

Sveučilište u Zagrebu

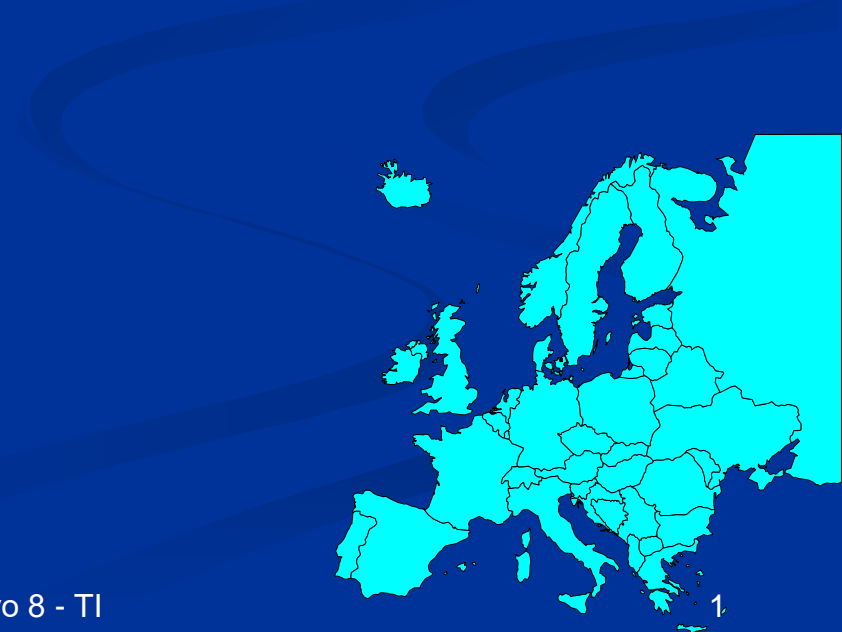
Građevinski fakultet

Diplomski sveučilišni studij

Smjer: GEOTEHNIKA

Temelji na pilotima 1

Prof. dr. sc. Tomislav Ivšić
Građevinski fakultet Zagreb



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
- Zabijanje – povijesni način izvedbe
- Bušenje – iz naftne industrije (bitna i za razvoj projektnih tehnika)

Iz povijesti pilota 1a - sojenice

Sojenice (njem: Pfahlbauten; engl: Pile dwellings)

– sačuvane u alpskom području, cca 5000-500 g. prije Krista, drveni piloti



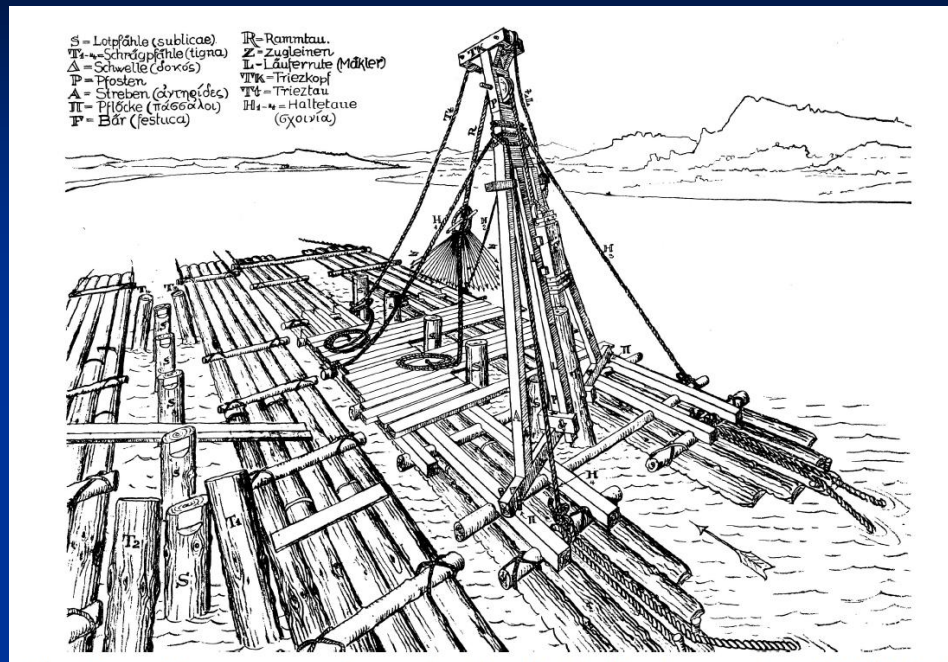
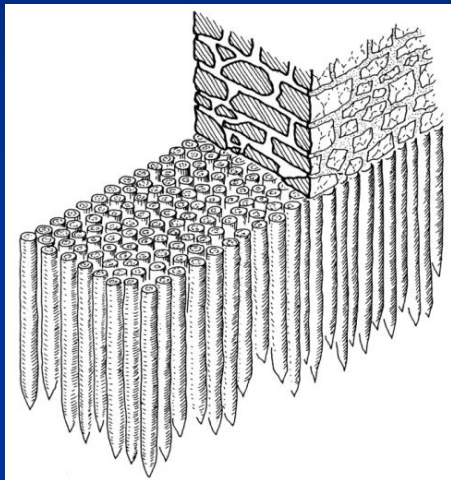
Iz povijesti pilota 1b - sojenice



Iz povijesti pilota 2

PILOTI - stari RIM

pali – tanki kolci ispod kamenih ili zidanih temelja, ručno zabijanje



Sublicae

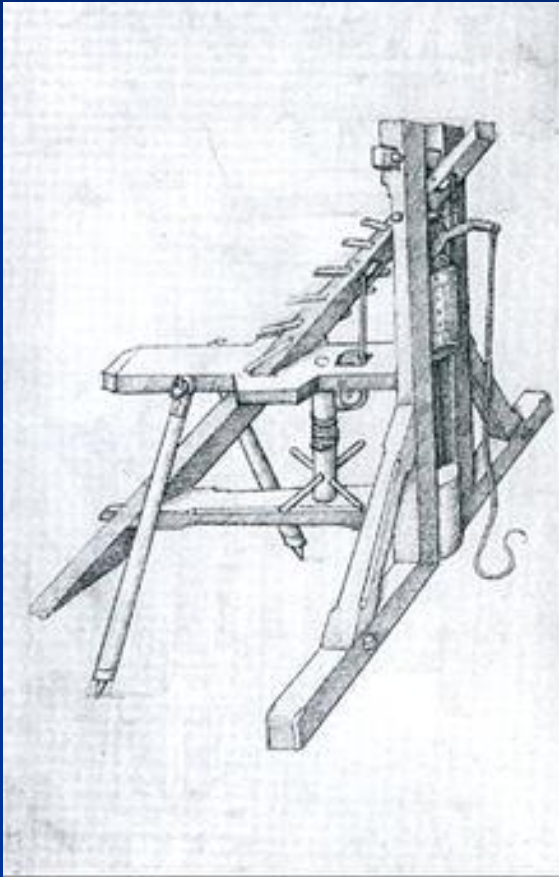
– deblji stupovi (promjera i do 1 stope tj. cca 30cm), strojno zabijanje

IZVORI:

- Caesar: *De bello Galico*
- Vitruvije: *Deset knjiga o arhitekturi*

Iz povijesti pilota 3

Stari i srednji vijek – strojevi za zabijanje pilota



Oko 1480. god



Rekonstrukcija stroja ("machinae") za zabijanje pilota iz starog Rima

Iz povijesti pilota 4

Srednjovjekovni europski gradovi – drveni piloti u temeljima zgrada

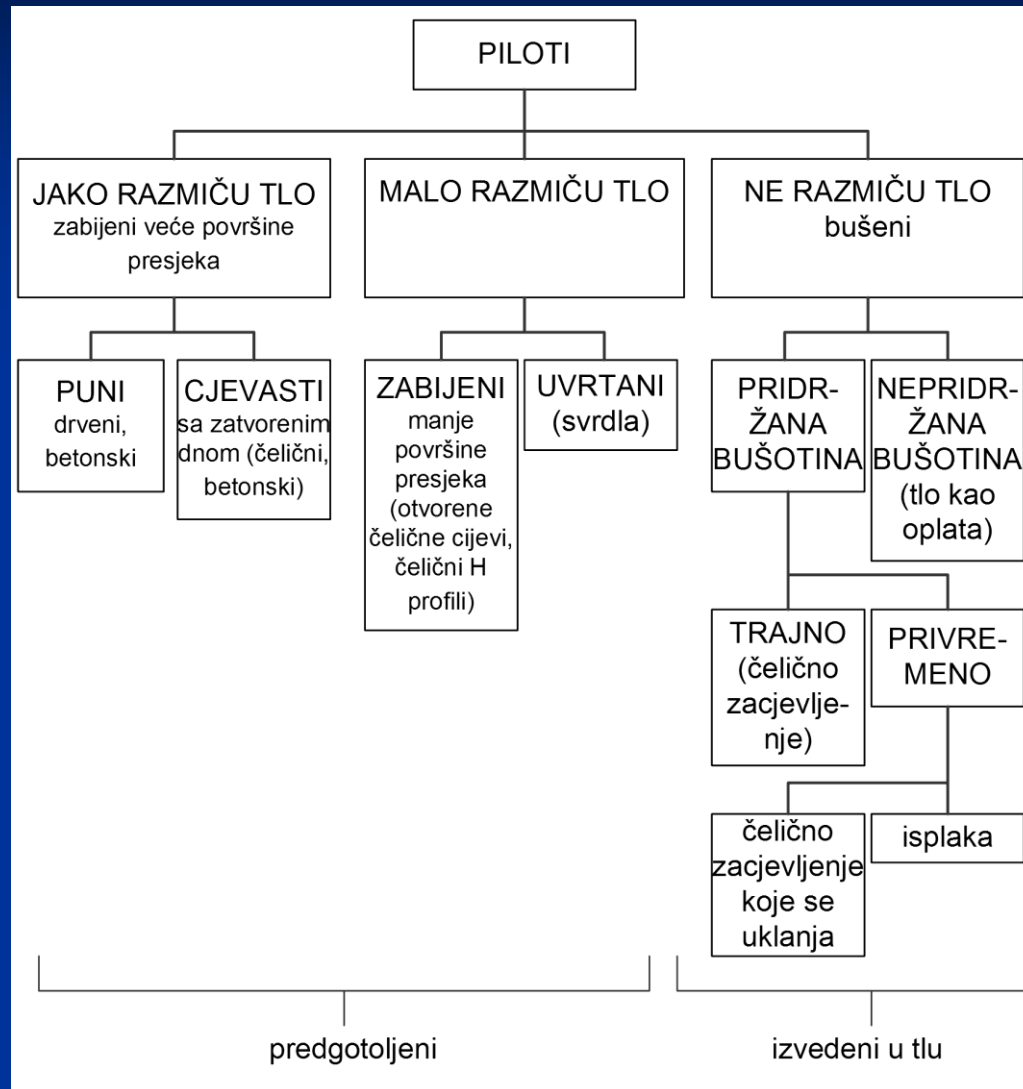


Venecija – drveni piloti u temeljima srednjovjekovnih palača, (14. stolj., - prema Ceccato et al 2013)

Dubrovnik - uzorci drvenih pilota pronađeni ispod kamenih temelja u atriju Kneževa dvora (16.stoljeće - prema Topić i dr, 2018)



Vrste i izvedba pilota



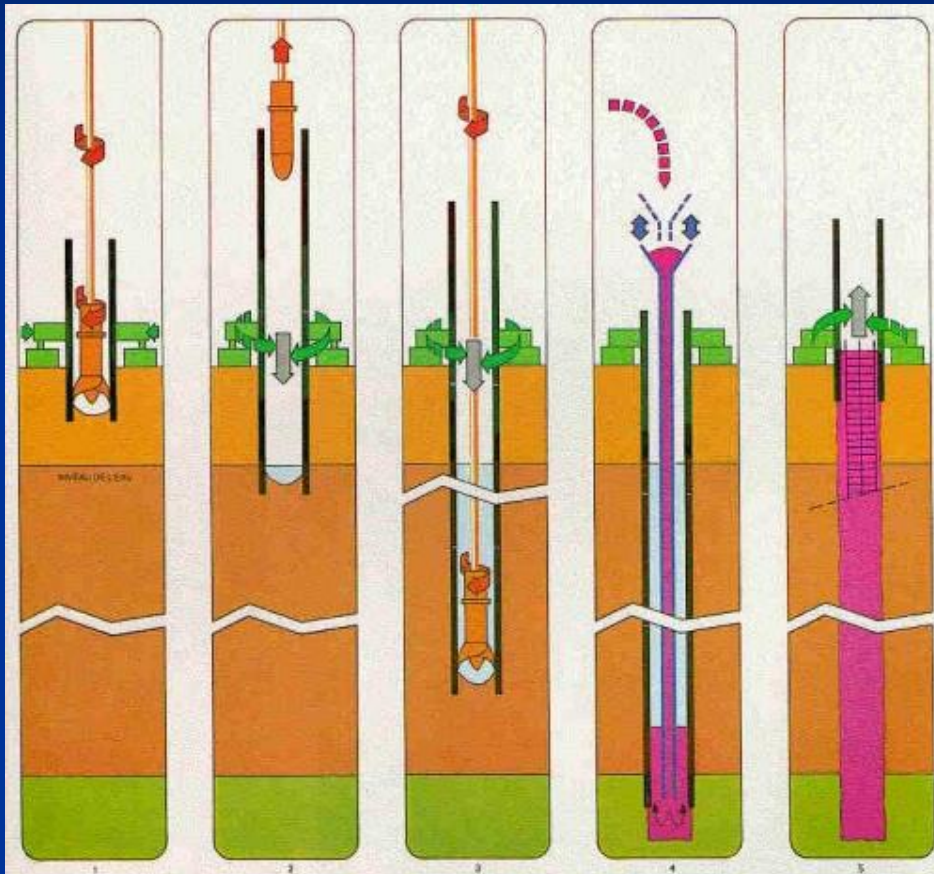
Slika 6-1 Jedno od mogućih razvrstavanja pilota (prema Simons i Menzies, 2000)

Postupci izvedbe pilota - popis prema :

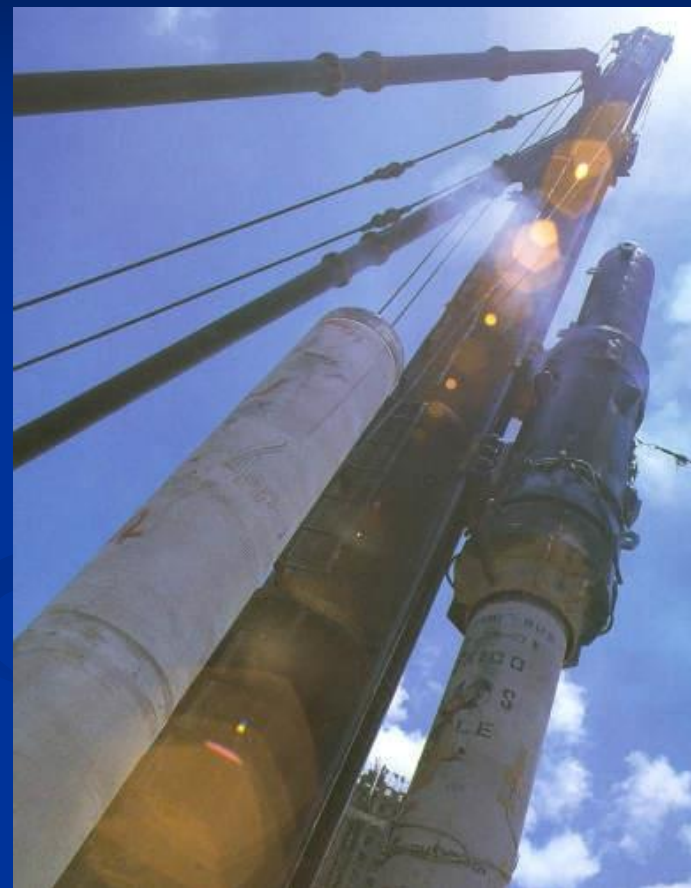
<http://www.geoforum.com/info/pileinfo/>

BUŠENI PILOTI	ZABIJENI PILOTI		
<ul style="list-style-type: none">» Bade System» Benoto System» Brechtl System» Casagrande System» Drill-and-drive Pile» Franki Excavated Pie» Held-Franke System» Hochstrasser-Weise System» Hydrofraise» Icos Veder System» Lind-Calweld Pile» Lorenz Pile» Mini pile» Monierbau Pile» Prestcore» Rolba Pile» Small diameter bored pile» Soilex System» Wolfholz System	<ul style="list-style-type: none">» Alpha Pile» Button-bottom Pile» Daido SS Pile» Delta Pile» Drill-and-drive Pile» Compressol Pile» Franki Composite Pile» Franki Pile» Franki Pile with casing top driven» Lacor Pile» Mast System» Millgard Shell Pile» Mini pile» Multiton Pile» MV-pile» Pieux Choc» Precast Concrete Pile» Jointed Concrete Pile	<ul style="list-style-type: none">» Prestressed Concrete Pile» Precast Reinforced Concrete Pile» Raymond Pile» Rolba Pile» Steel-concrete (SC) Composite Pile» Sheet Pile» Simplex System» Soilex System» Steel pile» Steel Box Pile» Steel-H Pile» Hollow precast concrete pile with timber/steel core» Steel Tube Pile» Timber Pile» Westpile Shell Pile» Vibrex Cast-In-Situ Pile	<ul style="list-style-type: none">» X-pile» Zeissl System <h3>UVRTANI PILOTI</h3> <ul style="list-style-type: none">» Atlas Pile» Franki VB Pfahl» Fundex Pile» Pressodrill» SVB Pile» SVV Pile» Tubex Pile <h3>SVRDLANI PILOTI</h3> <ul style="list-style-type: none">» Continuous Flight Auger (CFA) System» Starsol Pile

Postupci izvedbe pilota - bušeni piloti velikog promjera



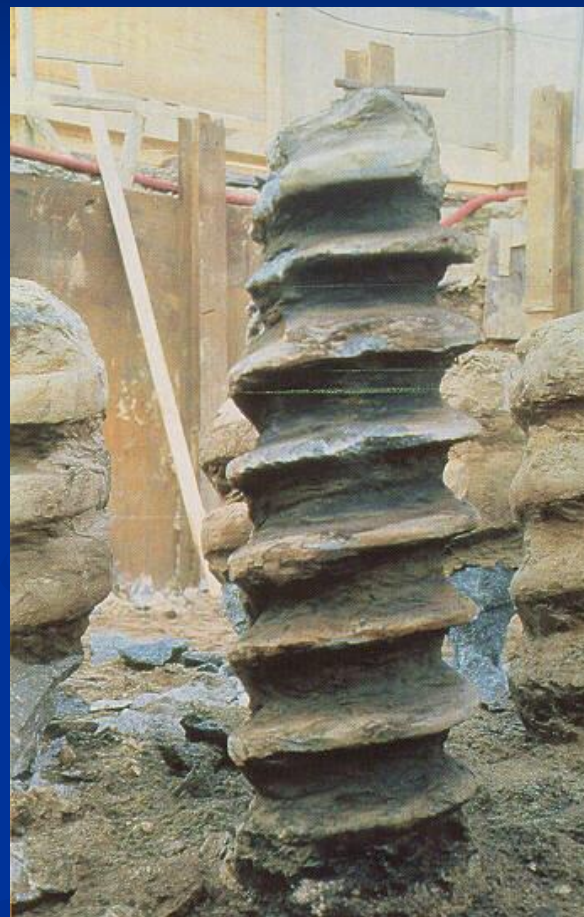
Postupci izvedbe pilota - zabijeni piloti



Postupci izvedbe pilota - zabijeni piloti

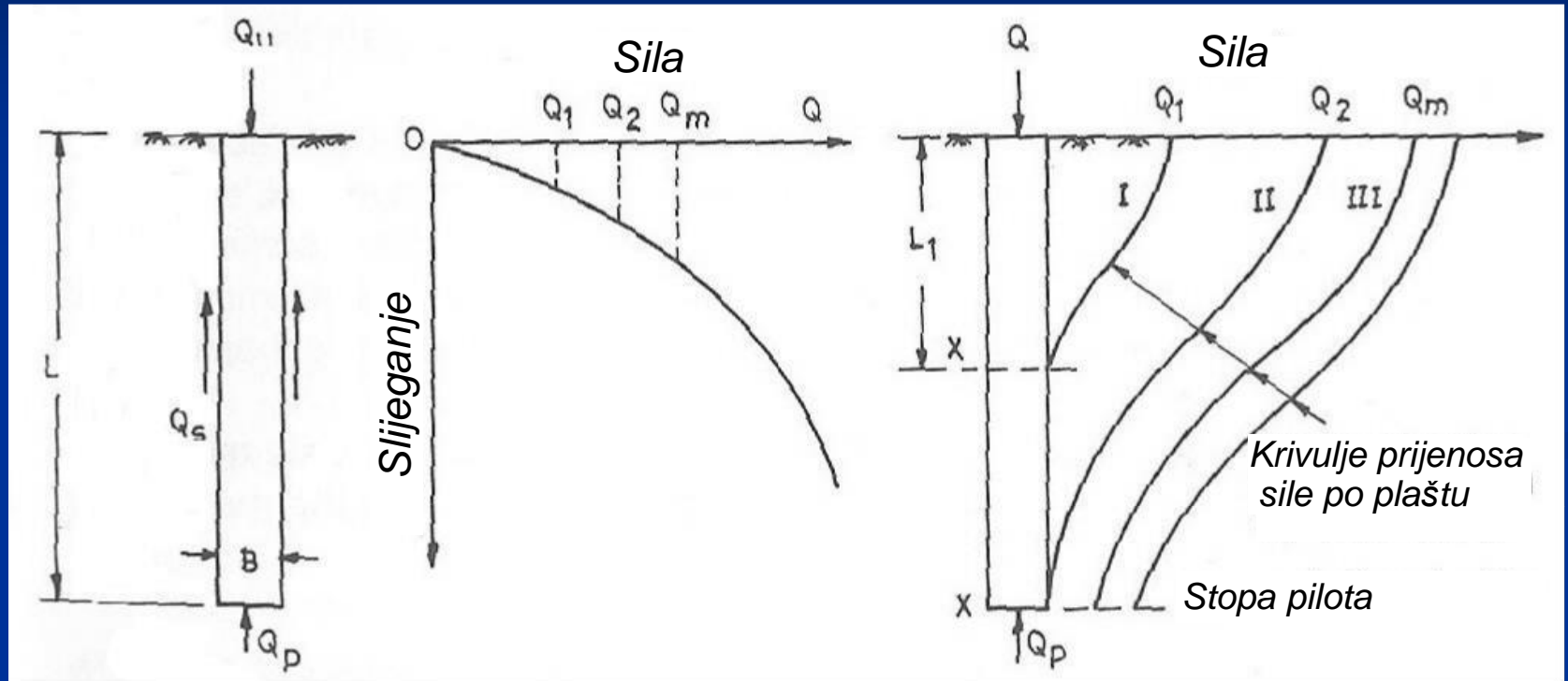


Postupci izvedbe pilota - svrdlani piloti



Uzdužno opterećeni piloti

Mehanizam prijenosa opterećenja kroz pilot u tlo



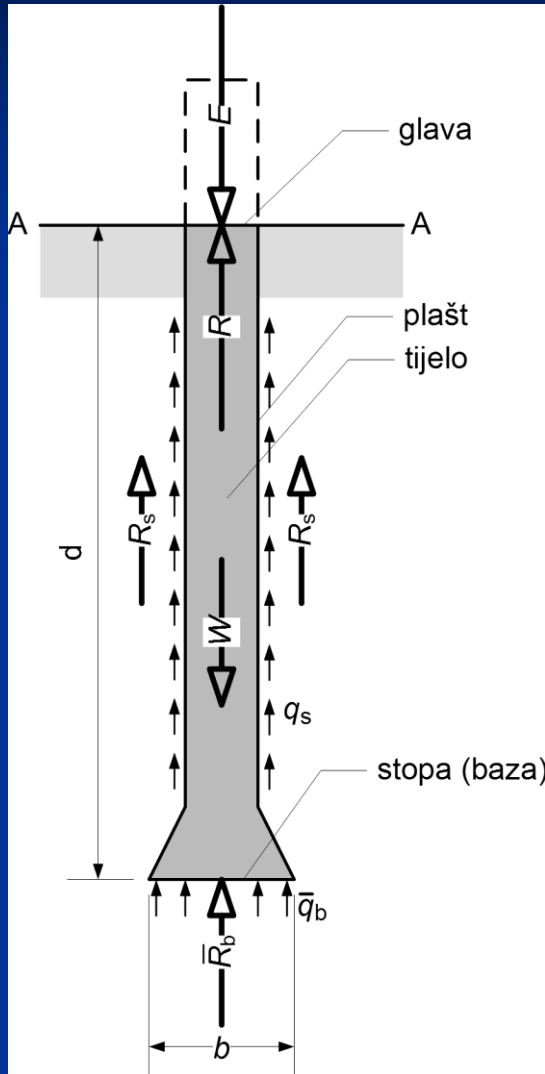
a) Pilot

b) Krivulja sila – slijeganje

c) Krivulje prijenosa sile

Uzdužno opterećeni piloti

Nosivost pojedinačnog pilota na uzdužno opterećenje



$$R = \bar{R}_b - W + R_s$$

$$\bar{R}_b = \bar{q}_b A_b$$

$$R_s = \int_0^d q_s C dy$$

$$q_b = \frac{R_b}{A_b} = \frac{\bar{R}_b - W}{A_b}$$

$$W \approx \sigma_{y';y=d} A_b$$

$$q_b = \bar{q}_b - \sigma_{y';y=d}$$

$$R = R_b + R_s = q_b A_b + \int_0^d q_s C dy$$

Reducirana nosivost na stopi

$$\bar{q}_b = c N_c + \frac{1}{2} b \gamma N_\gamma + \sigma_{y';y=d} N_q$$

$$q_b = c N_c + \sigma_{y';y=d} (N_q - 1)$$

Nedrenirano

$$q_b = c_u N_c$$

Drenirano

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

Jedinični otpor na plaštu

$$q_s = a + \sigma_x \tan \delta$$

$$q_s = \alpha c_u$$

$$q_s = \beta \sigma'_y$$

Nedrenirano

Drenirano

Slika 6-2 Uzdužno opterećeni pilot

Nosivost pojedinačnog pilota na uzdužno opterećenje

Empirijski izrazi za jediničnu otpornost na stopi i jediničnu otpornost na plaštu pojedinačnog pilota

vrsta pilota	nedrenirano stanje (sitnozrna tla)	drenirano stanje (krupnozrna tla)																												
zabijeni (API 1987)	$q_b = 9c_u$ $(c_u \text{ odrediti kao srednju vrijednost u području } d \leq y \leq d + 2b)$ $q_s = \alpha c_u$ $\alpha = 0.5 \left(\frac{c_u}{\sigma'_y} \right)^{-0.5} \text{ za } \frac{c_u}{\sigma'_y} \leq 1$ $\alpha = \min \left(1, 0.5 \left(\frac{c_u}{\sigma'_y} \right)^{-0.25} \right)$ $\text{za } \frac{c_u}{\sigma'_y} > 1$	$q_b = \sigma'_{y;y=d} (N_q - 1)$ $q_s = K \sigma'_y \tan \delta$ $(K = 0.8 \text{ cjevasti pilot})$ $(K = 1.0 \text{ puni pilot})$																												
		<table> <thead> <tr> <th>N_{SPT}</th> <th>$N_q - 1$</th> <th>δ</th> <th>$q_{s;\max}$</th> </tr> <tr> <th>(-)</th> <th>(-)</th> <th>(°)</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	$q_{s;\max}$	(-)	(-)	(°)	(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	$q_{s;\max}$																											
(-)	(-)	(°)	(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																											

Nosivost pojedinačnog pilota na uzdužno opterećenje

Empirijski izrazi za jediničnu otpornost na stopi i na plaštu pojedinačnog pilota

<p>bušeni (Rees i dr. 2006)</p>	$q_b = \frac{2}{3} \left(1 + \frac{1}{6} \frac{d}{b} \right) c_u N_c \quad \text{za } \frac{d}{b} < 3$ $q_b = c_u N_c \quad \text{za } \frac{d}{b} \geq 3$ <table data-bbox="575 411 801 621"> <tr> <td>c_u (MPa)</td> <td>N_c</td> </tr> <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> </table> <p>(za $c_u > 0.2$ MPa tretiraj tlo kao stijenu)</p> $q_s = \alpha c_u$ $\alpha = 0.55 \quad \text{za } \frac{c_u}{p_a} \leq 1.5$ $\alpha = 0.55 - 0.1 \left(\frac{c_u}{p_a} - 1.5 \right)$ <p>za $1.5 \leq \frac{c_u}{p_a} \leq 2.5$</p> <p>za $\frac{c_u}{p_a} > 2.5$ tretiraj tlo kao stijenu;</p> <p>$p_a = 0.1$ MPa</p> <p>zanemari gornjih 1.5 m ispod površine terena i donjih b m u sitnozrnom tlu</p>	c_u (MPa)	N_c	0.025	6.5	0.050	8.0	0.100	8.7	0.200	9.0	$q_b = 60 N_{60} \frac{d}{10b} \quad \text{za } \frac{d}{b} \leq 10$ $q_b = 60 N_{60} \quad \text{za } \frac{d}{b} > 10$ <p>$\max q_b = 3.0$ MPa</p> $q_s = \beta \sigma_y'$ <p>$\max q_s = 0.2$ MPa</p> <p><u>pijesak</u></p> $\beta = \min \left(0.25, \bar{N} \left(1.5 - 0.25 (y(m))^{0.5} \right) \right)$ $\bar{N} = \frac{N_{60}}{15} \quad \text{za } N_{60} < 15$ $\bar{N} = 1 \quad \text{za } N_{60} \geq 15$ <p><u>šljunak</u></p> $\beta = \bar{\beta} \quad \text{za } 0.25 \leq \bar{\beta} \leq 1.8$ $\beta = 0.25 \quad \text{za } \bar{\beta} < 0.25$ $\beta = 1.8 \quad \text{za } \bar{\beta} > 1.8$ $\bar{\beta} = 2 - 0.15 (y(m))^{0.75}$ <p><u>vlačni pilot</u></p> $q_{s; \text{vlak}} \sim 0.75 q_{s; \text{tlak}}$ <p>Pouzdanost za q_s: ± 30 %</p>
c_u (MPa)	N_c											
0.025	6.5											
0.050	8.0											
0.100	8.7											
0.200	9.0											

Nosivost pojedinačnog pilota na uzdužno opterećenje

Tablica 6-2 Raspon vrijednosti koeficijenta $N_q - 1$ za proračun jedinične otpornosti na stopi pilota q_b u efektivnim napreznjima (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 napreznjima (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 $q_s = \beta \sigma'_{y;y=d}$

Nosivost pojedinačnog pilota na uzdužno opterećenje

Tablica 6-4 Ovisnost jedinične otpornosti na stopi i na plaštu bušenih pilota u krupnozrnom 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 $3b$ 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

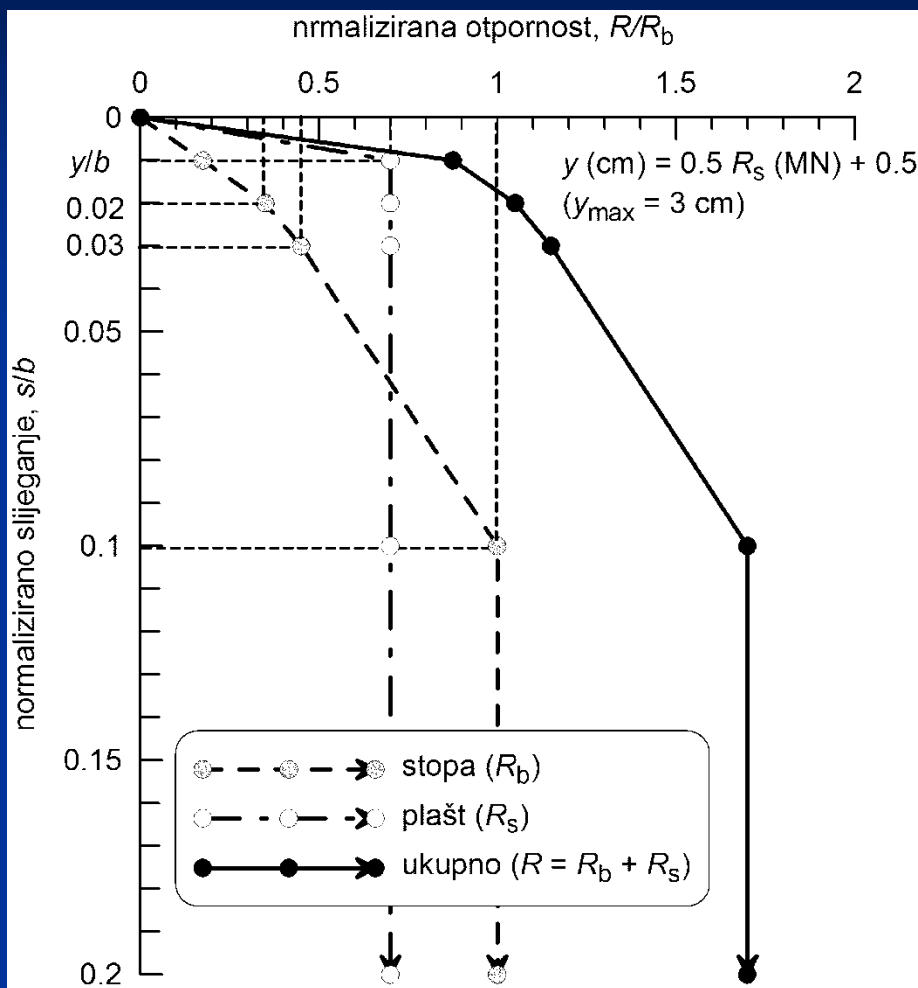
Tablica 6-5 Ovisnost jedinične otpornosti na stopi i na plaštu bušenih pilota u sitnozrnom tlu (DIN 1054); dubina ukopavanja u nosivo tlo barem 2.5 m, promjer pilota između 0.3 i 3 m, piloti izvedeni uz pomoć zacjevljenja ili isplake, nosivo tlo ispod stope barem $3b$ ili 1.5 m

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 $3b$ 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

Slijeganje pojedinačnog pilota pod uzdužnim opterećenjem i aktiviranje komponenti otpornosti



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

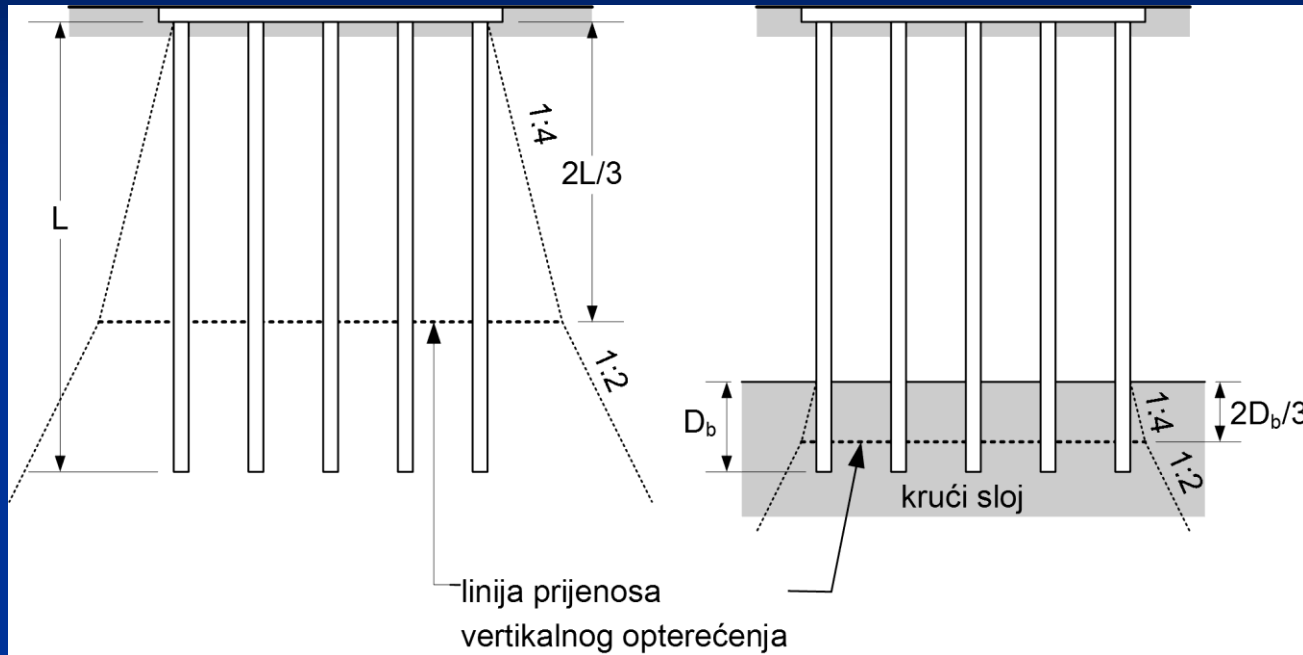
s/d	srednje zbijeni		dobro zbijeni		Rees, O'Neill (1988)
	(DIN 1054:2005)				
	otpor šiljka CPT-a, q_c (MPa)				
	10	15	20	25	
0	0	0	0	0	0
0.02	0.35	0.35	0.40	0.44	0.37
0.03	0.45	0.45	0.51	0.56	0.51
0.10	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

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 teško gnječivo		Rees, O'Neill (1988)
	(DIN 1054:2005)		
	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

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

Otpornost i slijeganje tla za vertikalno opterećenu grupu pilota



- Empirijske procjene
- Empirijski korekcijski koeficijenti

Slika 6-4 Uz približni proračun raspodjele vertikalnih naprezanja ispod grupe pilota:

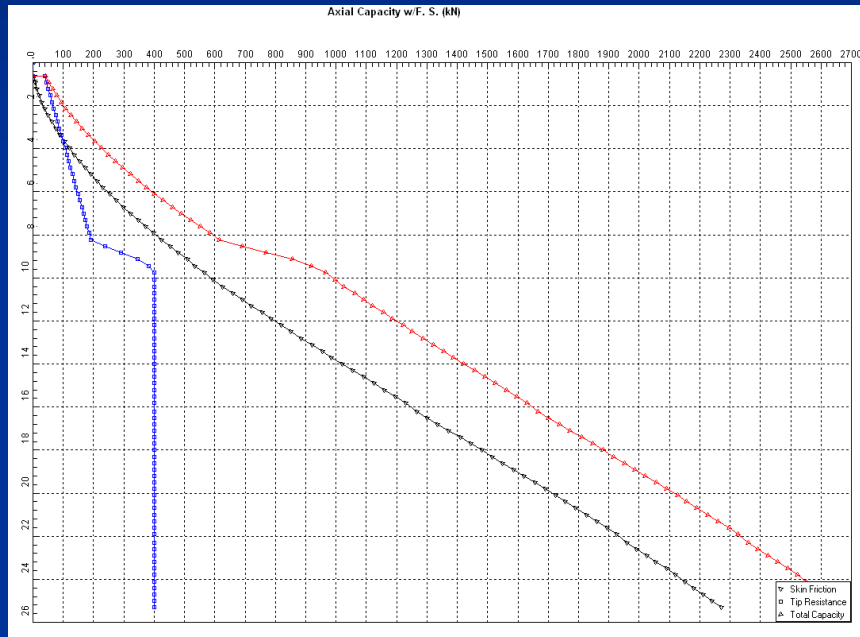
- u tlu približno homogene krutosti ("plutajući" piloti), i
- za slučaj kad piloti prenose vertikalno opterećenje u krući sloj (piloti koji nose preko kraja)

Negativno trenje – uslijed slijeganja tla, relativni pomaci tla i pilota

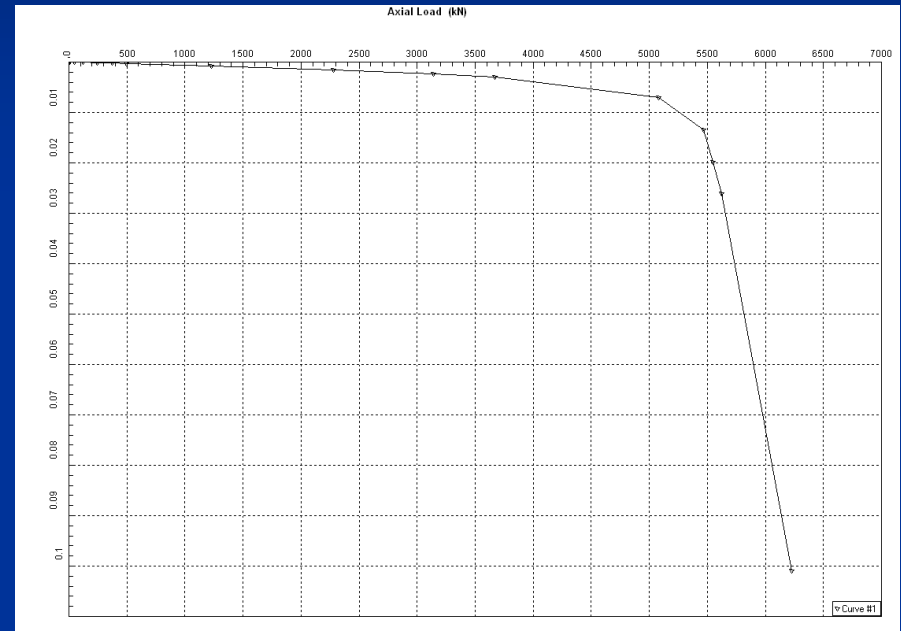
- povećava uzdužnu silu u pilotu, do pune veličine otpornosti na plaštu

Proračun vertikalne nosivosti pilota

$D=1.00\text{m}$ $L = 25\text{m}$



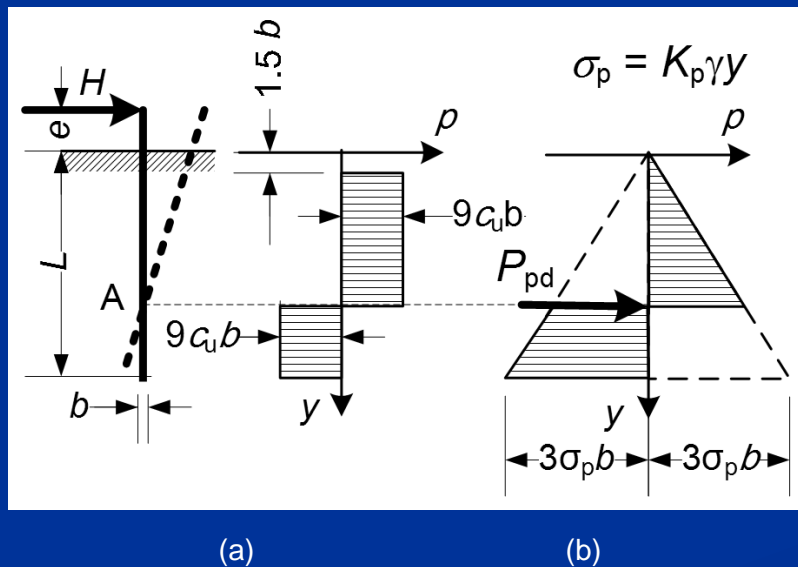
Nosivost na plaštu i stopi pilota,
ukupna nosivost



Dijagram sila-pomak na vrhu pilota

Poprečno opterećeni piloti

- Primjer interakcije temeljne konstrukcije (pilota) i okolnog tla
- Interakcija – kompatibilnost sila i pomaka elemenata na sučelju
- razlikuju se tipični slučajevi prema omjeru krutosti tla i pilota:
 - a) kruti piloti (obično i kratki – $L < 3-5D$) – mjerodavna nosivost tla
 - b) savitljivi piloti (obično dulji – $L > 9-12 D$) – mjerodavna nosivost presjeka pilota
(međudjelovanje tla i pilota –interakcija- jako izražena)



KRUTI PILOT

Slika 6-5 Raspodjela podijeljenog otpora p pri slomu tla vodoravno opterećenog pilota promjera

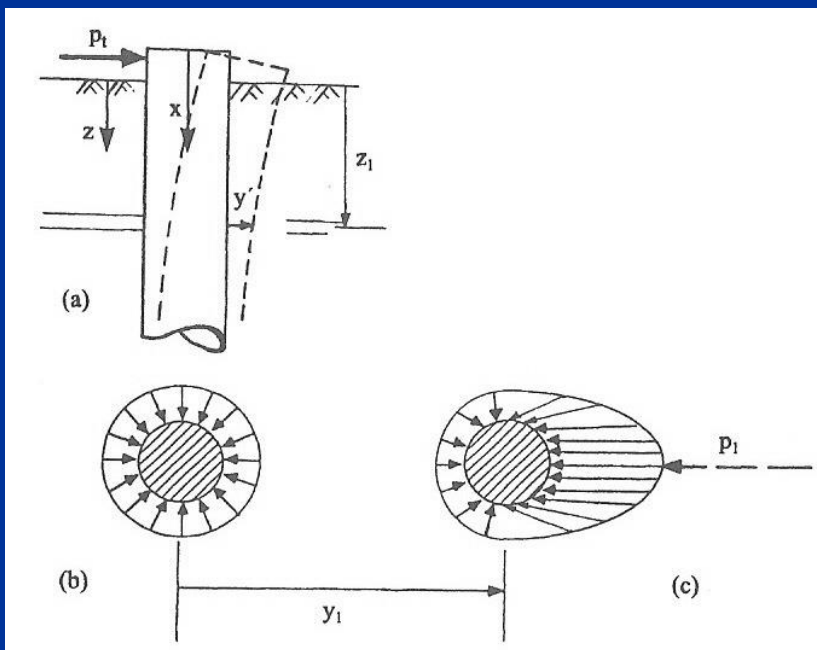
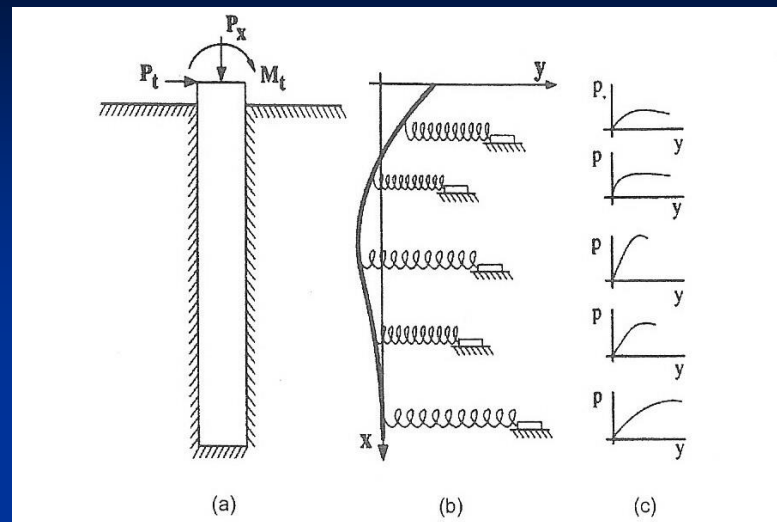
b : (a) sitnozrno tlo, nedrenirano stanje, (b) krupnozrno tlo, drenirano stanje (prema Broms, 1964a i 1964b)

Poprečno opterećeni piloti

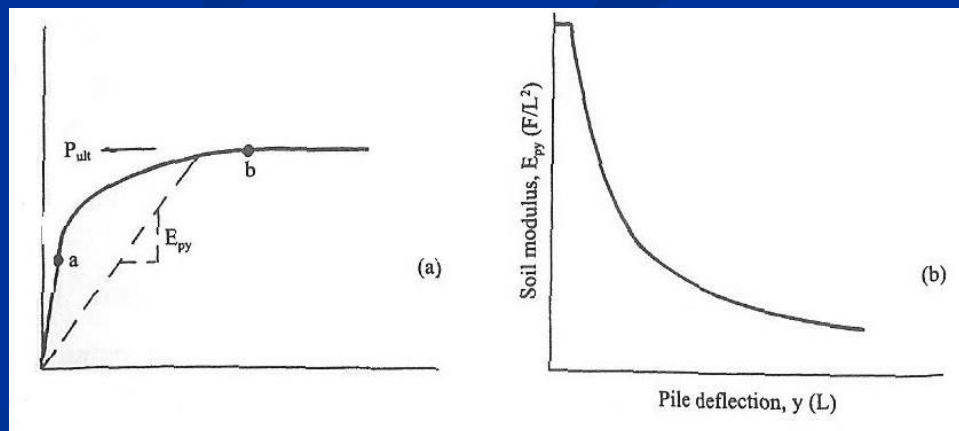
SAVITLJIVI PILOTI – interakcija obuhvaća nosivost i pomake tla duž pilota

Raspodjela pritisaka na pilote prije i nakon horizontalnog pomaka

Model pilota sa skupom $p - y$ krivulja

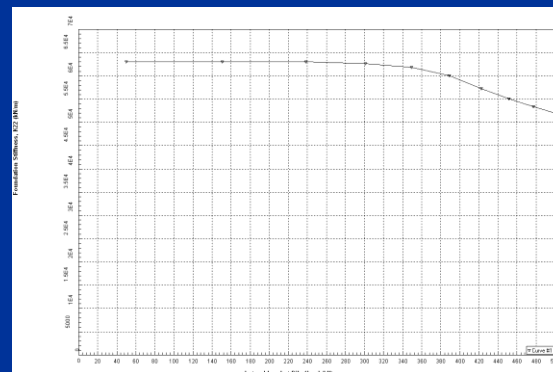
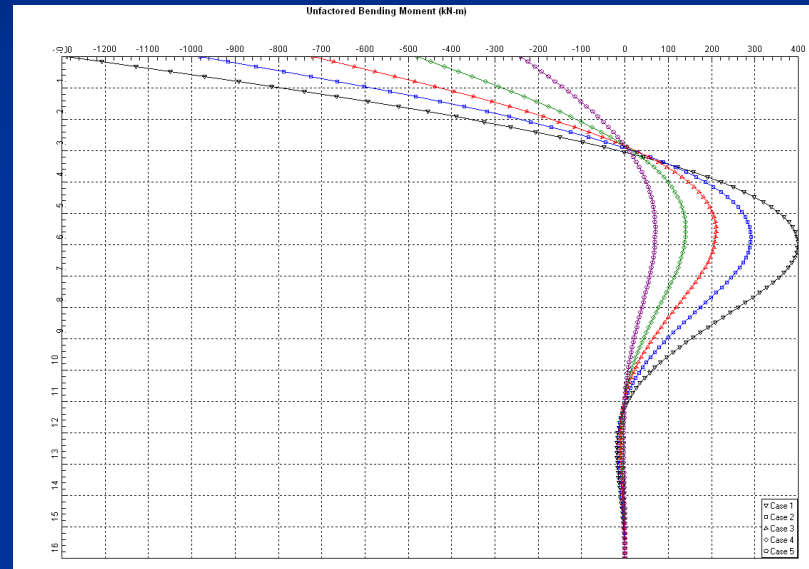
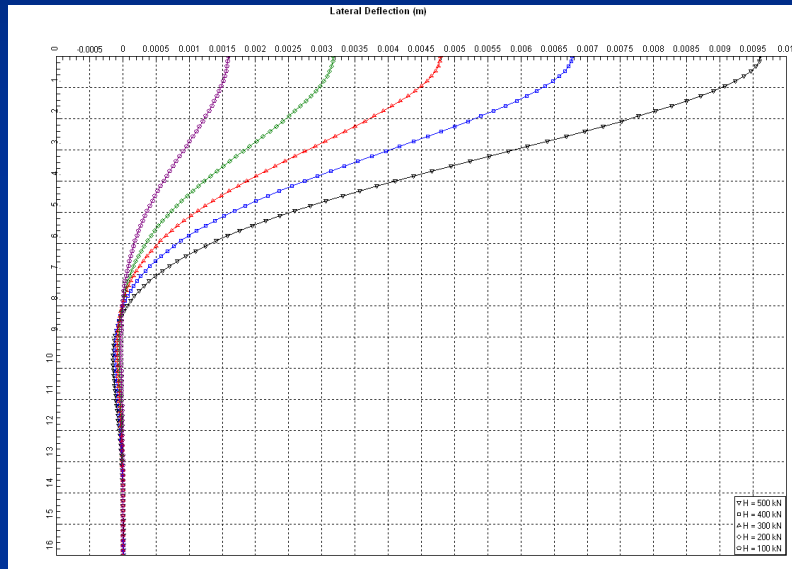


Tipična $p - y$ krivulja i rezultirajući modul reakcije podloge



Poprečno opterećeni piloti

Dijagrami pomaka, momenata savijanja i krutosti pilota opterećenog različitim poprečnim silama



Projektiranje pilota prema Eurokodu 7

Uzdužno (osno) opterećeni piloti
– otpornost R

Parcijalni koeficijenti se razlikuju:

- Za stopu i plašt ili ukupno
- Za različite vrste pilota

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

Za poprečno opterećene pilote –
parcijalni koeficijenti se aktiviraju
na razini parametara tla

Proračun karakteristične vrijednosti R

- Korelacijski koeficijenti ξ

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

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		