

# Analiza poprečno opterećenih pilota

---

**Maresić, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

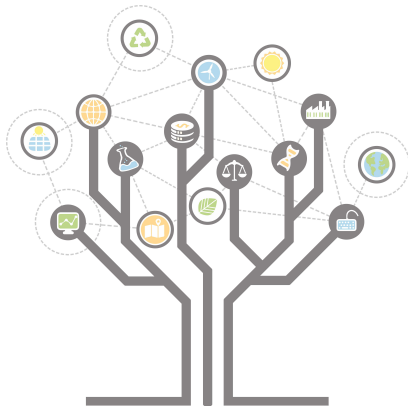
**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:227319>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-13**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations](#)



# Analiza poprečno opterećenih pilota

---

**Maresić, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2016**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:130:227319>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-05**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Geotechnical Engineering](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DOMINIK MARESIĆ

Analiza poprečno opterećenih pilota

DIPLOMSKI RAD

VARAŽDIN, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

Analiza poprečno opterećenih pilota

KANDIDAT:

Dominik Maresić

MENTOR:

Doc dr. sc. Krešo Ivandić

VARAŽDIN, 2016.



Sveučilište u Zagrebu  
Geotehnički fakultet



## ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: DOMINIK MARESIĆ  
Matični broj: 105- 2014./2015.  
Smjer: GEOTEHNIKA

### NASLOV DIPLOMSKOG RADA:

ANALIZA POPREČNO OPTEREĆENIH PILOTA

Rad treba sadržati:

1. Uvod
2. Klasifikacija pilota
3. Diferencijalna jednačina problema i rubni uvjeti
4. Općenito o načinu proračuna pilota opterećenih poprečnom silom
5. Analitički način proračuna poprečno opterećenih pilota
6. Odabir ekvivalentnog koeficijenta reakcije podloge
7. Prikaz nekih situacija kod kojih dolazi do poprečnog opterećenja pilota
8. Proračunska analiza pilota
9. Zaključak

Literatura  
Popis slika  
Popis tablica

Pristupnik je dužan predati mentoru jedan uvezen primjerak diplomskog rada sa sažetkom. Vrijeme izrade diplomskog rada je od 45 do 90 dana.

Zadatak zadan: 14.07.2016.

Rok predaje: 05.09.2016.

Mentor:

Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić



Predsjednica Odbora za nastavu:

Doc.dr.sc. Sanja Kovač

## Sažetak

*Ime i prezime autora: Dominik Maresić*

*Naslov rada: Analiza poprečno opterećenih pilota*

Piloti su stupovi koji prenose sile od građevine na dublje nosive slojeve tla. Sile koje djeluju na pilot, pored momenta, se rastavljaju na uzdužnu i poprečnu komponentu. Poprečna opterećenja su dovoljno velika da se mora izvršiti analiza naprezanja i deformacija u pilotu jer pilot postaje kritičan element u sistemu konstrukcija tlo. Način proračuna pilota se dijeli na analitički i numerički. Analitički način proračuna se primjenjuje na jednostavnijim modelima kao što je Winkler - ov jednoparametarski model s konstantnim koeficijentom reakcije tla po dubini. Postoji i dvoparametarski model koji, osim krutosti opruge, sadrži i parametar kojim se pokušava opisati tlo kao povezani kontinuum. Ako se želimo približiti stvarnom ponašanju tla, koristimo se numeričkim metodama. Najprimjenjivnije numeričke metode su metoda konačnih diferencija, metoda konačnih elemenata i metoda rubnih elemenata.

*Ključne riječi: Piloti, poprečno opterećenje, Winkler – ov koeficijent reakcije tla, jednoparametarski i dvoparametarski model tla*

## Sadržaj:

1. Uvod .....	1
2. Klasifikacija pilota .....	3
3. Diferencijalna jednadžba problema i rubni uvjeti .....	5
4. Općenito o načinu proračuna pilota opterećenih poprečnom silom .....	7
5. Analitički način proračuna poprečno opterećenih pilota.....	8
5.1. Analiza na jednoparametarskom modelu tla.....	10
5.2. Analiza na dvoparametarskom modelu tla.....	13
6. Odabir ekvivalentnog koeficijenta reakcije podloge .....	16
7. Prikaz nekih situacija kod kojih dolazi do poprečnog opterećenja pilota.....	23
7.1. Slobodan pilot opterećen iznad razine terena .....	23
7.2. Deformacijska energija pilota .....	26
8. Proračunska analiza pilota .....	29
9. ZAKLJUČAK.....	42
Literatura .....	43
Popis slika .....	44
Popis Tablica .....	45

# 1. Uvod

Kada tlo u dostupnoj dubini nema dovoljnu moć nošenja ili je pak njegova stišljivost prevelika, pa bi slijeganje bilo neprihvatljivo veliko, građevina se mora osloniti na dublje slojeve tla koji imaju veću nosivost ili manju stišljivost. U takvim slučajevima riječ je o dubokom temeljenju građevine, među koje spada i temeljenje na pilotima. Piloti su stupovi od čvrstog materijala koji, uz zahtjevani stupanj sigurnosti, prenose sile od građevine na dublje slojeve tla.

Pilot je dominantno jednodimenzionalni (štapni) element, dok materijali od kojih se rade piloti mogu biti različiti (drvo, beton, prednapregnuti beton, čelik). Bez obzira na materijal od kojeg je izrađen, pilot je element u sistemu konstrukcija - tlo čija je krutost puno veća od krutosti tla u kojem se pilot nalazi i čije se ponašanje može relativno točno predvidjeti uobičajenim simplifikacijama (linearno elastični materijal), barem za uobičajeni raspon radnih sila.

S druge strane, tlo ima sasvim drugačije osobine od pilota. Geometrijske i mehaničke karakteristike tla se ne mogu unaprijed propisati, već ih treba utvrditi na svakoj lokaciji gdje se želi graditi. Općenito karakteristike tla, u onom smislu koje zanima građevinskog inženjera, su nelinearno i neelastično ponašanje uz svojstva nehomogenosti i anizotropnosti. Isto tako realno tlo pokazuje svojstva povezanog kontinuuma tj. djelovanjem opterećenja u jednoj točki neće doći do deformacija i pomaka samo u toj točki, već i u onim točkama koje nisu direktno opterećene.

Iz tih razloga problem zajedničkog rada dva tako različita elementa postaje vrlo složen. Općenito statička analiza pilota u tlu spada u kategoriju problema interakcije objekt - tlo. Reaktivni pritisci tla ovisni su o pomaku pilota, ali s druge strane veličina pomaka pilota ovisi o otporu tla.



Pilot kao konstruktivni element može biti opterećen kosom silom i momentom. Rastavljanjem sile na komponentu u smjeru osi pilota i okomito na os, analiza se može svesti na odvojene probleme uzdužno i poprečno opterećenog pilota. Kod uzdužno opterećenih pilota u većini je slučajeva tlo kritični element, jer uzdužne sile koje djeluju na pilot nisu dovoljno velike da značajnije deformiraju pilot (skraćenje ili produljenje), prije nego li dođe do loma tla. S druge strane, kod poprečno opterećenih pilota, opterećenja na pilot su dovoljno velika da se mora izvršiti analiza naprezanja i deformacija u pilotu jer pilot postaje kritičan element u sistemu konstrukcija - tlo.

U ovom radu će se dati prikaz različitih načina proračuna poprečno opterećenih pilota, koji se mogu podijeliti prema načinu modeliranja tla.

Najstariji način opisivanja ponašanja tla je modeliranje tla nezavisnim oprugama konstantne krutosti ili tzv. Winkler - ov model. Ovaj model je do sada najprimjenjivaniji u praksi zbog svoje jednostavnosti, te velikog iskustva u primjeni modela na različitim inženjerskim problemima.

Zadnji način modeliranja tla je analiza metodom konačnih elemenata, gdje se diskretizacijom pilota omogućuje točnije modeliranje problema interakcije pilota i tla.

U radu će se također dati analiza veze između deformacija pilota i potencijalne energije deformiranog pilota, gdje je osnovni cilj utvrđivanje distribucije potencijalne energije deformacija u pilot i tlo za različite računске modele tla.

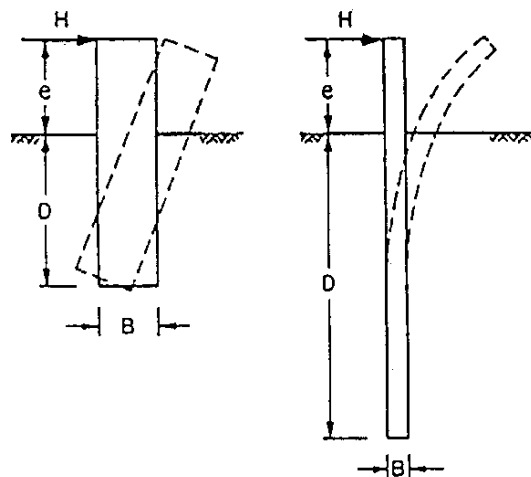
## 2. Klasifikacija pilota

Piloti su u najvećem broju slučajeva opterećeni silom i/ili koncentriranim momentom na svojem vrhu. Kosa sila rastavlja se na komponentu u smjeru osi pilota i okomito na njegovu os. Prethodno je bilo rečeno da su mehanizmi nosivosti za ta dva slučaja potpuno različiti, te se oni analiziraju odvojeno.

Za analizu uzdužno opterećenih pilota nosivost tla imati će ključnu ulogu pri dimenzioniranju, dok će kod poprečno opterećenih pilota to najčešće imati maksimalni moment savijanja u pilotu ili maksimalni (horizontalni) pomak vrha pilota.

Kada pilot može izdržati razinu deformacije koja dovodi do sloma tla nazivamo ga krutim, dok u situaciji kada pilot postaje kritičan i do njegova sloma dolazi pri deformaciji ispod kritične razine za tlo nazivamo ga fleksibilnim ili elastičnim pilotom. Može se reći da su kruti piloti kratki, dok su dugi fleksibilni, međutim za točnu klasifikaciju potrebno je uzeti u obzir i odnos krutosti pilota i tla te dužinu pilota.

Za definiranje krutih ili fleksibilnih pilota koristi se pojam tzv. kritične dužine pilota. To je dužina pilota nakon koje promatrane veličine (pomaci, momenti, reaktivni pritisci) poprimaju beznačajne vrijednosti.



Slika 1. - Kruti i fleksibilni pilot opterećen horizontalnom silom  $H$

Prema Fleming, Weltman, Randolph, Elson (1980) za pilot dane fleksibilne krutosti  $E \cdot I_p$ , koji se nalazi u tlu, koje je karakterizirano koeficijentom reakcije tla  $k$ , kritična dužina pilota definira se kao:

$$l_k = 4 \cdot \left[ \frac{(E \cdot I)_p}{k \cdot d} \right]^{\frac{1}{4}} \quad [m]$$

Vidi se da kritična dužina  $l_k$  uključuje oba elementa tj. pilot i tlo, preko računskog koeficijenta reakcije tla  $k$ , promjera pilota  $d$  i krutosti pilota  $E \cdot I$ . Ako je pilot, u računskom smislu greda, veoma krut u odnosu na tlo,  $l_k$  poprima relativno veliku vrijednost, što će imati za posljedicu da će opterećenje na pilot uzrokovati pomake pilota na značajnijoj udaljenosti od mjesta djelovanja opterećenja. S druge strane mekani pilot i kruto tlo dati će relativno malu kritičnu dužinu. Tako se može za određeni pilot i tlo u kojem se pilot nalazi, odrediti kritična dužinu tog sistema i iz rješenja zadanog problema odrediti točku u kojoj će pomak biti jednak nuli, te nakon koje pomaci padaju na zanemarive vrijednosti. Ako je pilot kraći od kritične dužine nazivamo ga kruti pilot, dok je pilot duži od efektivne dužine fleksibilni pilot. Drugim riječima, što je veći odnos krutosti pilota i tla, to je potrebna veća dužina pilota da ga se može smatrati fleksibilnim.

U slučaju da dno pilota trpi neke pomake i deformacije, a istovremeno dolazi do savijanja pilota uslijed poprečnog opterećenja, takav pilot računamo kao fleksibilni pilot konačne dužine, dok za slučaj kada su pomaci na dnu pilota zanemarivo mali, pilot možemo računati kao da je beskonačno dug. Ovaj drugi slučaj ima utjecaja na pojednostavljenje općeg rješenja diferencijalne jednadžbe prilikom analitičkog rješavanja problema.

### 3. Diferencijalna jednadžba problema i rubni uvjeti

Opća diferencijalna jednadžba problema poprečno opterećenog pilota glasi:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 y(z)}{dz^4} = -q(z) + f(z)$$

gdje su:

- $E$  - modul elastičnosti pilota
- $I$  - moment tromosti poprečnog presjeka pilota
- $y(z)$  - nepoznata funkcija horizontalnog pomaka pilota
- $q(z)$  - nepoznata funkcija reaktivnog pritiska tla
- $f(z)$  - poznata funkcija vanjskog opterećenja na pilot

Ovdje se podrazumijeva da ponašanje pilota odgovara ponašanju elastične grede, za koju vrijedi, uz zanemarenje diferencijalnih veličina drugog reda, da je vrijednost četvrte derivacije funkcije pomaka u promatranoj točki nosača jednaka vanjskoj sili u toj točki. U slučaju običnog grednog nosača na točkastim ležajevima (koji su nepokretni ili su im pomaci unaprijed zadani) vanjsko opterećenje je poznato, pa se rješenje može tražiti direktno. Ležajne reakcije traže se iz uvjeta ravnoteže, a funkcija pomaka grednog nosača iz odgovarajućih rubnih uvjeta.

U slučaju pilota ili općenito nosača koji ne leže na točkastim ležajevima već na kontinuiranoj podlozi, osim nepoznate funkcije pomaka pilota pojavljuje se i nepoznata funkcija raspodjele reaktivnih pritisaka u podlozi tj. na nosač.

Da bi problem bio rješiv, potrebno je pronaći dodatnu vezu između dviju nepoznatih funkcija pomaka i reaktivnih pritisaka. Dodatna veza između nepoznatih pomaka i nepoznatih reaktivnih pritisaka u stvari predstavlja određeni model tla. Ako je model jednostavan, kao u slučaju Winkler - ovog modela, problem će se moći riješiti u zatvorenom obliku. U slučaju složenije veze pomaka i reaktivnih pritisaka, te time vjerojatno i realnijeg opisivanja stvarnog ponašanja tla, problem postaje složeniji i više nije moguće dobiti rješenje u zatvorenom obliku, već se problem rješava numerički.

1. Vrh pilota (gornji kraj)  $z=0$

- slobodan pilot

- poznato:

$$-EI \frac{d^2 y}{dz^2} = M_0$$

$$-EI \frac{d^3 y}{dz^3} = T_0$$

- nepoznato:

$$y(z = 0) = y_0$$

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=0} = \varphi_0$$

- upeti pilot

- poznato:

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=0} = 0$$

$$-EI \frac{d^3 y}{dz^3} = T_0$$

- nepoznato:

$$y(z = 0) = 0$$

$$-EI \frac{d^2 y}{dz^2} = M_0$$

2. Dno pilota (donji kraj)  $z=l$

- slobodan pilot

- poznato:

$$-EI \frac{d^2 y}{dz^2} = M_1 = 0$$

$$-EI \frac{d^3 y}{dz^3} = T_1 = 0$$

- nepoznato:

$$y(z = l) = y_1$$

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=l} = \varphi_1$$

- upeti pilot

- poznato:

$$y(z = l) = 0$$

$$\left(\frac{dy}{dz}\right)_{z=l} = 0$$

- nepoznato:

$$-EI \frac{d^2 y}{dz^2} = M_1$$

$$-EI \frac{d^3 y}{dz^3} = T_1$$

## 4. Općenito o načinu proračuna pilota opterećenih poprečnom silom

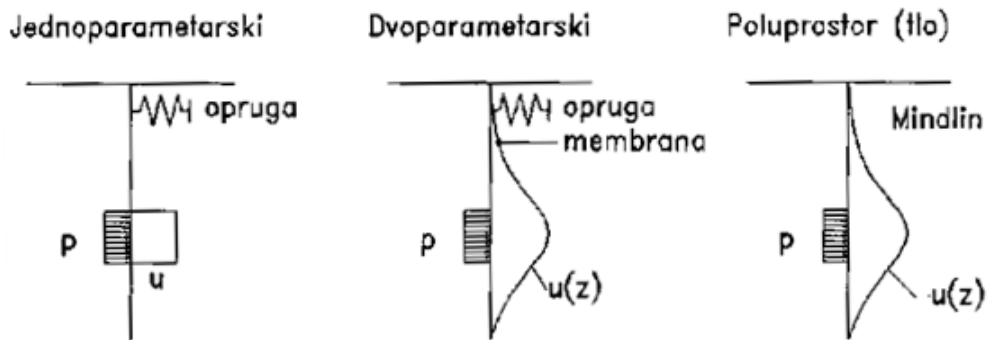
Način proračuna poprečno opterećenih pilota ovisi o složenosti modela, tj. o tome u kojoj mjeri ćemo se računskim modelom približiti stvarnom ponašanju tla. Način proračuna se općenito može podijeliti na analitički i numerički.

Analitički način proračuna primjenjiv je samo na jednostavnim modelima, kao što je Winkler - ov jednoparametarski model s konstantnim koeficijentom reakcije tla po dubini. Isto tako moguće je dobiti rješenje u zatvorenom obliku i za tzv. dvoparametarski model tla, koji osim krutosti opruge, sadrži i dodatni parametar kojim se pokušava opisati svojstvo tla kao povezanog kontinuuma. I u ovom slučaju koeficijent krutosti tla  $k$  konstantan je po dubini. Osim za konstantan koeficijent reakcije tla moguće je dobiti analitičko rješenje za linearno rastući koeficijent reakcije korištenjem redova potencija.

Ovime su iscrpljene mogućnosti analitičkog rješavanja problema, što znači da se od stvarnih svojstava tla jedino nehomogenost tla, preko linearne varijacije koeficijenta, te kontinuiranost, preko dodatnog parametra u dvoparametarskom modelu, može djelomično uzeti u obzir analitičkim putem.

U skupinu modela čija se rješenja ne mogu dobiti u zatvorenom obliku spadaju Mindlin - ov model poluprostora, nelinearni model poluprostora, ali isto tako i nelinearni jednoparametarski i dvoparametarski modeli sa složenijom raspodjelom koeficijenta reakcije tla po dubini.

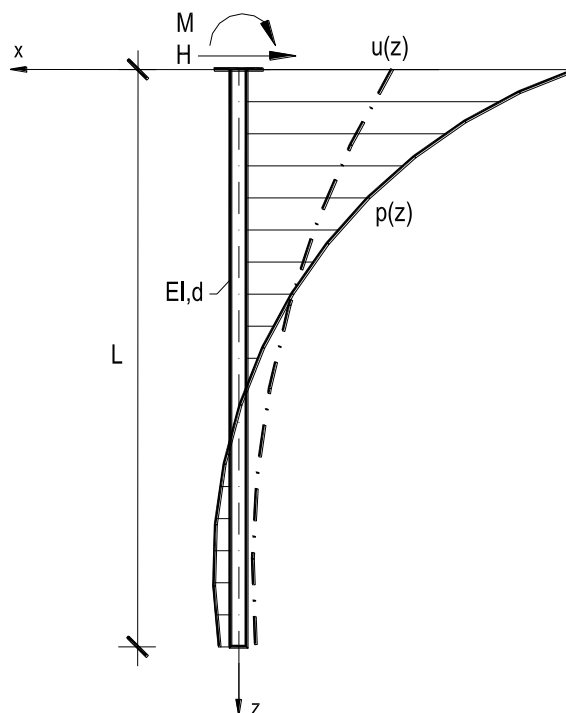
Najprimjenjivnije numeričke metode proračuna su metoda konačnih diferencija, metoda konačnih elemenata i metoda rubnih elemenata. Osnovna karakteristika tih metoda je diskretizacija (matematička ili fizikalna) problema, koja dovodi do formulacije problema preko niza linearnih algebarskih jednadžbi, čime se problem svodi na rješavanje linearnih sustava jednadžbi umjesto traženja rješenja neprekinutih funkcija.



Slika 2. - Prikaz dodatnih veza između nepoznatih funkcija pomaka  $u(z)$  i reaktivnih pritisaka tla  $p(z)$  u jednoparametarskom i dvoparametarskom modelu tla te Mindlin - ovom modelu

## 5. Analitički način proračuna poprečno opterećenih pilota

Promatra se horizontalno opterećen pilot koji je opterećen isključivo na vrhu (glavi) pilota, što omogućuje bitno pojednostavljenje problema u tom smislu što se provodi analiza homogenog dijela osnovne diferencijalne jednačbe. Rubni uvjeti za nalaženje nepoznatih konstanti mogu biti kombinacija upetog i/ili slobodnog pilota na glavi i stopi.



Slika 3. - Horizontalno opterećen vertikalni pilot

Diferencijalna jednačba problema za pilote konstantnog poprečnog presjeka od istog materijala ( $E \cdot I = const$ ) izgleda ovako:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 u(z)}{dz^4} + p(z) = 0$$

Za ovaj izraz karakteristični su slijedeći rubni uvjeti za slobodni i/ili upeti pilot na vrhu i glavi gdje su:

- $T_0, T_l$  - poprečna sila na vrhu i glavi pilota
- $M_0, M_l$  - moment savijanja na vrhu i glavi pilota
- $u_0, u_l$  - pomak vrha i glave pilota
- $\varphi_0, \varphi_l$  - kut zaokreta vrha i glave pilota



## 5.1. Analiza na jednoparametarskom modelu tla

$$p(z) = k \cdot u(z)$$

$k$  [kN/m<sup>3</sup>] je Winkler - ov koeficijent ili koeficijent reakcije tla. Ovaj koeficijent predstavlja krutost tla ili opterećenje po m<sup>2</sup> površine tla koje daje jedinični pomak. Slijedi diferencijalna jednačina:

$$E \cdot I \cdot \frac{d^4 u(z)}{dz^4} + k \cdot u(z) = 0$$

Opće rješenje ove diferencijalne jednačine glasi:

$$u(z) = C_1 \cdot e^{\alpha z} \cdot \cos \alpha z + C_2 \cdot e^{\alpha z} \cdot \sin \alpha z + C_3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos \alpha z + C_4 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \sin \alpha z$$

gdje je:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}}$$

-  $d$  - promjer pilota

Rješenje predstavlja linearnu superpoziciju umnoška eksponencijalnih i trigonometrijskih funkcija. Vidljivo je da numeričke vrijednosti članova uz nepoznate konstante  $C_1$  i  $C_2$  rastu s dubinom zbog eksponencijalnog dijela izraza. To bi značilo da pomak raste što je veća dubina pilota, što nije fizikalno prihvatljivo za duge pilote (kojima je omjer duljine i promjera veći od deset puta). Zbog toga se zanemaruje dio općeg rješenja uz  $C_1$  i  $C_2$  te se pilot tretira kao polubeskonačan sa dva rubna uvjeta samo na glavi pilota te se može pisati:

$$u(z) = C_1 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos \alpha z + C_2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \sin \alpha z$$

Pripadne derivacije ovog općeg rješenja dane su slijedećim izrazima:

$$u'(z) = -C_1 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) + C_2 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z)$$

$$u''(z) = 2 \cdot C_1 \cdot \alpha^2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \sin \alpha z - 2 \cdot C_2 \cdot \alpha^2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot \cos \alpha z$$

$$u'''(z) = 2 \cdot C_1 \cdot \alpha^3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z) + 2 \cdot C_2 \cdot \alpha^3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z)$$

Funkcija momenata savijanja:

$$M(z) = -E \cdot I \cdot u''(z) = 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^2 \cdot e^{-\alpha z} \cdot (C_2 \cdot \cos \alpha z - C_1 \cdot \sin \alpha z)$$

Funkcija poprečnih sila duž nosača:

$$T(z) = -E \cdot I \cdot u'''(z) = 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^3 \cdot e^{-\alpha z} \cdot [(C_1 - C_2) \cdot \sin \alpha z - (C_1 + C_2) \cdot \cos \alpha z]$$

U slučaju beskonačno dugog pilota provodi se analiza dvije kombinacije rubnih uvjeta na glavi pilota (na stopi su za duge pilote pomak i kut zaokreta jednaki nuli zbog velike vrijednosti argumenta  $z$ ):

Slobodan pilot:

$$\begin{array}{lll} M(0) = M_0 & \Rightarrow & 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^2 \cdot C_2 = M_0 \\ T(0) = H_0 & \Rightarrow & 2 \cdot E \cdot I \cdot \alpha^3 \cdot (C_1 + C_2) = -H_0 \end{array}$$

Rješenje sustava:

$$C_1 = -\frac{H_0 + \alpha \cdot M_0}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I}$$

$$C_2 = \frac{\alpha \cdot M_0}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I}$$

Konačno redom funkcije pomaka, kuta zaokreta, momenta i poprečnih sila:

$$u(z) = -\frac{e^{-\alpha z}}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I} \cdot [(H_0 + \alpha \cdot M_0) \cdot \cos \alpha z - \alpha \cdot M_0 \cdot \sin \alpha z]$$

$$u'(z) = -\frac{(H_0 + \alpha \cdot M_0)}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) + \frac{\alpha \cdot M_0}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z)$$

$$M(z) = e^{-\alpha z} \cdot \left[ \left( \frac{H_0}{\alpha} + M_0 \right) \cdot \sin \alpha z + M_0 \cdot \cos \alpha z \right]$$

$$T(z) = \alpha e^{-\alpha z} \cdot \left[ \left( \frac{H_0}{\alpha} + M_0 \right) \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z) - M_0 \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) \right]$$

Vidljivo je da jednoparametarski model ne opisuje svojstvo tla kao kontinuuma, jer pomak tla u takvom modelu nastaje samo u točkama gdje djeluje opterećenje. Susjedne točke koje nisu direktno opterećene nepomične su, što je u suprotnosti s realnim ponašanjem tla. Isto tako Winkler - ov koeficijent reakcije tla u stvarnosti nije konstantan, već ovisi o opterećenju i veličini opterećene površine te vrijedi samo za određeno stanje naprezanja u tlu. Za isti iznos opterećenja, na istom tlu za dvije različite veličine opterećene površine dobivaju se različite vrijednosti koeficijenta reakcije tla u istoj promatranoj točki.

## 5.2. Analiza na dvoparametarskom modelu tla

$$p(z) = k \cdot u(z) - N \cdot \frac{d^2 u}{dz^2}$$

Opće rješenje diferencijalne jednačbe može se napisati u sljedećem obliku:

$$u(z) = e^{\alpha z} \cdot (C_1 \cdot \cos \beta z + C_2 \cdot \sin \beta z) + e^{-\alpha z} \cdot (C_3 \cdot \cos \beta z + C_4 \cdot \sin \beta z)$$

gdje je:

$$- \alpha = \sqrt{\lambda^2 + \frac{N}{4 \cdot E \cdot I}}$$

$$- \beta = \sqrt{\lambda^2 - \frac{N}{4 \cdot E \cdot I}}$$

$$- \lambda = \sqrt[4]{\frac{k \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}} \quad [1/m]$$

-  $k, d, E, I, C_i$  - kao i kod jednoparametarskog modela

Može se računati s beskonačno dugim pilotom, kao i kod jednoparametarskog modela, kada je dužina pilota veća od kritične, pa je opće rješenje:

$$u(z) = e^{-\alpha z} \cdot (C_3 \cdot \cos \beta z + C_4 \cdot \sin \beta z)$$

Nepoznate konstante  $C_3$  i  $C_4$  određuju se iz rubnih uvjeta na vrhu pilota.

Dvoparametarski model, koji je nastao kasnije od jednoparametarskog modela i koji je imao za cilj poboljšanje jednoparametarskog modela tla, opisuje svojstvo tla kao kontinuiranog medija preko krutosti membrane. Međutim kao i kod jednoparametarskog modela tla, pojavljuje se problem određivanja parametara modela  $k$  i  $N$ . Ovi parametri nisu fizikalni parametri te ih je problem odrediti u konkretnom inženjerskom problemu.

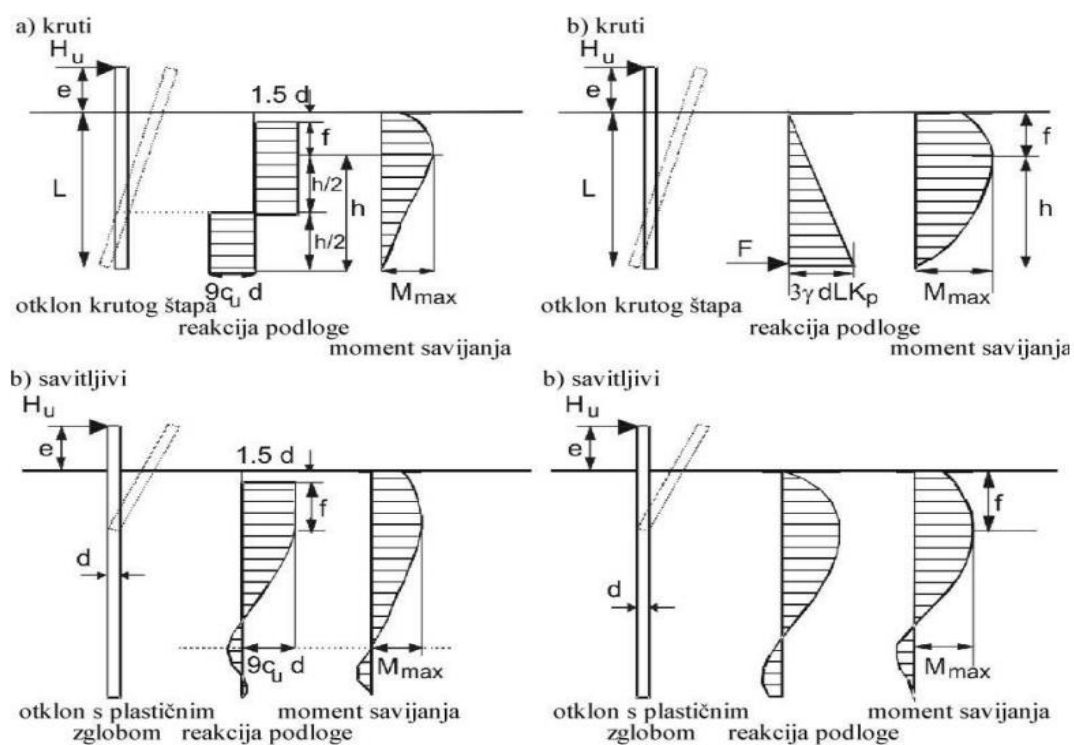
Nastavno će se ukazati na moguće rubne uvjete i njihove kombinacije o kojima ovise pojednostavljeni proračuni pilota opterećenih vodoravnom silom (Broms, 1964. i Poulos i Davis 1980.). Iza rubnih uvjeta dani su crteži i pripadna pojednostavljena rješenja za proračune. Podjela se može izvršiti kako slijedi:

a) Prema odnosu dužine i poprečnog presjeka pilota, može ih se podijeliti na krute i savitljive. Kako raspodjela reakcije podloge ovisi izravno o nametnutoj deformaciji u tlu, to ovaj čimbenik ima važan utjecaj na model, odabran za proračun.

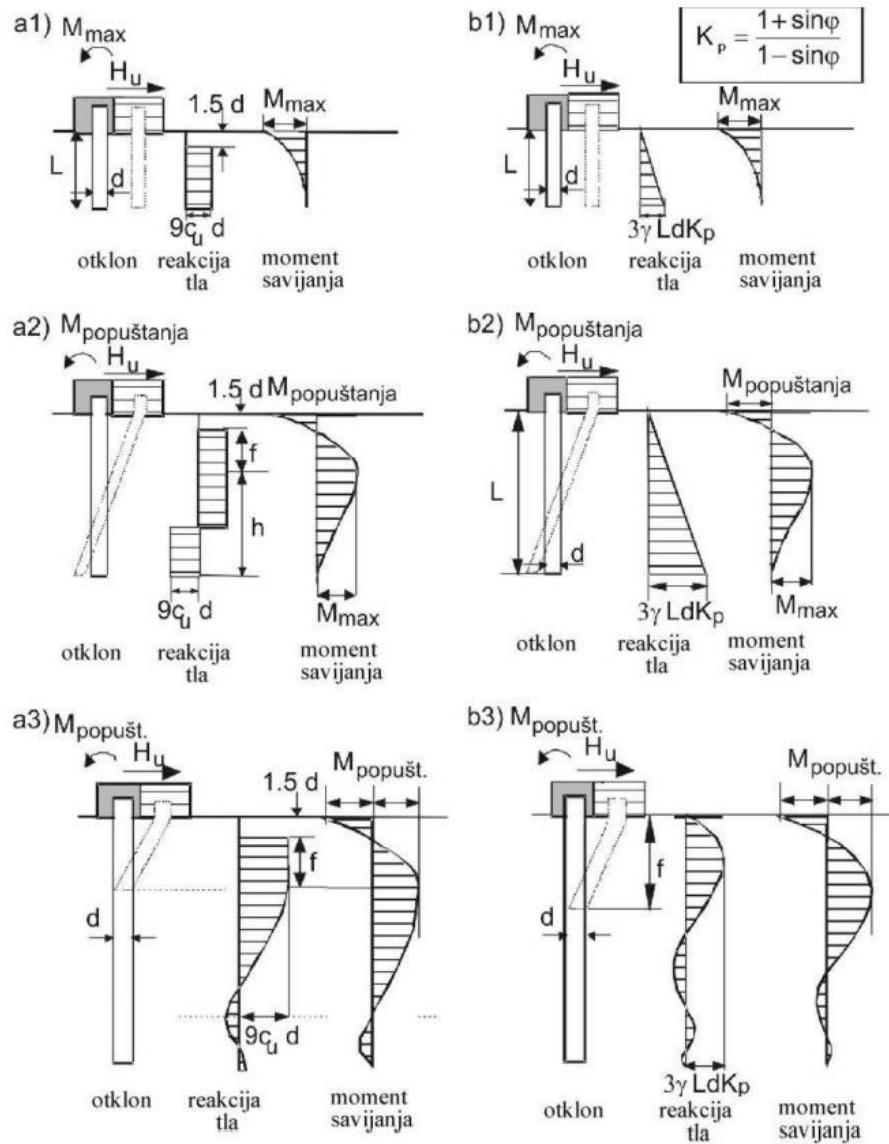
b) Prema učvršćenju u naglavnu konstrukciju može ih se podijeliti na pilote slobodne glave (glava se ponaša kao slobodni rub konzole) (sl. 4), i upete u naglavnu konstrukciju, (što onemogućava zaokret glave pilota) (sl. 5).

c) Prema dužini mogu biti kratki i dugi piloti

d) Prema načinu oblikovanja reakcije podloge razlikuju se piloti izvedeni u glini i piloti izvedeni u pijesku, a razlika u oblikovanju reakcije podloge je vidljiva na (slikama 4 i 5.)



Slika 4. Kruti i savitljivi pilot slobodne glave: a) u glini, koherentno i b) pijesku

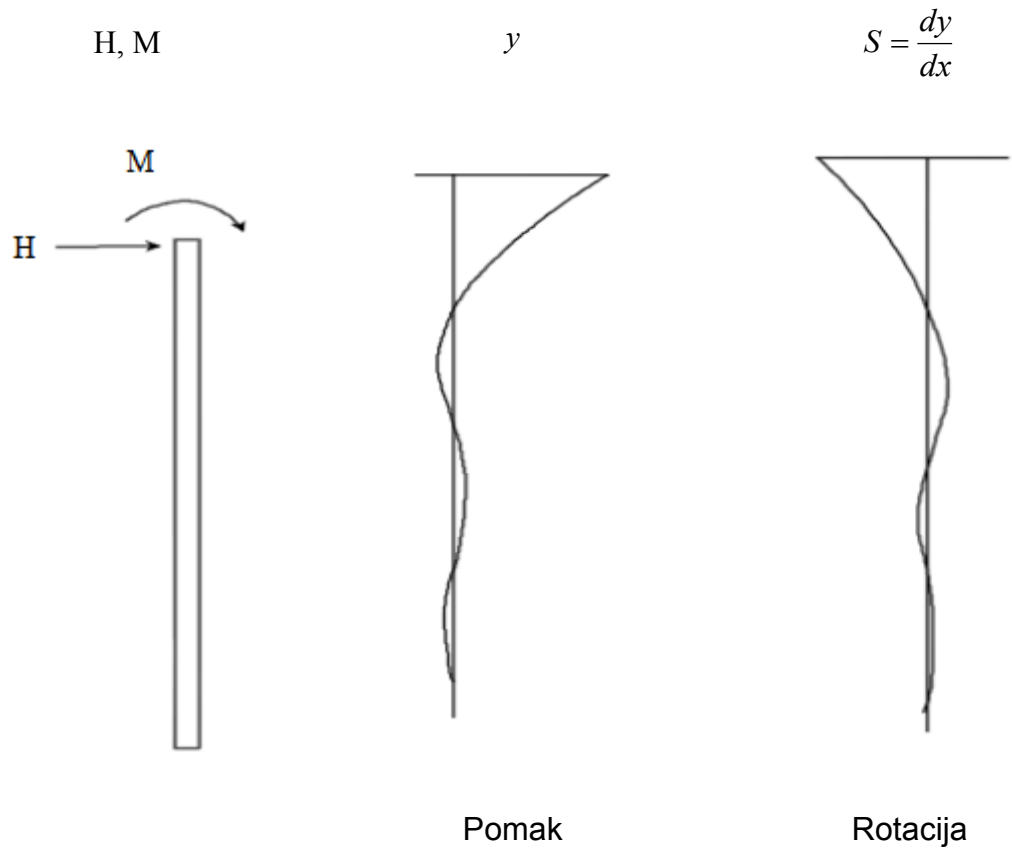


Slika 5. Piloti pridržane glave, različitih duljina, a) u glini i b) pijesku ; 1) kratki; 2) srednji; 3) dugi (prema Broms, 1964)

## 6. Odabir ekvivalentnog koeficijenta reakcije podloge

Konkretan odabir vrijednosti  $k$  ovisi o nizu faktora:

- ispitivanju pilota na terenu
- modelskom ispitivanju pilota
- načinu izvedbe pilota
- rezultatima laboratorijskih i *in situ* ispitivanja svojstava tla
- postojećem iskustvu na predmetnoj lokaciji
- fazi projektiranja
- uračunatom riziku
- iskustvu projektanta



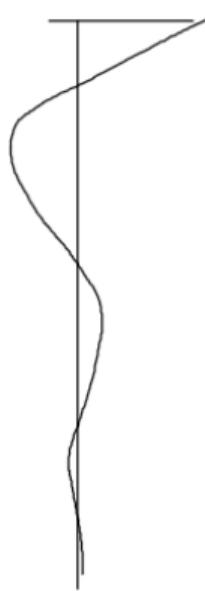
$$M = E \cdot I \cdot \left( \frac{d^2 y}{dx^2} \right)$$

$$V = E \cdot I \cdot \left( \frac{d^3 y}{dx^3} \right)$$

$$p = E \cdot I \cdot \left( \frac{d^4 y}{dx^4} \right)$$



Moment



Posmik



Reakcija tla

Slika 6. - Funkcije naprezanja pilota i tla



$$k_{hi} = \frac{P_i}{w_i} \quad \left[ \frac{kN}{m^3} \right]$$

Odabir krutosti opruga  $k_h$  i raspodjela po dubini ovisi o parametrima koji su na raspolaganju:

- vrsta tla
- parametri deformabilnosti  $E, \nu$
- dopuštena nosivost pilota  $q_a$
- rezultati provedenih istražnih radova (SPT, presiometar...)
- rezultati *in situ* ispitivanja pilota
- krutosti pilota na djelovanje horizontalne sile i momenta

Odabir koeficijenta elastičnosti u poprečnom smjeru

Empirijske korelacije

Koherentna tla (glina)

$$k_h = n_b / d$$

$$n_b = 8 \text{ MN/m}^2$$

$$n_b = 16 \text{ MN/m}^2$$

$$n_b = 32 \text{ MN/m}^2$$

Lako gnječiva glina

Teško gnječiva glina

Čvrsta glina

## Nekoherentna tla (pijesak)

$$k_h = n_h \cdot z/d$$

Suhi pijesak	Rahli pijesak	Potopljeni pijesak
$n_h = 2,2 \text{ MN/m}^3$		$n_h = 1,3 \text{ MN/m}^3$
$n_h = 6,7 \text{ MN/m}^3$	Srednje zbijeni pijesak	$n_h = 4,5 \text{ MN/m}^3$
$n_h = 18,0 \text{ MN/m}^3$	Zbijeni pijesak	$n_h = 17,0 \text{ MN/m}^3$

## Preko modula elastičnosti tla $E_S$

### Vesić

$$k = \frac{0,65 \cdot E_S}{(1 - \nu_S^2)} \cdot \left( \frac{E_S \cdot d^4}{E_p \cdot I_p} \right)^{\frac{1}{12}}$$

-  $E_p \cdot I_p$  - krutost pilota

### Glick

Za  $2 \cdot L/d = 90 - 120$  i  $\nu = 0,2 - 0,4$

$$k_h = (0,8 - 1,1) \cdot E_S/d$$

### Chen

$$k_h = 1,6 \cdot E_S/d$$

Koherentna tla

$$k_h = 3 \cdot E_S/d$$

Nekoherentna tla

Tablica 1. Rasponi vrijednosti modula elastičnosti

Vrsta tla	Modul el. $E_{s,v}$ [kN/m <sup>2</sup> ]
Gline	
Meke	1000 – 15000
Srednje tvrde	15000 – 30000
Tvrde	30000 – 100000
Pijesci	
Prašinasti	7000 – 20000
Rahli	10000 – 20000
Srednje zbijeni	20000 – 40000
Zbijeni	40000 – 80000
Šljunci	
Rahli	30000 – 80000
Srednje zbijeni	70000 – 100000
Zbijeni	100000 - 200000

$$E_{s,h} = \left(\frac{1}{3} \div \frac{1}{1}\right) E_{s,v}$$

Na osnovu *in situ* ispitivanja pilota

$$\alpha = \sqrt[3]{\frac{H_0}{2 \cdot E \cdot I \cdot u_0}} \text{ - za slobodan polubeskonačan pilot}$$

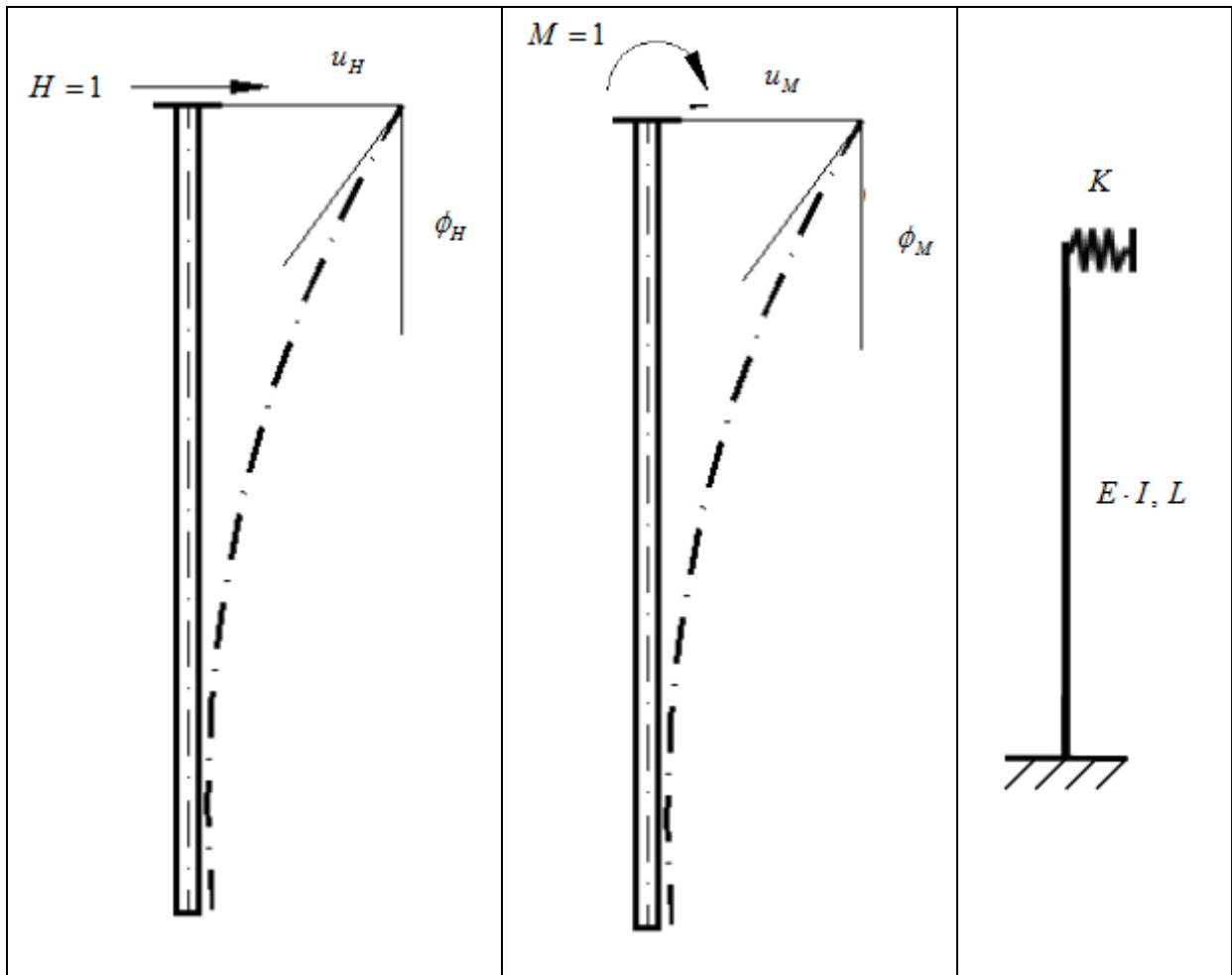
$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}}$$

$$k_{ekv} = \frac{4 \cdot E \cdot I}{d} \cdot \left( \frac{H_0}{2 \cdot E \cdot I \cdot u_0} \right)^{\frac{4}{3}}$$

gdje je:

- $H_0$  - horizontalna sila
- $u_0$  - horizontalni pomak

Poznavanje krutosti (fleksibilnosti) pilota na djelovanje poprečne sile i momenta savijanja.



Slika 7. - Fleksibilnost pilota na djelovanje poprečne sile i momenta

$$L = \frac{3}{2} \cdot \frac{u_H}{u_M}$$

$$E \cdot I = \frac{27}{24 \cdot u_H} \cdot \left( \frac{u_H}{u_M} \right)^3 \cdot (1 - K \cdot u_H)$$

$$K = \frac{\frac{3}{2} \cdot \frac{u_H}{\varphi_M \cdot u_M} - \frac{9}{8} \cdot \frac{u_H^2}{u_M^3}}{\frac{9}{8} \cdot \frac{u_M}{\varphi_M} \cdot \left( \frac{u_H^2}{u_M} \right) - \frac{9}{8} \cdot \left( \frac{u_H}{u_M} \right)^3}$$

## 7. Prikaz nekih situacija kod kojih dolazi do poprečnog opterećenja pilota

### 7.1. Slobodan pilot opterećen iznad razine terena

Za djelovanje horizontalne sile  $H$  na vertikalni pilot potrebno je odrediti ukupni pomak točke  $A$  (slika 7).

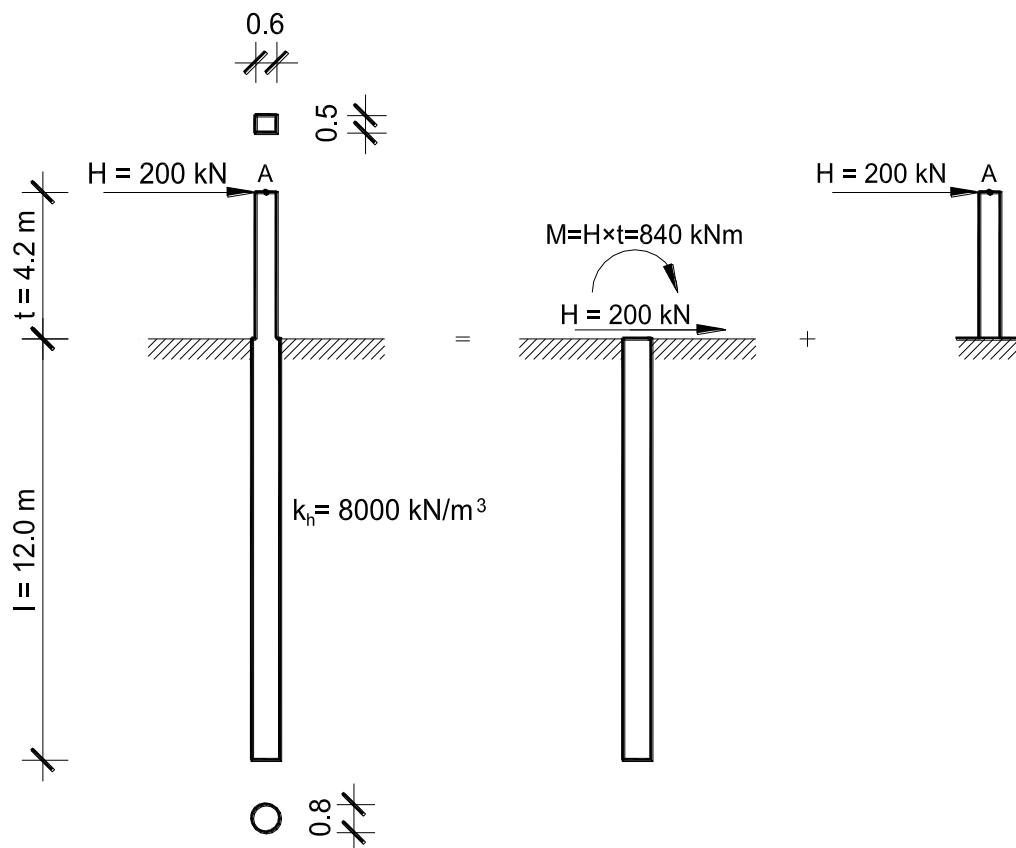
$$E = 3 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$I = 0,8^4 \cdot 3,14 / 64 = 0,0201 \text{ m}^4$$

$$E \cdot I = 3 \cdot 10^7 \cdot 0,0201 = 6,03 \cdot 10^5 \text{ kNm}^2$$

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k_h \cdot d}{4 \cdot E \cdot I}} = \sqrt[4]{\frac{8000 \cdot 0,8}{4 \cdot 6,03 \cdot 10^5}} = 0,227 \text{ m}^{-1}$$

Pretpostavlja se kruta veza u razini terena između dvaju dijelova različitih poprečnih presjeka.

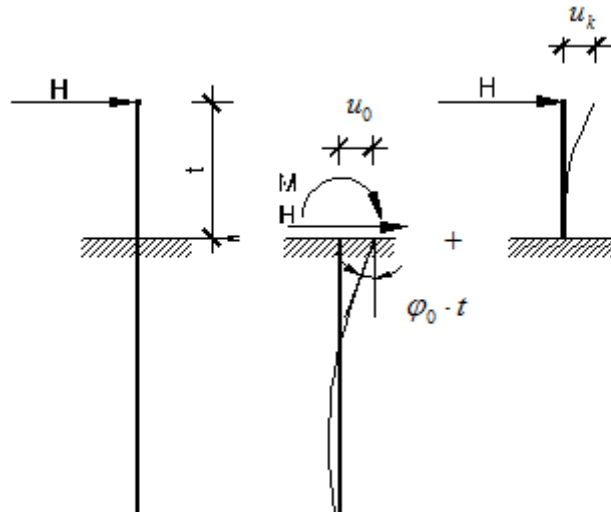


Slika 8. - Slobodni pilot opterećen iznad razine terena

Rješenje zadatka bazira se na rastavljanju zadanog sustava na dva nezavisna statička sistema. Ukupni pomak vrha pilota dobiva se superpozicijom pomaka dobivenog opterećenjem pilota u razini terena te pomaka dobivenog na konzoli.

U ovom slučaju pilot je u razini terena opterećen silom  $H$  te momentom  $M = H \cdot t$ , dok je konzola opterećena silom  $H$ . Za ukupni horizontalni pomak točke  $A$  može se pisati:

$$u_u = u_0 + \varphi_0 \cdot t + u_k$$



Slika 9. - Ukupni pomak slobodnog pilota opterećenog iznad razine terena

Iz općih izraza za pomak i kut zaokreta za pilot opterećen u razini terena silom  $H$  te momentom  $M = H \cdot t$  može se pisati:

$$u(z) = -\frac{e^{-\alpha z}}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I} \cdot [(H + \alpha \cdot H \cdot t) \cdot \cos \alpha z - \alpha \cdot H \cdot t \cdot \sin \alpha z]$$

$$u'(z) = -\frac{(H + \alpha \cdot H \cdot t)}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z + \sin \alpha z) + \frac{\alpha \cdot H \cdot t}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} \cdot e^{-\alpha z} \cdot (\cos \alpha z - \sin \alpha z)$$

Za  $z = 0$ :

$$u(0) = u_o = -\frac{H + \alpha \cdot H \cdot t}{2 \cdot \alpha^3 \cdot E \cdot I} = \frac{200 \cdot (1 + 0,227 \cdot 4,2)}{2 \cdot 0,227^3 \cdot 6,03 \cdot 10^5} = 0,028 \text{ m}$$

$$u'(0) = \varphi_0 = \frac{(H + 2 \cdot \alpha \cdot H \cdot t)}{2 \cdot \alpha^2 \cdot E \cdot I} = \frac{200 \cdot (1 + 2 \cdot 0,227 \cdot 4,2)}{2 \cdot 0,227^2 \cdot 6,03 \cdot 10^5} = 0,009$$

$$\varphi_0 \cdot t = 0,009 \cdot 4,2 = 0,038 \text{ m}$$

Pomak konzole:

$$u_k = \frac{H \cdot t^3}{3 \cdot E \cdot I_k} = \frac{200 \cdot 4,2^3}{3 \cdot 3 \cdot 10^7 \cdot \frac{0,5 \cdot 0,6^3}{12}} = 0,018 \text{ m}$$

Ukupni pomak:

$$u_u = 0,028 + 0,038 + 0,018 = 0,084 \text{ m}$$



## 7.2. Deformacijska energija pilota

Primjena izraza za deformacijsku energiju pilota je prilikom dimenzioniranja obalnih konstrukcija temeljenih na pilotima, gdje dolazi do horizontalnog udara broda, jedan od važnijih parametara. Osnovna ideja u korištenju energije deformiranog pilota je u tome da se pretpostavi da ukupnu kinetičku energiju broda ne amortizira samo deformacijsku energija odbojnika, već da u izraz za energetske ravnoteže uđe i deformacijska energija obalne konstrukcije i tla u kojem je ona temeljena.

Kada cjelokupnu kinetičku energiju broda preuzima samo elastični odbojnik izraz za energetske ravnoteže kinetičke energije broda i deformacijske energije elastičnog odbojnika može se simbolički napisati ovako:

$$E_{kin} = E_{od}$$

gdje je:

- $E_{kin}$  - kinetička energija broda
- $E_{od}$  - deformacijska energija odbojnika

Na taj se način konstrukcija, ali i tlo u kojem je ona temeljena, prilikom djelovanja broda smatra apsolutno krutom, tj. ona se ne deformira prilikom djelovanja udara broda. Međutim kada se odredi ekvivalentna statička sila na konstrukciju, ona će dati pomak te konstrukcije što znači da će generirati i dodatnu deformacijsku energiju. Na taj način energetska ravnoteža neće biti zadovoljena.

Zatim se za generiranu deformacijsku energiju odbojnika određuje ekvivalentna statička sila koja djeluje na konstrukciju. Ova se sila određuje na osnovu dijagrama koje daju proizvođači odbojnika gdje se daje veza djelujuće energije, pomaka i ekvivalentne statičke sile.

Kada se uzmu u obzir i deformacijske energije ostalih dijelova nosivog sklopa uključujući i tlo u kojem je konstrukcija temeljena, izraz za kinetičku energiju izgleda ovako:

$$E_{kin} = E_{od} + E_{kon} + E_t = E_{od} + E_{ng} + E_p + E_t$$

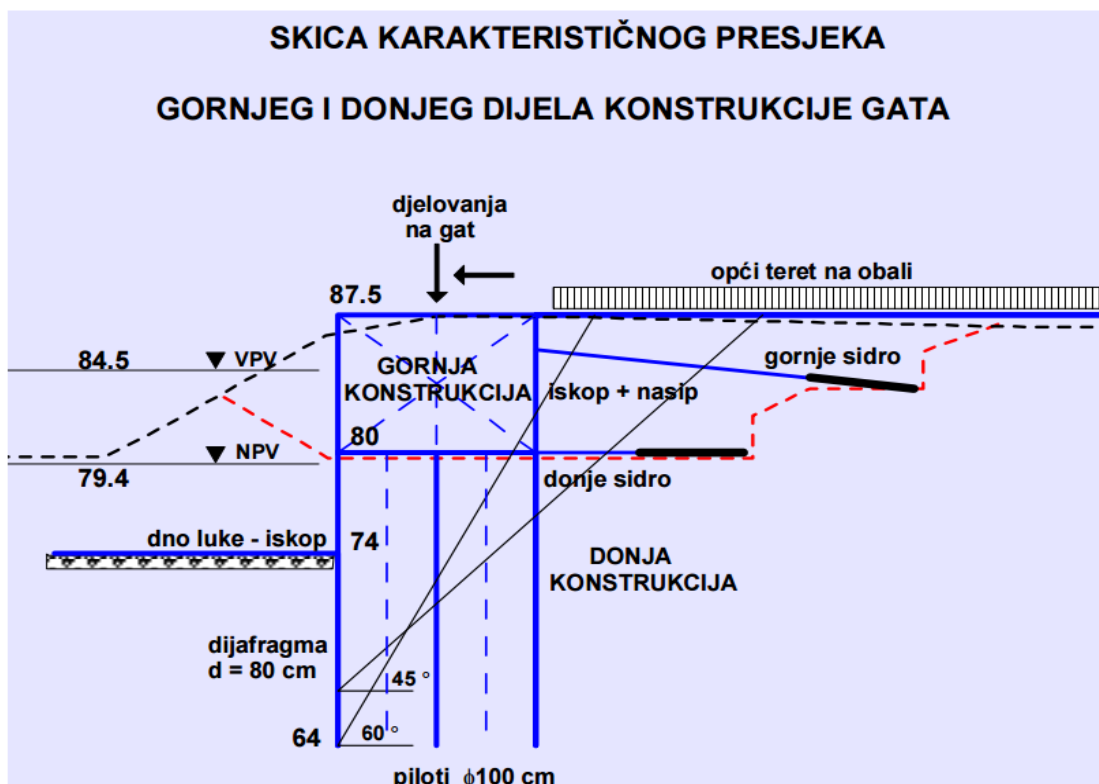
gdje je:

- $E_{kon}$  - deformacijska energija konstrukcije
- $E_t$  - deformacijska energija tla
- $E_{ng}$  - deformacijska energija naglavne grede
- $E_p$  - deformacijska energija pilota iznad i ispod razine tla

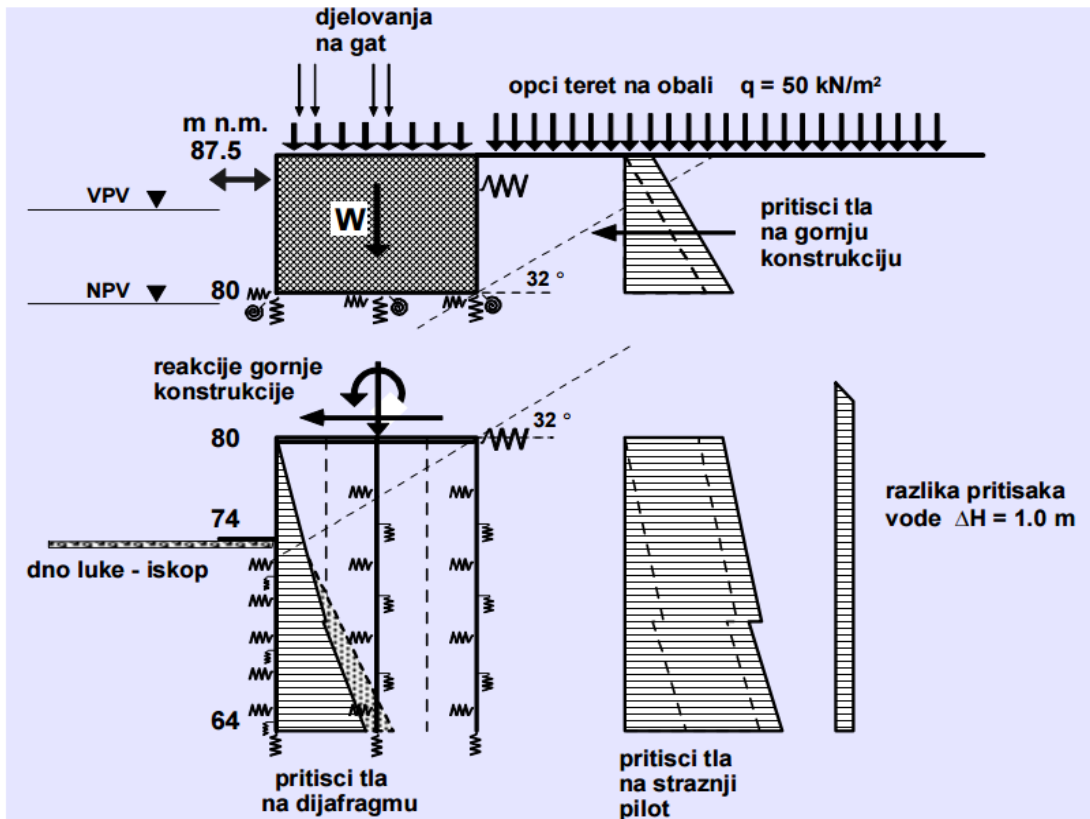
Sada se veličina ekvivalentne sile na odbojnik neće tražiti za ukupnu kinetičku energiju, već za razliku kinetičke energije i dijela energije koja je ušla u obalnu konstrukciju i tlo. Na taj način ekvivalentna sila, ujedno i mjerodavna sila za dimenzioniranje konstrukcije, postaje manja, a energetska ravnoteža ostaje sačuvana.

Za uobičajeni raspon dimenzija konstrukcije i karakteristika tla, ova ekvivalentna sila je oko 25 % manja nego u slučaju kada se uzima u obzir samo deformacijska energija elastičnog odbojnika.

Primjer 1. Modeli za geotehničke proračune za obalnu konstrukciju Luka Osijek ( slika 8 i slika 9 ).

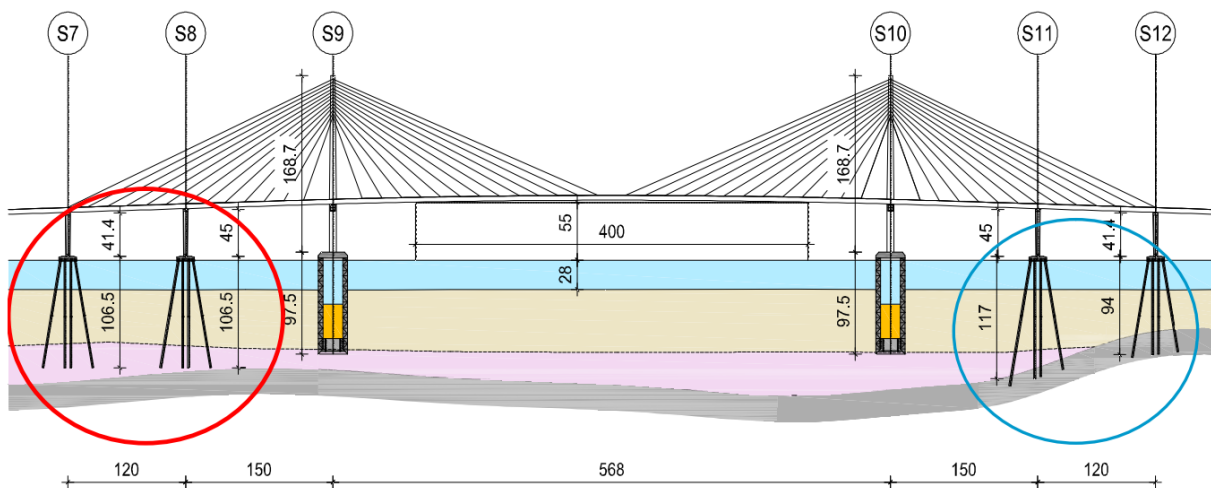


Slika 10. Shematski prikaz elemenata obalne konstrukcije



Slika 11. Shematski prikaz razdvojenog proračunskog modela obalne konstrukcije

### Primjer 2. Temeljenje mosta Pelješac



Slika 12. Shematski prikaz temelja stupova- zabijeni piloti

## 8. Proračunska analiza pilota

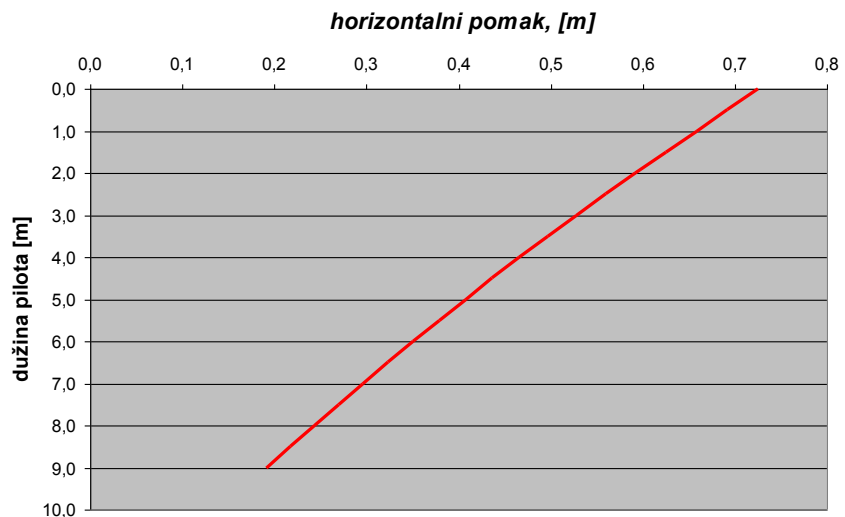
Analiza utjecaja koeficijenta reakcije podloge  $k$  na raspodjelu pomaka, momenata savijanja i poprečnih sila za polubeskonačan pilot. Raspon vrijednosti  $k$  je 500, 1 000, 5 000, 10 000, 50 000 i 100 000. Pilot je okruglog presjeka promjera  $d = 1 \text{ m}$ , duljine  $l = 9 \text{ m}$ , armirano betonski s modulom elastičnosti  $E = 3 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2$  i Poisson - ovim koeficijentom  $\nu = 0,3$ .

### Proračun za koeficijent reakcije tla, $k=500 \text{ kN/m}^3$

Horizontalni pomak  $w(x)$ , [m]

Tablica 2. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

x (l)	w(x)
0,0	0,72558
0,5	0,69187
1,0	0,65832
1,5	0,62506
2,0	0,59221
2,5	0,55986
3,0	0,52808
3,5	0,49692
4,0	0,46640
4,5	0,43654
5,0	0,40732
5,5	0,37873
6,0	0,35074
6,5	0,32328
7,0	0,29629
7,5	0,26971
8,0	0,24344
8,5	0,21738
9,0	0,19144

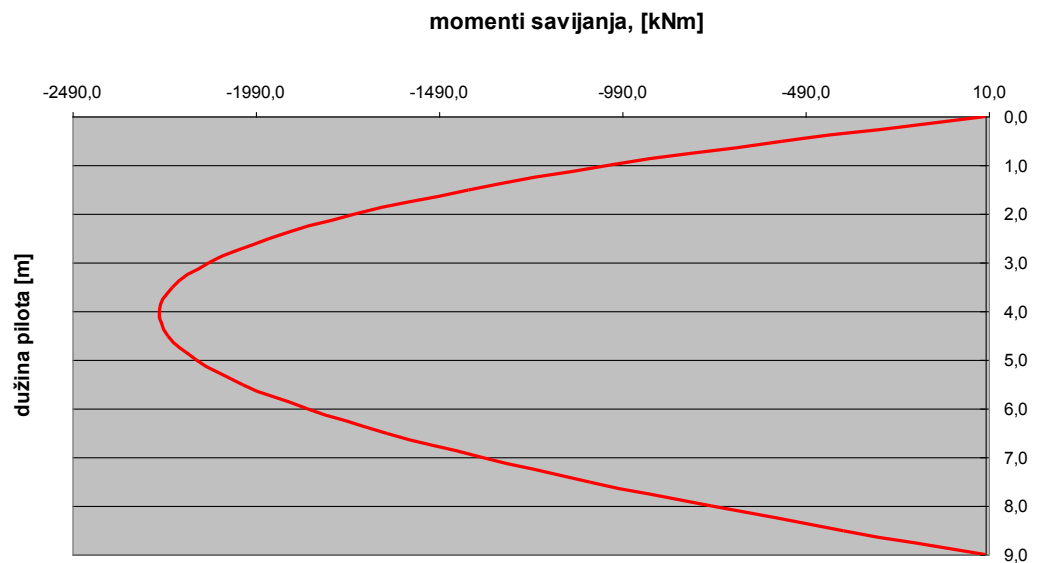


Slika 13. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

### Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]

Tablica 3. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

x (l)	M(x)
0,0	0,00
0,5	-555,35
1,0	-1024,22
1,5	-1410,80
2,0	-1719,24
2,5	-1953,65
3,0	-2118,07
3,5	-2216,47
4,0	-2252,75
4,5	-2230,72
5,0	-2154,12
5,5	-2026,60
6,0	-1851,73
6,5	-1633,01
7,0	-1373,88
7,5	-1077,71
8,0	-747,82
8,5	-387,49
9,0	0,00

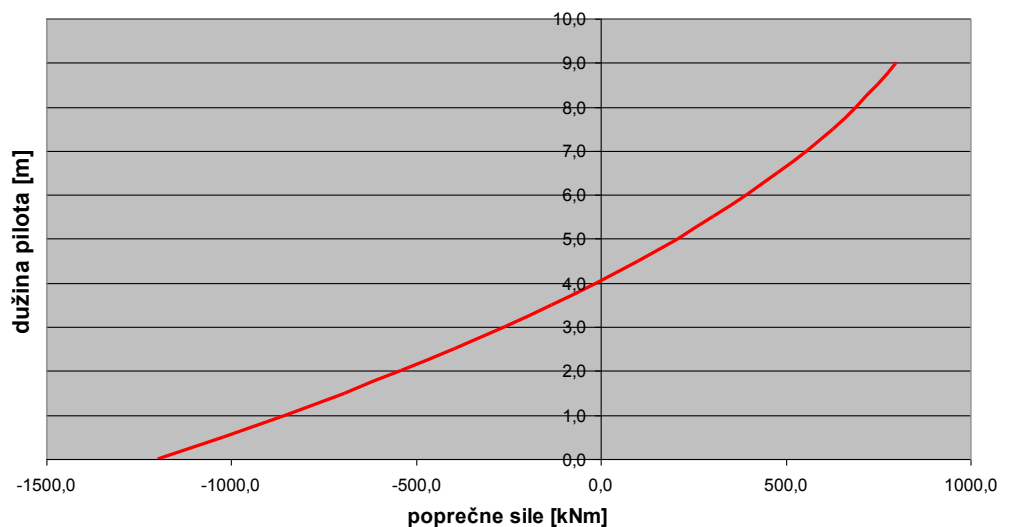


Slika 14. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

### Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]

Tablica 4. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

x (l)	Q(x)
0,0	-1200,00
0,5	-1022,82
1,0	-854,05
1,5	-693,64
2,0	-541,49
2,5	-397,49
3,0	-261,51
3,5	-133,40
4,0	-13,00
4,5	99,86
5,0	205,33
5,5	303,57
6,0	394,74
6,5	478,98
7,0	556,42
7,5	627,16
8,0	691,30
8,5	748,90
9,0	800,00



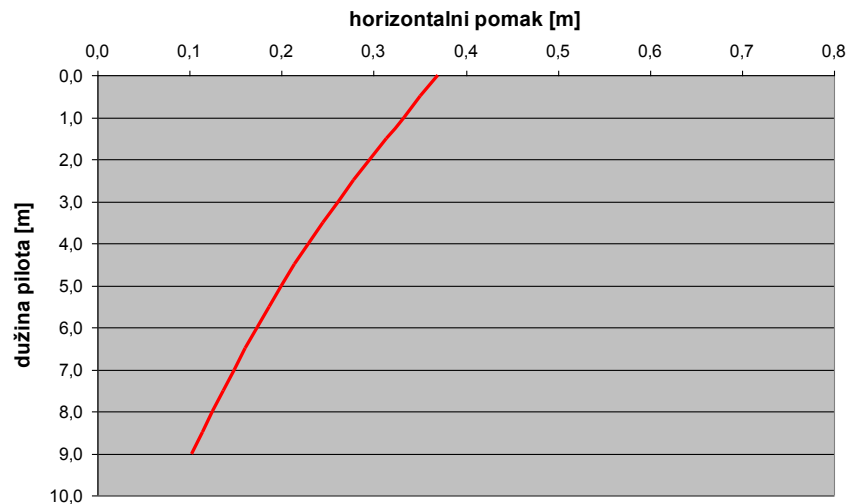
Slika 15. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

## Proračun za koeficijent reakcije tla, $k=1000 \text{ kN/m}^3$

### Horizontalni pomak $w(x)$ , [m]

Tablica 5. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

x (l)	w(x)
0,0	0,36992
0,5	0,35105
1,0	0,33234
1,5	0,31392
2,0	0,29591
2,5	0,27840
3,0	0,26146
3,5	0,24512
4,0	0,22942
4,5	0,21438
5,0	0,19997
5,5	0,18619
6,0	0,17300
6,5	0,16033
7,0	0,14814
7,5	0,13635
8,0	0,12487
8,5	0,11360
9,0	0,10245

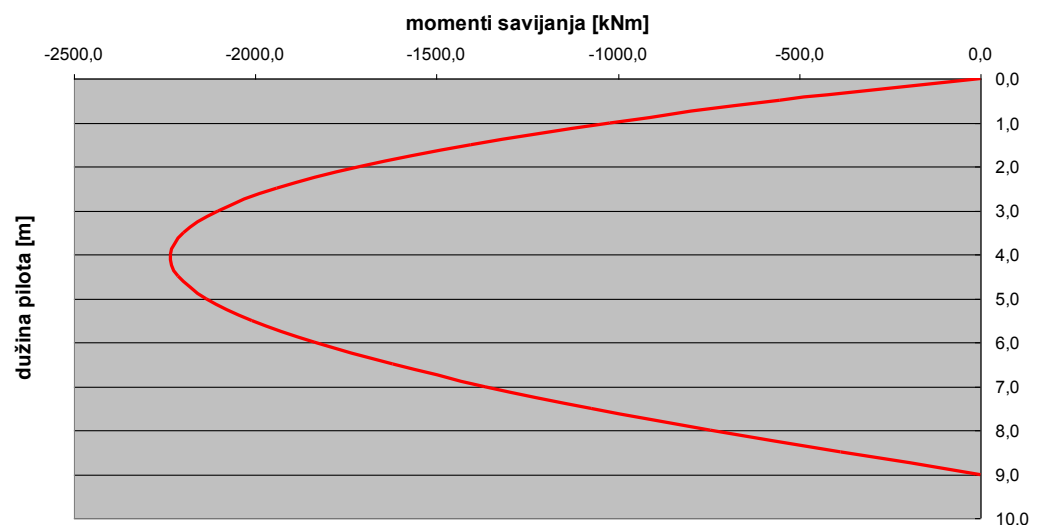


Slika 16. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

### Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]

Tablica 6. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

x (l)	M(x)
0,0	0,00
0,5	-554,55
1,0	-1021,33
1,5	-1405,02
2,0	-1710,22
2,5	-1941,43
3,0	-2103,02
3,5	-2199,25
4,0	-2234,17
4,5	-2211,73
5,0	-2135,69
5,5	-2009,63
6,0	-1837,02
6,5	-1621,14
7,0	-1365,17
7,5	-1072,16
8,0	-745,06
8,5	-386,73
9,0	0,00

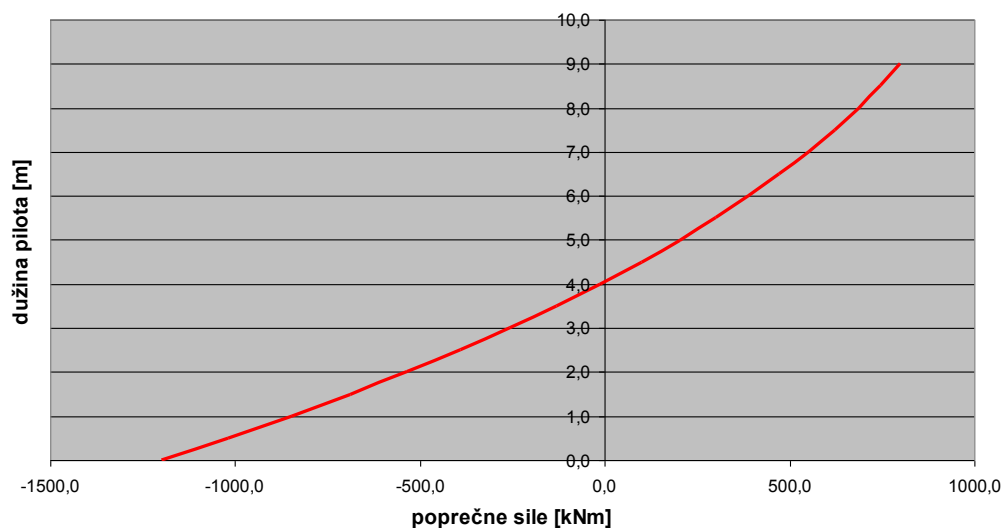


Slika 17. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

## Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]

Tablica 7. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

x [l]	Q(x)
0,0	-1200,00
0,5	-1019,76
1,0	-848,92
1,5	-687,37
2,0	-534,93
2,5	-391,37
3,0	-256,43
3,5	-129,82
4,0	-11,21
4,5	99,72
5,0	203,28
5,5	299,79
6,0	389,57
6,5	472,88
7,0	549,98
7,5	621,09
8,0	686,38
8,5	745,99
9,0	800,00



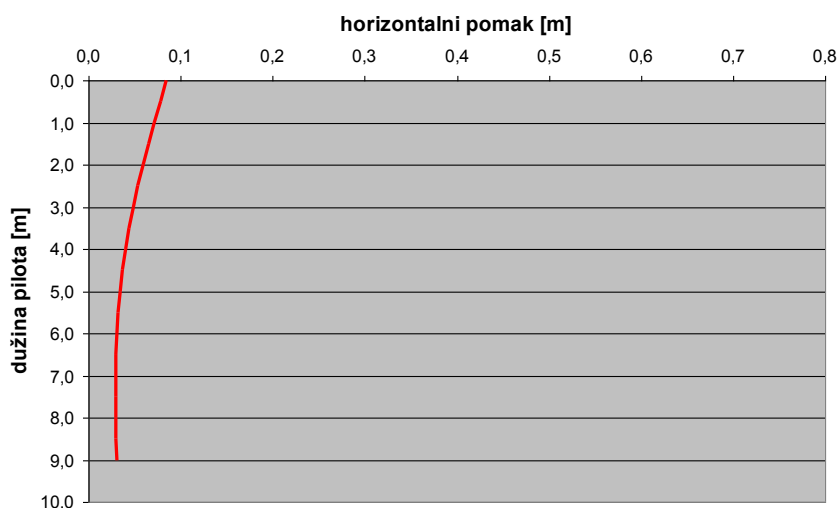
Slika 18. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

## **Proračun za koeficijent reakcije tla, $k=5000 \text{ kN/m}^3$**

### Horizontalni pomak $w(x)$ , [m]

Tablica 8. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

x [l]	w(x)
0,0	0,08472
0,5	0,07789
1,0	0,07123
1,5	0,06485
2,0	0,05887
2,5	0,05337
3,0	0,04841
3,5	0,04402
4,0	0,04023
4,5	0,03706
5,0	0,03449
5,5	0,03250
6,0	0,03105
6,5	0,03011
7,0	0,02962
7,5	0,02950
8,0	0,02968
8,5	0,03008
9,0	0,03058

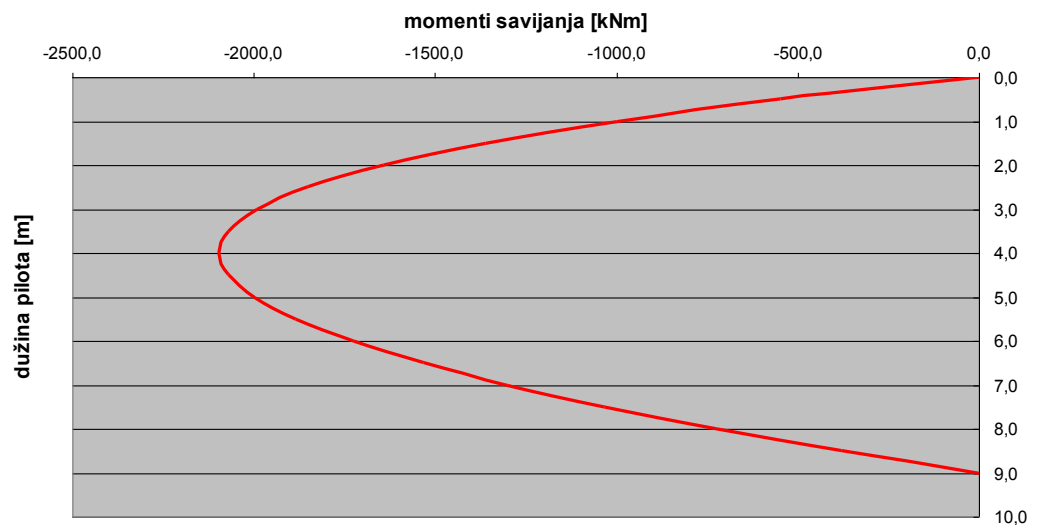


Slika 19. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

## Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]

Tablica 9. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

x (l)	M(x)
0,0	0,00
0,5	-548,48
1,0	-999,57
1,5	-1361,60
2,0	-1642,52
2,5	-1849,80
3,0	-1990,30
3,5	-2070,24
4,0	-2095,10
4,5	-2069,59
5,0	-1997,70
5,5	-1882,64
6,0	-1726,90
6,5	-1532,29
7,0	-1300,00
7,5	-1030,65
8,0	-724,38
8,5	-381,00
9,0	0,00

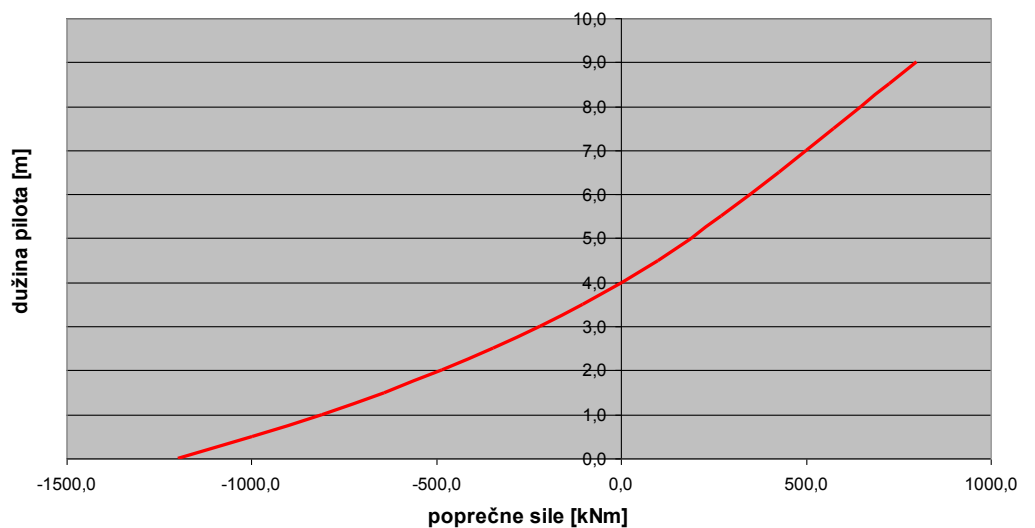


Slika 20. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

## Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]

Tablica 10. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

x (l)	Q(x)
0,0	-1200,00
0,5	-996,76
1,0	-810,40
1,5	-640,37
2,0	-485,80
2,5	-345,60
3,0	-218,50
3,5	-103,09
4,0	2,10
4,5	98,59
5,0	187,90
5,5	271,51
6,0	350,84
6,5	427,20
7,0	501,77
7,5	575,60
8,0	649,53
8,5	724,19
9,0	800,00



Slika 21. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

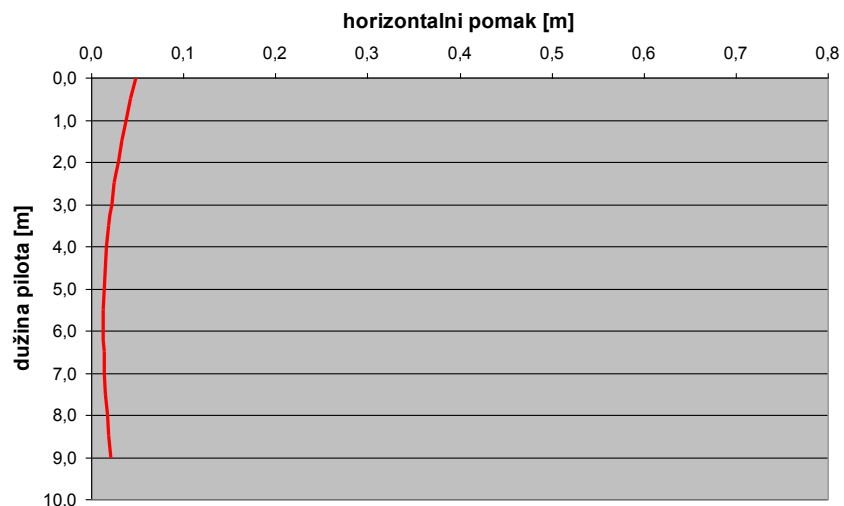


## Proračun za koeficijent reakcije tla, $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

### Horizontalni pomak $w(x)$ , [m]

Tablica 11. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	w(x)
0,0	0,04832
0,5	0,04320
1,0	0,03823
1,5	0,03354
2,0	0,02924
2,5	0,02539
3,0	0,02205
3,5	0,01925
4,0	0,01702
4,5	0,01535
5,0	0,01423
5,5	0,01365
6,0	0,01358
6,5	0,01398
7,0	0,01480
7,5	0,01597
8,0	0,01743
8,5	0,01909
9,0	0,02086

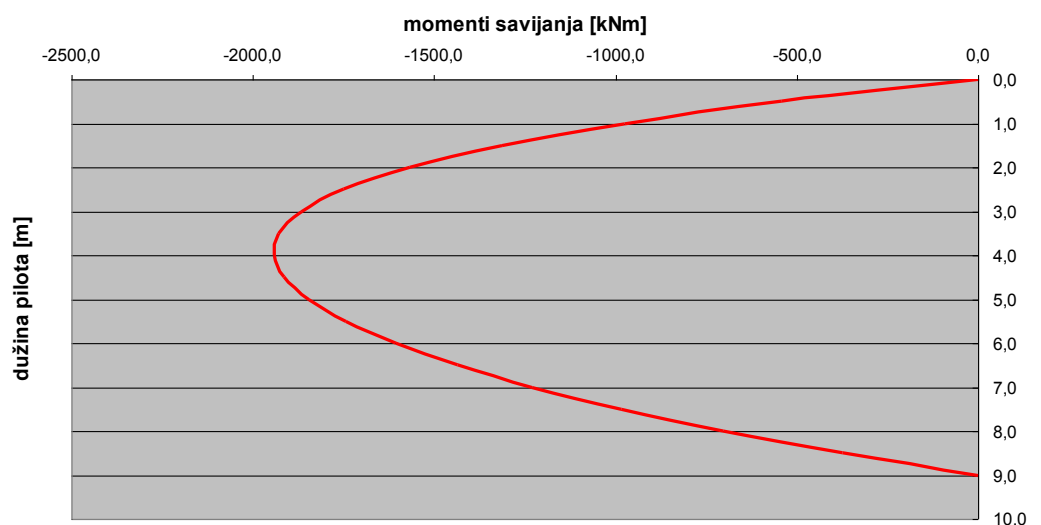


Slika 22. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

### Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]

Tablica 12. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	M(x)
0,0	0,00
0,5	-541,74
1,0	-975,47
1,5	-1313,55
2,0	-1567,70
2,5	-1748,66
3,0	-1866,02
3,5	-1928,15
4,0	-1942,02
4,5	-1913,24
5,0	-1845,97
5,5	-1743,01
6,0	-1605,82
6,5	-1434,57
7,0	-1228,28
7,5	-984,93
8,0	-701,61
8,5	-374,67
9,0	0,00

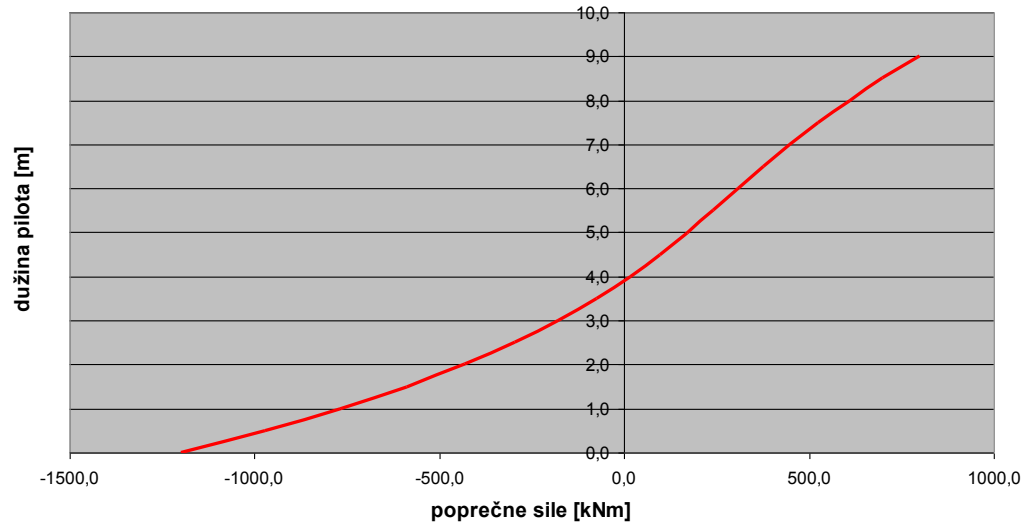


Slika 23. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

## Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]

Tablica 13. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	Q(x)
0,0	-1200,00
0,5	-971,25
1,0	-767,78
1,5	-588,48
2,0	-431,70
2,5	-295,32
3,0	-176,93
3,5	-73,90
4,0	16,54
4,5	97,21
5,0	170,92
5,5	240,41
6,0	308,30
6,5	377,03
7,0	448,80
7,5	525,57
8,0	608,95
8,5	700,17
9,0	800,00



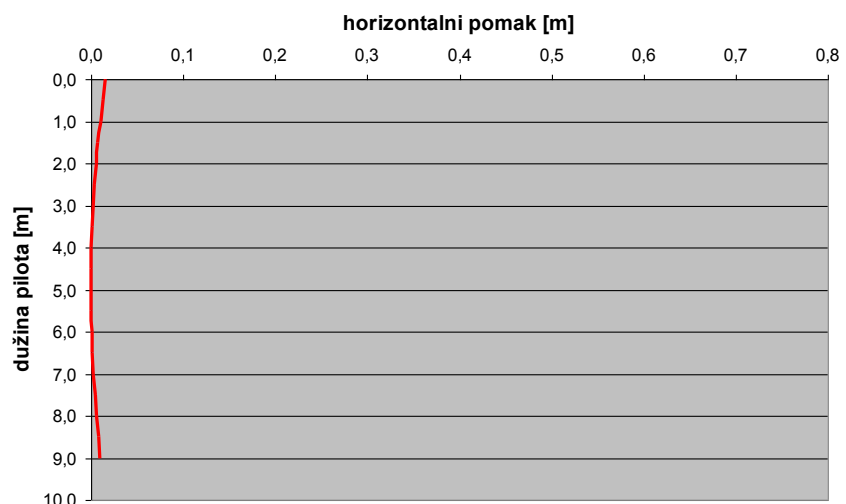
Slika 24. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=10\ 000\ \text{kN/m}^3$

## **Proračun za koeficijent reakcije tla, $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$**

### Horizontalni pomak $w(x)$ , [m]

Tablica 14. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	w(x)
0,0	0,01575
0,5	0,01289
1,0	0,01017
1,5	0,00769
2,0	0,00552
2,5	0,00371
3,0	0,00225
3,5	0,00116
4,0	0,00043
4,5	0,00004
5,0	0,00000
5,5	0,00027
6,0	0,00086
6,5	0,00174
7,0	0,00291
7,5	0,00432
8,0	0,00596
8,5	0,00777
9,0	0,00968

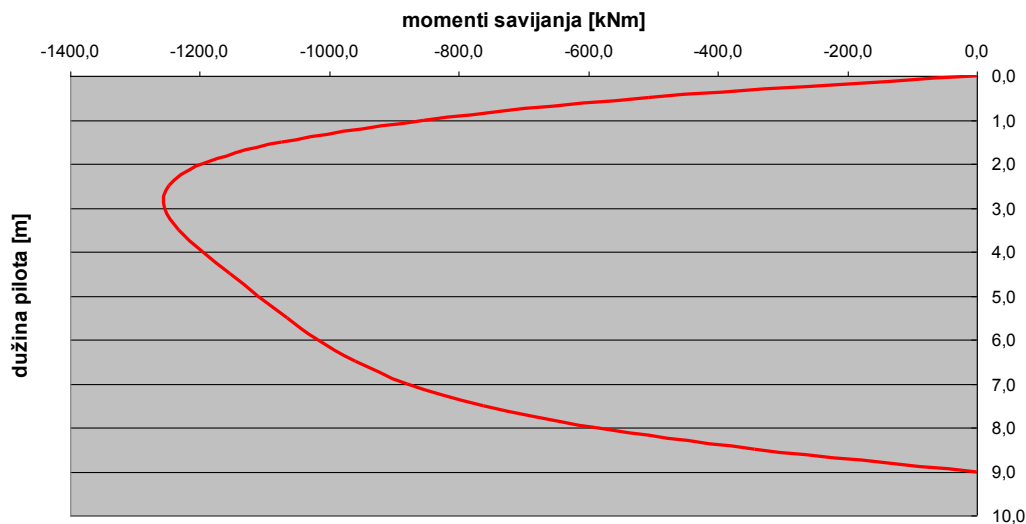


Slika 25. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$

## Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]

Tablica 15. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	M(x)
0,0	0,00
0,5	-507,55
1,0	-853,84
1,5	-1072,80
2,0	-1195,31
2,5	-1248,40
3,0	-1254,79
3,5	-1232,68
4,0	-1195,72
4,5	-1153,05
5,0	-1109,48
5,5	-1065,63
6,0	-1018,04
6,5	-959,40
7,0	-878,68
7,5	-761,37
8,0	-589,80
8,5	-343,52
9,0	0,00

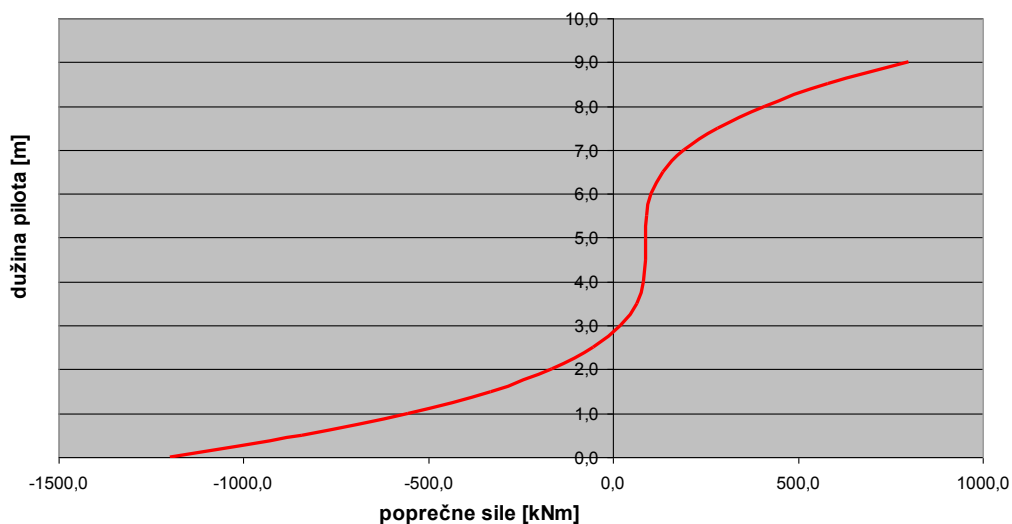


Slika 26. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$

## Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]

Tablica 16. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	Q(x)
0,0	-1200,00
0,5	-842,14
1,0	-554,39
1,5	-331,77
2,0	-167,29
2,5	-52,66
3,0	21,02
3,5	62,87
4,0	81,95
4,5	87,12
5,0	86,94
5,5	89,64
6,0	103,16
6,5	135,09
7,0	192,63
7,5	282,50
8,0	410,65
8,5	582,02
9,0	800,00



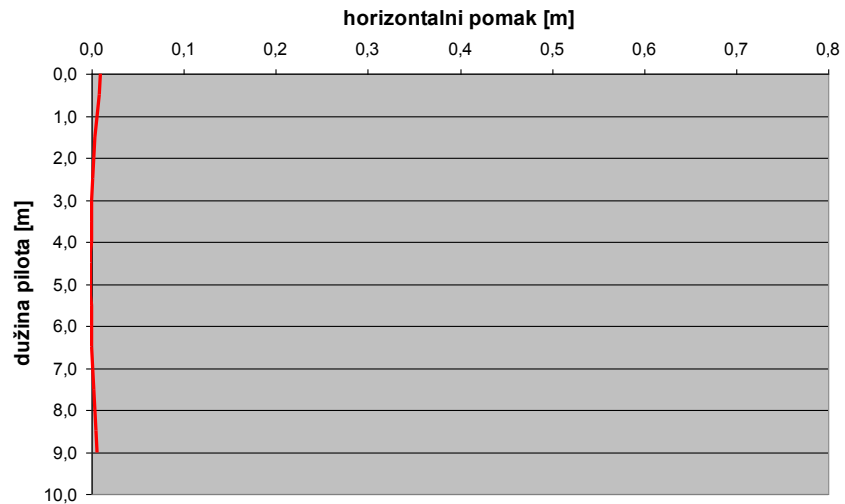
Slika 27. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=50\ 000\ \text{kN/m}^3$

## Proračun za koeficijent reakcije tla, $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

### Horizontalni pomak $w(x)$ , [m]

Tablica 17. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	w(x)
0,0	0,00983
0,5	0,00773
1,0	0,00577
1,5	0,00403
2,0	0,00256
2,5	0,00138
3,0	0,00046
3,5	-0,00018
4,0	-0,00059
4,5	-0,00077
5,0	-0,00074
5,5	-0,00051
6,0	-0,00007
6,5	0,00056
7,0	0,00140
7,5	0,00243
8,0	0,00365
8,5	0,00502
9,0	0,00648

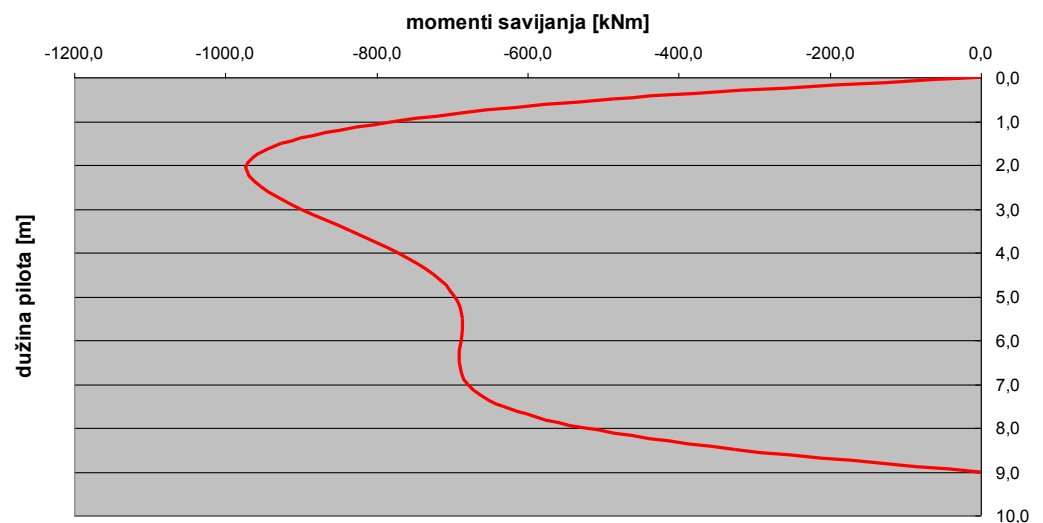


Slika 28. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

### Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]

Tablica 18. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

x (l)	M(x)
0,0	0,00
0,5	-485,92
1,0	-778,22
1,5	-925,73
2,0	-971,81
2,5	-953,18
3,0	-899,57
3,5	-833,80
4,0	-772,13
4,5	-724,76
5,0	-696,25
5,5	-685,82
6,0	-687,62
6,5	-690,80
7,0	-679,46
7,5	-632,70
8,0	-524,72
8,5	-325,18
9,0	0,00

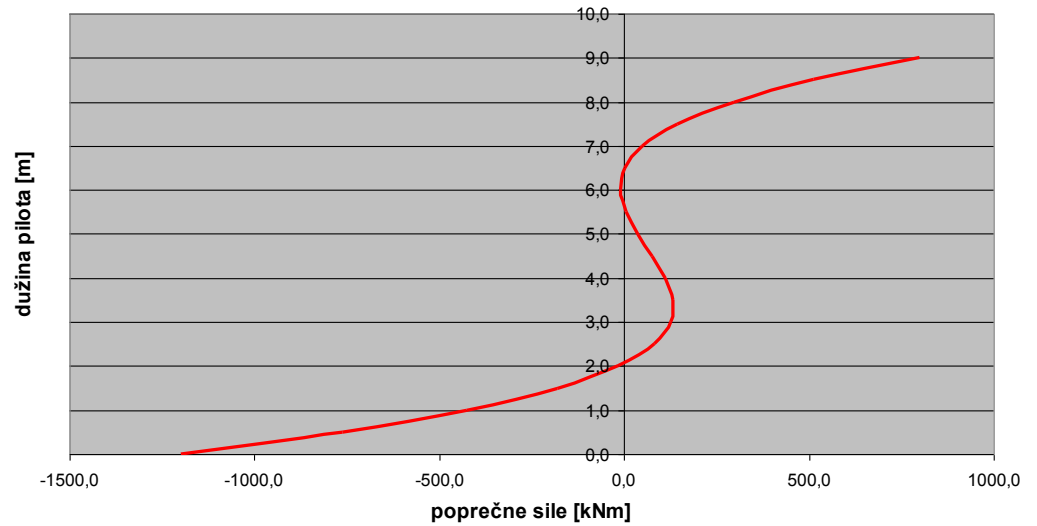


Slika 29. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

## Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]

Tablica 19. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

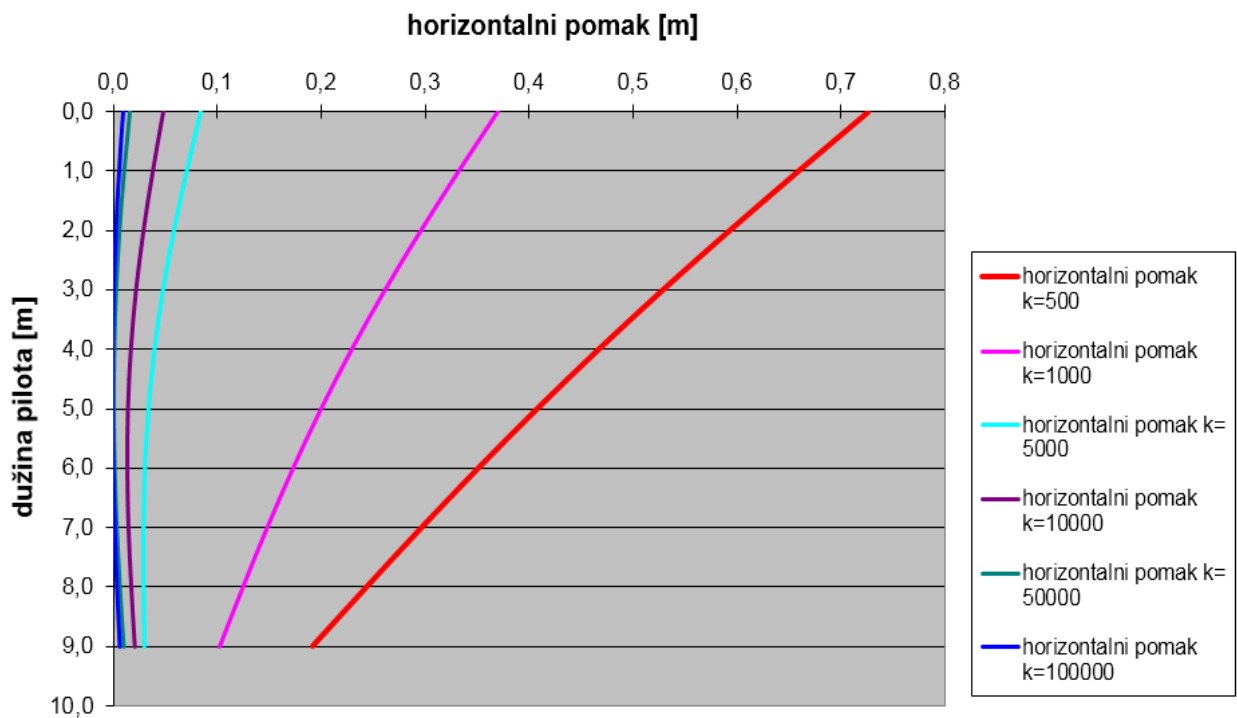
x (l)	Q(x)
0,0	-1200,00
0,5	-761,20
1,0	-424,33
1,5	-180,20
2,0	-16,37
2,5	80,97
3,0	125,87
3,5	131,82
4,0	111,46
4,5	76,50
5,0	37,84
5,5	5,83
6,0	-9,44
6,5	2,04
7,0	50,30
7,5	145,34
8,0	296,72
8,5	512,87
9,0	800,00



Slika 30. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=100\ 000\ \text{kN/m}^3$

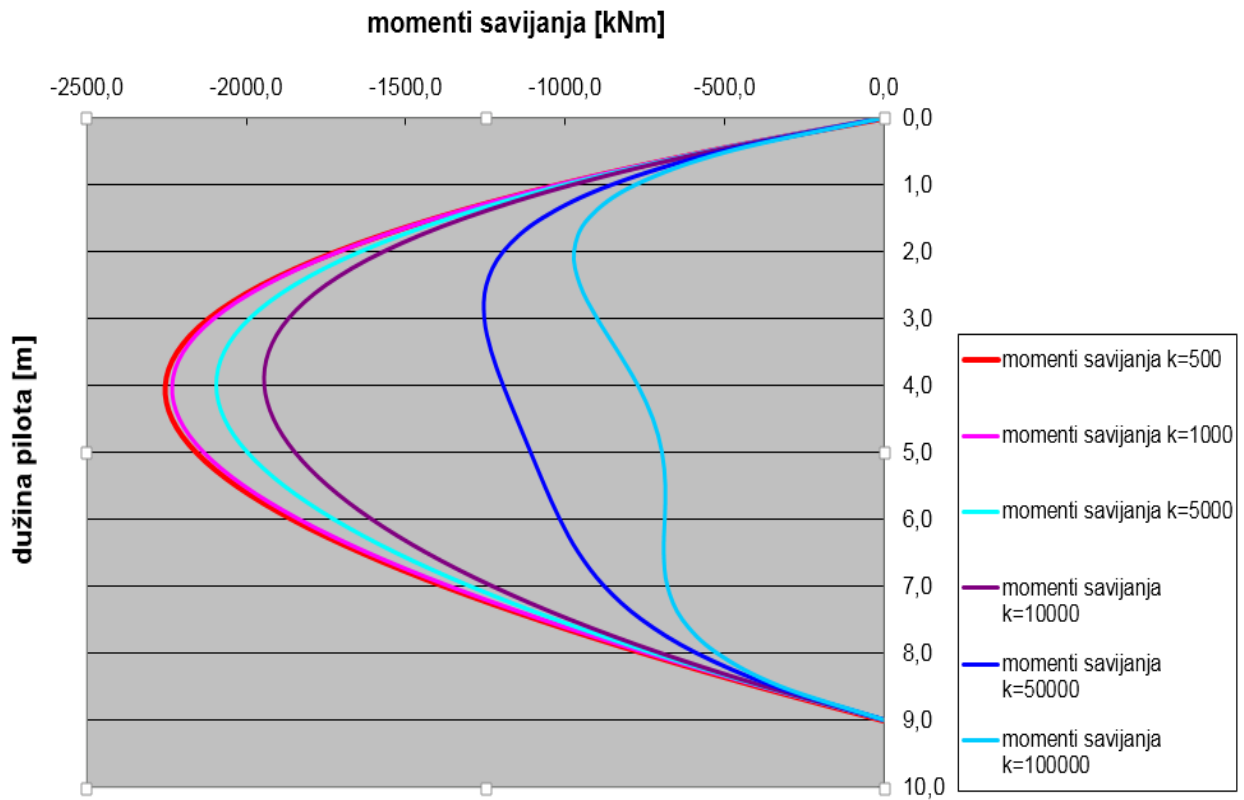
Zbirni dijagrami koji pokazuju kako se mijenjaju računate statičke veličine s obzirom na promjenu koeficijenta reakcije tla,  $k$  ( $\text{kN/m}^3$ )

Horizontalni pomak  $w(x)$ , [m]



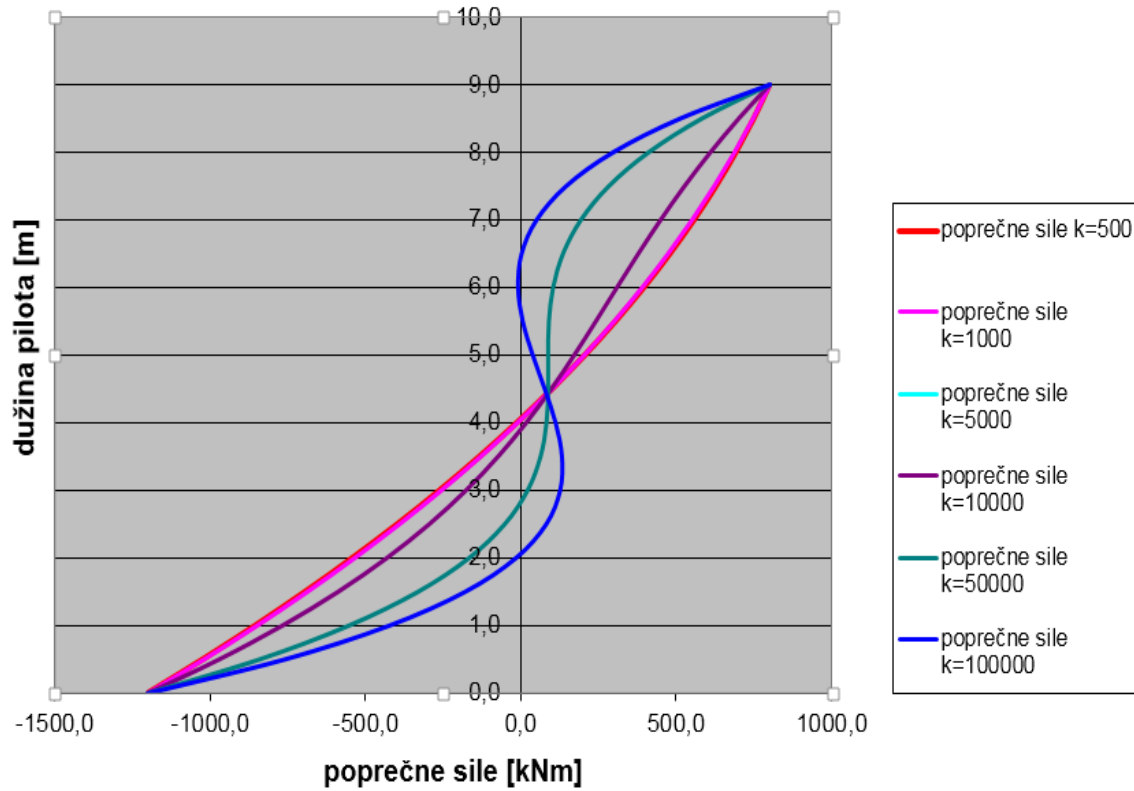
Slika 31. Dijagram horizontalnih pomaka,  $w(x)$  uz promjenu koeficijenta podloge tla,  $k$

## Momenti savijanja $M(x)$ , [kNm]



Slika 32. Dijagram momenata savijanja,  $M(x)$  uz promjenu koeficijenta podloge tla,  $k$

## Poprečne sile $Q(x)$ , [kNm]



Slika 33. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  uz promjenu koeficijenta podloge tla,  $k$



## 9. ZAKLJUČAK

Cilj ovog rada je bio dati pregled jednog od uobičajenih načina proračuna pilota, te istražiti utjecaj veličine računskog parametra (Winkler-ov koeficijent) na tražene statičke veličine.

Proračuni su provedeni sa odabirom jednoparametarskog modela tla, koji ne opisuje svojstvo tla kao kontinuuma, jer pomak tla u takvom modelu nastaje samo u točkama gdje postoji djelovanja opterećenja. Susjedne točke koje nisu direktno opterećene ne trpe pomake što je u suprotnosti s realnim ponašanjem tla.

Provedenim proračunima je prikazano kako se mijenjaju vrijednosti horizontalnih pomaka, momenata savijanja i poprečnih sila sa obzirom na odabir različitih veličina koeficijenata tla.

Uz istu vrijednost koeficijenta podloge tla,  $k$  na većim dubinama dobivene vrijednosti horizontalnog pomaka se smanjuju.

Uz istu vrijednost koeficijenta podloge tla,  $k$  na većim dubinama dobivene vrijednosti momenata savijanja se ponašaju po paraboli tj. od vrha prema dubini vrijednosti momenata savijanja rastu da bi se na polovici visine pilota vrijednosti počele opadati i u dnu pilota postale jednake nuli.

Uz istu vrijednost koeficijenta podloge tla,  $k$  na većim dubinama dobivene vrijednosti poprečnih sila se ponašaju po krivulji tj. od vrha prema dubini vrijednosti poprečnih sila rastu.

Iz priloženih rezultata vidljivo je kako na rezultate utječe odabir koeficijenta reakcije tla i kako je bitno vrlo pažljivo odrediti mehaničke karakteristike tla tj. vrijednosti koje ulaze u proračun za dimenzioniranje temelja.

## Literatura

- [1] Ivandić, K. Dimenzioniranje temeljnih konstrukcija – predavanje. Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ( Varaždin, 28. 11. 2002 )
- [2] Ivandić, K. Piloti opterećeni horizontalno silom i momentom Varaždin: Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet, 2012.
- [3] Ivandić, K (2010): Koeficijent elastičnosti podloge pilota: Opatija, 16. – 19. lipnja 2010. Dani ovlaštenih inženjera građevinarstva
- [4] T.Roje-Bonacci , P.Mišćević : Temeljenje

## Popis slika

Slika 1. Kruti i fleksibilni pilot opterećen horizontalnom silom H

Slika 2. Prikaz dodatnih veza između nepoznatih funkcija pomaka  $u(z)$  i reaktivnih pritisaka tla  $p(z)$  u jednoparametarskom i dvoparametarskom modelu tla te Mindlin - ovom modelu

Slika 3. Horizontalno opterećen vertikalni pilot

Slika 4. Kruti i savitljivi pilot slobodne glave: a) u glini, koherentno i b) pijesku

Slika 5 . Piloti pridržane glave, različitih duljina, a) u glini i b) pijesku ; 1) kratki; 2) srednji; 3) dugi (prema Broms, 1964)

Slika 6. Funkcije naprezanja pilota i tla

Slika 7 . Fleksibilnost pilota na djelovanje poprečne sile i momenta

Slika 8. Slobodni pilot opterećen iznad razine terena

Slika 9. Ukupni pomak slobodnog pilota opterećenog iznad razine terena

Slika 10. Shematski prikaz elemenata obalne konstrukcije

Slika 11. Shematski prikaz razdvojenog proračunskog modela obalne konstrukcije

Slika 12. Shematski prikaz temelja stupova- zabijeni piloti

Slika 13. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

Slika 14. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

Slika 15. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$

Slika 16. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

Slika 17 . Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

Slika 18 . Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$

Slika 19 . Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

Slika 20. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

Slika 21. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$

Slika 22. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=10\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 23. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=10\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 24. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=10\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 25. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=50\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 26. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=50\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 27. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=50\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 28. Dijagram horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=100\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 29. Dijagram momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=100\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 30. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=100\,000 \text{ kN/m}^3$

Slika 31. Dijagram horizontalnih pomaka,  $w(x)$  uz promjenu koeficijenta podloge tla, k

Slika 32. Dijagram momenata savijanja,  $M(x)$  uz promjenu koeficijenta podloge tla,  $k$

Slika 33. Dijagram poprečnih sila,  $Q(x)$  uz promjenu koeficijenta podloge tla,  $k$

## Popis Tablica

*Tablica 1: Rasponi vrijednosti modula elastičnosti*

*Tablica 2: Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 3. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 4. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=500 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 5. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 6. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 7. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=1000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 8. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 9. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 10. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=5000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 11. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=10\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 12. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=10\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 13. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=10\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 14. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=50\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 15. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=50\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 16. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=50\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 17. Izračunate vrijednosti horizontalnog pomaka,  $w(x)$  za  $k=100\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 18. Izračunate vrijednosti momenta savijanja,  $M(x)$  za  $k=100\ 000 \text{ kN/m}^3$*

*Tablica 19. Izračunate vrijednosti poprečnih sila,  $Q(x)$  za  $k=100\ 000 \text{ kN/m}^3$*