoravno opterećenom pilotu u pijesku (prema Broms, 1964b)

$\bar{p} = \frac{p}{K_p \gamma b^2} = 3\bar{y}$, za normalizirano opterećenje za normalizirani najveći moment savijanja koji se definira kao $\bar{M}_m = \frac{M_m}{K_p \gamma b^4}$. Kao što je ranije rečeno, uvodi se pojednostavljenje kojim se pasivni otpor ispod točke rotacije A zamjenjuje koncentriranom silom P_{pd} u točki A.

Za kruti pilot, koji rotira oko neke točke A pod djelovanjem horizontalne sile H najveći moment se razvija na normaliziranoj dubini \bar{f} gdje je poprečna sila u pilotu jednaka nuli (slika 6-8). Iz uvjeta vodoravne ravnoteže do dubine \bar{f} slijedi za tu dubinu

$$\bar{f} = \sqrt{\frac{2}{3}\bar{H}} \quad (6.29)$$

a normalizirani najveći moment savijanja

$$\bar{M}_m = \bar{H} \left(\bar{e} + \frac{2}{3}\bar{f} \right) = \bar{H} \left(\bar{e} + \frac{2}{3}\sqrt{\frac{2}{3}\bar{H}} \right) \quad (6.30)$$

Veza između normalizirane sile \bar{H} i potrebne duljine pilota \bar{L} (udaljenosti između hvatišta sile \bar{H} i točke rotacije pilota A slijedi iz uvjeta ravnoteže momenata oko točke rotacije A, u kojoj je moment savijanja jednak nuli,

$$\bar{H} = \frac{1}{2} \frac{\bar{L}^3}{\bar{e} + \bar{L}} \quad (6.31)$$

Izrazi (6.30) i (6.31) prikazani su na slici 6-9. Daljnje povećanje sile H dovest će do povećanja duljine pilota, ali to ima smisla samo do trenutka kad najveći moment savijanja dosegne otpornost presjeka na savijanja. U tom se trenutku u točki najvećeg momenta stvara plastični zglob pa povećanje duljine pilota ne doprinosi njegovoj nosivosti.

KRUPNOZRNO TLO, UKLIJEŠTENI VRH

Razmatrajući ukliješteni pilot u pijesku, slika 6-8, koristeći iste oznake za normalizirane veličine kao i za slobodni pilot, moguće je predvidjeti nekoliko slučajeva. Prvi je kratki pilot koji se pomiče paralelno sa svojim osnovnim položajem. Iz ravnoteže sila u vodoravnom smjeru slijedi

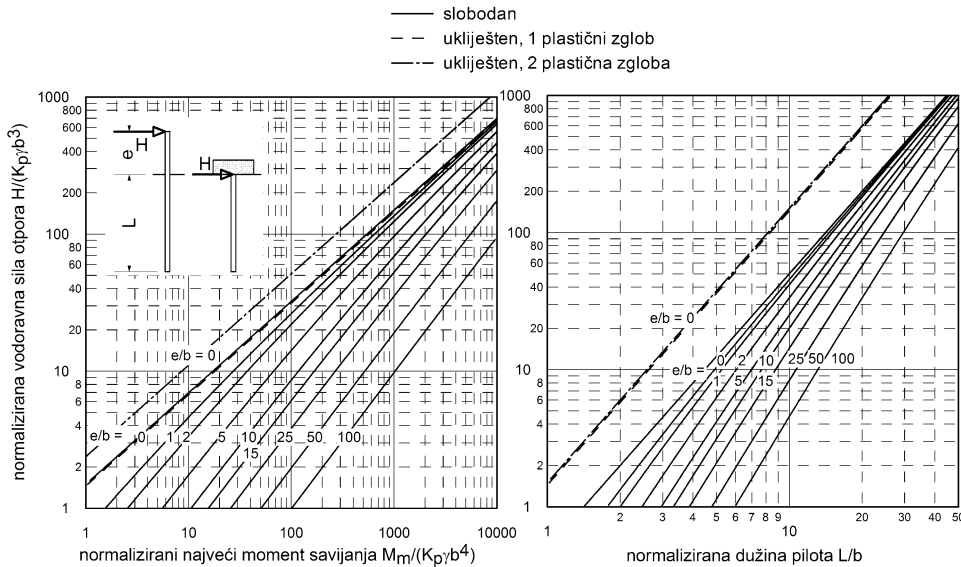
$$\bar{L} = \sqrt{\frac{2}{3}\bar{H}} = \bar{f} \quad (6.32)$$

dok za najveći normalizirani moment savijanja, koji je sada na vrhu uz naglavnu gredu, slijedi

$$\bar{M}_m = \frac{2}{3}\bar{H}\bar{f} = \frac{2}{3}\bar{H}\sqrt{\frac{2}{3}\bar{H}} \quad (6.33)$$

što je jednako izrazu (6.30) ako se stavi $\bar{e} = 0$. Kako je poprečna sila na dubini \bar{f} jednaka nuli, slijedi da tu ne samo što je moment savijanja jednak nuli, već je tu i minimum momentne raspodjele (slika 6-8).

Daljnjim povećanjem sile H raste potrebna dubina pilota L sve dok najveći moment savijanja na vrhu pilota (pri naglavnoj gredi) ne dosegne otpornost presjeka pilota na savijanje. U tom se trenutku otvara u toj točki plastični zglob. Povećanje se nosivosti pilota može postići njegovim daljnjim produženjem. U tom slučaju raste moment savijanja i pri dnu pilota (točka B) sve dok i on ne dosegne otpornost presjeka pilota na savijanje kad se otvara drugi plastični zglob. Ako se pretpostavi da su otpornosti na savijanje



Slika 6-9 Najveći moment savijanja (lijevo) i potrebna duljina vodoravno opterećenog pilota u pijesku pri slomu tla (prerađeno prema Broms, 1964b)

presjeka pilota u oba plastična zgloba, na vrhu i na dnu pilota, jednaki, slijedi iz momentne ravnoteže obzirom na dno pilota

$$2\bar{M}_m = \frac{2}{3}\bar{H}\bar{f} \quad (6.34)$$

odnosno nakon sređivanja

$$\bar{M}_m = \frac{1}{3}\bar{H}\bar{f} = \frac{1}{3}\bar{H}\sqrt{\frac{2}{3}\bar{H}} \quad (6.35)$$

Potrebna duljina pilota je i u ovom slučaju ona iz izraza (6.32). Zanimljivo je napomenuti da u slučaju dvaju plastičnih zglobova, za zamjenjujuća silu u točki rotacije B vrijedi $P_{pd} = 0$.

Izrazi za potrebnu duljinu slobodnog (6.31) i ukliještenog pilota, s jednim ili dva plastična zgloba (6.32) kao i izrazi za potrebni moment otpornosti presjeka pilota za slobodni pilot (6.30) te za ukliješteni pilot s jednim plastičnim zglobom (6.33), odnosno s dva plastična zgloba (6.35), prikazani su na slici 6-9.

Praktična primjena dijagrama sa slike 6-9 slijedi slijedeći postupak. Za zadanu vodoravnu silu, profil tla te uvjete ukliještenja na vrhu pilota izabere

se pilot s potrebnom otpornošću presjeka na svijanje (lijevi dijagram), a zatim se odredi potrebna duljina pilota (desni dijagram).

6.4. Projektiranje pilota prema Eurokodu 7

Provjera pouzdanosti temelja na pilotima slijedi postupak opisan u Poglavlju 2. Treba obratiti pažnju da se u pojedinim proračunskim pristupima postupci za provjeru pouzdanosti temelja na pilotima za vertikalno opterećenje razlikuju od postupaka za ostale geotehničke konstrukcije pa i od postupaka za provjeru pouzdanosti temelja na pilotima pod poprečnim opterećenjem. Tako se u proračunskom pristupu 1 parcijalni koeficijenti za otpornost osno opterećenih pilota aktiviraju na razini karakteristične otpornosti stope, $R_{b;k}$, i karakteristične otpornosti plašta, $R_{s;k}$, ili alternativno karakteristične otpornosti cijelog pilota, $R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k}$, a ne na razini karakterističnih vrijednosti parametara tla. To znači da su moguće dvije alternative za određivanje proračunske vrijednosti otpornosti tla kod osno opterećenog pilota, prva

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (6.36)$$

ili druga

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k} + R_{s;k}}{\gamma_t} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (6.37)$$

Općenito su parcijalni koeficijenti za otpornost tla na stopi, γ_b , za otpornost tla na plaštu, γ_s , i za ukupnu otpornost tla, γ_t , međusobno različiti. Također treba napomenuti da se oni razlikuju i za različite vrste pilota, zabijane, bušene, uvtane kao i za karakter opterećenja pilota, tlak ili vlak. Prema proračunskom pristupu 1, parcijalni koeficijenti za parametre čvrstoće tla (efektivni kut trenja, nedrenirana čvrstoća) kod uzdužno opterećenih pilota uvijek su jednaki jedinici za obje kombinacije koeficijenata, K1 i K2 (osim u posebnim slučajevima kad parametri tla imaju utjecaj na djelovanje na pilot, na primjer pri proračunu negativnog trenja).

Za poprečno opterećene pilote po tom pristupu parcijalni koeficijenti se aktiviraju na razini parametara tla!

Posebnost u Eurokodu 7 je proračun karakteristične vrijednosti otpornosti tla $R_{b;k}$, $R_{s;k}$ i $R_{c;k} = R_{b;k} + R_{s;k}$. Te se veličine određuju uz pomoć posebnih korelacijskih koeficijenata ξ čija veličina ovisi o broju probno ispitanih pilota na lokaciji, ako su takova ispitivanja provedena, ili o broju sondažnih profila (bušotina) iz kojih su određeni parametri tla za proračun otpornosti, ili iz broja dinamičkih udarnih pokusa kojim se dinamički ispituje nosivost pilota. Proračun karakteristične vrijednosti slijedi slijedeći format

$$R_{c;k} = \min \left[\frac{(R_{c;m})_{\text{srednje}}}{\xi_i}; \frac{(R_{c;m})_{\text{min}}}{\xi_j} \right] \quad (6.38)$$

gdje $R_{c;m}$ označava mjerenu ili proračunatu otpornost tla (ili alternativno otpornost na stopi, $R_{b;m}$, ili otpornost na plaštu, $R_{s;m}$) na jednom mjestu (ili jedno probno ispitivanje nosivosti, ili jedna bušotina iz koje su određeni parametri tla ili dinamičko ispitivanje jednog pilota), a ξ su korelacijski koeficijenti iz tablice 6-9. Oznaka „srednje“ označava srednju vrijednost, a oznaka „min“ najmanju vrijednost veličina iz više probnih mjerenja ili više bušotina na istoj lokaciji. Veličine ξ su prikazane u tablici 6-9 ovisno o načinu određivanja mjerenih ili proračunatih otpornosti kao i o broju ispitivanja ili bušotina n (broj „modela“ pilota).

Tablica 6-9 Korelacijski koeficijenti za određivanje karakterističnih otpornosti tla uzdužno opterećenih pilota prema EN 1997:2004

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

Reference

- API (1987). *API Recommended Practice for Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms*. Report RP-2A. American Petroleum Institute.
- Broms, B. B. (1964a). Lateral Resistance of Piles in Cohesive Soils. *Journ. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 90, SM2: 27-63.
- Broms, B. B. (1964b). Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils. *Journ. Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, vol. 90, SM3: 123-156.
- DIN 1054 (2005). *Ground - Verification of the safety of earthworks and foundations*. DIN Deutsche Institut für Normung e.V., Berlin.
- Fellenius, B. H. (1999). *Basics of Foundation Design*. 2nd Expanded Edition. BiTech Publishers Ltd., Richmond, B.C.
- Fleming, W. G. K., Weltman, A. J., Randolph, M. F., Elson, W. K. (1992). *Piling Engineering. 2nd Edition*. Blackie Academic & Professional. Glasgow & London.
- Poulos, H. G., Davis, E. H. (1980). *Pile foundation analysis and design*. John Wiley & Sons. New York.
- Rees, L. C., O'Neill, M. W. (1988). *Drilled Shafts: Construction Procedures and Design Methods*. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Implementation. McLean, VA.
- Rees, L. C., Isenhower, W. M., Wang, S.-T. (2006). *Analysis and Design of Shallow and Deep Foundations*. John Wiley & Sons, New Jersey.
- Simons, N., Menzies, B. (2000). *A Short Course in Foundation Engineering*. Thomas Telford, London.
- Tomlinson, M. J. (1995). *Pile Design and Construction*. Longman Scientific & Technical, Harlow.