

# Modeliranje statičkog probnog opterećenja pilota na lokaciji Ilica

---

Šandrk, Antonio

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:727891>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-03**



*Repository / Repozitorij:*

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET  
Diplomski studij rudarstva

MODELIRANJE STATIČKOG PROBNOG OPTEREĆENJA PILOTA  
NA LOKACIJI ILICA

Diplomski rad

Antonio Šandrk

R-216

Zagreb, 2021.



KLASA: 602-04/21-01/22  
URBROJ: 251-70-03-21-2  
U Zagrebu, 17.02.2021.

**Antonio Šandrk, student**

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju Vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/22, UR. BROJ: 251-70-11-21-1 od 16.02.2021. godine priopćujemo temu diplomskog rada koja glasi:

### MODELIRANJE STATIČKOG PROBNOG OPTEREĆENJA PILOTA NA LOKACIJI ILICA

Za voditelja ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o diplomskom ispitu doc. dr. sc. Dubravko Domitrović, docent Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu i suvoditeljica dr.sc. Helena Vučenović poslijedoktorand Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

**Voditelj**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Predsjednik povjerenstva  
za završne i diplomske  
ispite**

(potpis)

Doc. dr. sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

**Suvoditeljica**

(potpis)

Dr. sc. Helena Vučenović

(titula, ime i prezime)

**Prodekan za nastavu i  
studije**

(potpis)

Izv. prof. dr. sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)

## MODELIRANJE STATIČKOG PROBNOG OPTEREĆENJA PILOTA NA LOKACIJI ILICA

Antonio Šandrk

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu  
Rudarsko-geološko-naftni fakultet  
Zavod za rudarstvo i geotehniku  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Sažetak

Ukoliko se građevina izvodi na temeljnom tlu koje je meko i rahlo odnosno nedovoljne čvrstoće potrebno je izvesti duboko temeljenje kako bi se odgovarajuće sile prenijele do slojeva tla veće čvrstoće i rasporedile na veću površinu tla. Na lokaciji Ilica u Zagrebu izgrađena je višekatna građevina te je tom prilikom korišteno duboko temeljenje. Za utvrđivanje nosivosti pilota provedeno je statičko ispitivanje na probnom pilotu promjera 60 cm i duljine 23 m. Za potrebe ispitivanja na 4 vlačna pilota postavljena je čelična greda. Preko hidraulične preše sila se prenosila na probni pilot u inkrementima. Svaki inkrement je imao povećanje sile od 500 kN. Do sloma tla je došlo pri sili od 4400 kN. Ukupno slijeganje glave pilota iznosilo je 52,6 mm. Za potrebe simulacije napravljen je osnosimetrični model tla i pilota u računalnom programu PLAXIS 2D. Model sadrži 7 slojeva gline različitih karakteristika te jedan sloj šljunka. Simulacijom je dobiveno da kod sile od 4500 kN ostvareno je slijeganja glave pilota u vrijednosti 146,3 mm.

Ključne riječi: statičko ispitivanje, piloti, Plaxis 2D, lokacija Ilica, numerička analiza

Završni rad sadrži: 46 stranice, 4 tablica, 28 slika, 0 priloga, i 24 reference.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentori: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Dr.sc. Helena Vučenović

Ocjenjivači: Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Dr. sc. Želimir Veinović, docent RGNF  
Dr. sc. Mario Klanfar, docent RGNF

## MODELING OF STATIC LOAD TEST OF PILES AT ILICA LOCATION

Antonio Šandrk

Thesis completed at: University of Zagreb  
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering  
Department of Mining and Geotechnics  
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

### Abstract

If the construction is being made on a foundation soil that is soft and loose and therefore insufficient in strength, it is necessary to perform a deep foundation in order to transfer the appropriate forces to the soil layers of higher strength and deployed on bigger area of soil. Multy-store was built at the Ilica location in Zagreb, and for that purpose, a deep foundation was used. To determine the correctness, a static pile load testing was performed on a test pile with a diameter of 60 cm and a length of 23 m. For the purpose of this testing, a steel beam was placed on 4 tension piles. The force was transmitted to the test pilot in increments via a hydraulic press. Each increment had a force increase of 500 kN. The breaking of the soil occurred at a force of 4400 kN. The total settlement of the pilot's head amounted to 52.6 mm. For the simulation purpose, an axisymmetric model of soil on pile for numerical testing in the computer program PLAXIS 2D was made. The model contains 7 layers of clay with different characteristics and one layer of gravel. The simulation at a load force of 4500 kN gives the pile's head settlement value of 146.3 mm..

Keywords: Static load test, piles, Plaxis 2D, location Ilica, numerical analysis

Thesis contains: 46 pages, 4 tables, 28 figures, 0 appendixes, i 24 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisors: Dubravko Domitrović, PhD  
Helena Vučenović, PhD

Reviewers: Assistant Professor Dubravko Domitrović, PhD  
Assistant Professor Želimir Veinović, PhD  
Assistant Professor Mario Klanfar, PhD

## SADRŽAJ

POPIS TABLICA.....	IV
1. UVOD .....	1
2. IZBOR METODE IZRADE PILOTA .....	2
2.1. Odabir vrste pilota ovisno o uvjetima u tlu .....	2
2.2. Odabir pilota ovisno o konstrukcijskim zahtjevima .....	2
2.2.1. Pristup i veličina gradilišta .....	2
2.2.2. Ograničavajuća upotreba opreme i efikasnost .....	3
3. DIMENZIONIRANJE PILOTA .....	5
3.1. Nosivost pilota na osna opterećenja .....	5
3.2. Nosivost pilota na bočna opterećenja .....	7
3.3. Deformacija pilota kod bočnih opterećenja .....	9
3.3.1. Pristup preko reakcije podloge .....	10
3.3.2. Elastični kontinuum .....	11
3.3.3. Idealizacija konzole .....	12
3.3.4. Profili uslojenog tla.....	12
3.3.5. Ukošeni piloti i djelovanje bočnog opterećenja na osnu nosivost .....	14
3.4. Izvijanje pilota .....	14
3.4.1. Izvijanje pilota uslijed zabijanja .....	14
3.4.2. Izvijanje pod statičkim opterećenjem .....	15
4. ISPITIVANJE HOMOGENOSTI PILOTA .....	17
4.1. Akustična ispitivanja .....	17
4.2. Radiometrijska ispitivanja .....	18
4.3. Seizmička ispitivanja (zvučni odjek).....	18
4.4. Ispitivanje udarnim valom .....	20
4.5. Dinamički odaziv tla.....	20
5. STATIČKO ISPITIVANJE PILOTA .....	20
5.1. Oprema za ispitivanje .....	21
5.1.1. Osiguranje reakcije .....	21
5.1.2. Nanošenje opterećenja i mjerenja .....	24
5.1.3. Mjerni pretvornik sile .....	26
5.2. Postupci statičkog ispitivanja pilota .....	26
5.2.1. Ispitivanje postepenim povećanjem opterećenja .....	27

5.2.2.	Ispitivanje konstantnim prirastom penetracije .....	28
5.3.	Interpretacija rezultata .....	28
6.	PREGLED PRETHODNIH USPOREDBA REZULTATA NUMERIČKE ANALIZE I STATIČKOG ISPITIVANJA PILOTA .....	29
7.	ISPITIVANJE NOSIVOSTI PILOTA STATIČKIM OPTEREĆENJEM.....	31
7.1.	Korištena oprema za statičko ispitivanje .....	31
7.2.	Postupak probnog opterećenja pilota.....	33
7.3.	Interpretacija rezultata .....	34
8.	NUMERIČKA SIMULACIJA STATIČKOG PROBNOG ISPITIVANJA PILOTA .	39
8.1.	Izrada modela i proračun .....	39
8.2.	Rezultati proračuna.....	41
9.	ZAKLJUČAK .....	43
10.	LITERATURA .....	44

## POPIS SLIKA

Slika 3-1 Osno opterećeni pilot .....	6
Slika 3-2 Krivulja slijeganja i nosivost na osna opterećenja (Fleming, 2009) .....	7
Slika 3-3 Deformacija pilota uslijed bočnih opterećenja.....	8
Slika 3-4 Otpornost tla duž osi bočno opterećenog pilota.....	9
Slika 3-5 Winklerova idealizacija tla.....	10
Slika 3-6 Učinak krutosti površinskih slojeva tla na momente izvijanja i savijanja pilota .	13
Slika 3-7 Opasnost od gubitka pravca pilota (Burgess, 1980) .....	15
Slika 3-8 Stvarna duljina pilota i dio zamijenjen konzolom .....	16
Slika 4-1 Uređaj za seizmičko ispitivanje pilota .....	19
Slika 5-1 Statičko ispitivanje pilota (Cementation Piling and Foundations Ltd., Rickmansworth) .....	21
Slika 5-2 Shema ispitivanja protu-utegom .....	22
Slika 5-3 Shema ispitivanja sustavom vlačnih pilota .....	23
Slika 5-4 Kalibracija hidrauličke preše .....	24
Slika 5-5 Diferencijalni transformator kao pretvornik pomaka a) načelo rada b) komercijalno osjetilo .....	25
Slika 5-6 a) Presjek mjerne ćelije b) Vanjski izgled mjerne ćelije CSP-M tvrtke Vishay .	26
Slika 6-1 Krivulje slijeganja i pilota.....	29
Slika 6-2 Usporedba krivulja sile opterećenja po duljini pilota .....	30
Slika 7-1 Konstrukcija za ispitivanje pilota statičkim postupkom .....	32
Slika 7-2 Glava pilota, hidraulička preša, pretvornik sile i digitalni mjerači pomaka .....	33
Slika 7-3 Program ispitivanja pilota statičkim postupkom.....	34
Slika 7-4 Dijagram sila-pomak glave pilota .....	35
Slika 7-5 Porast pomaka glave pilota za svaki stupanj opterećenja .....	35
Slika 7-6 Određivanje sile puzanja ( $Q_c$ ) .....	36
Slika 7-7 Tablice mjerenih deformacija za stupanj opterećenja i izračunate sile.....	37
Slika 7-8 Raspodjela sila duž pilota za različite stupnjeve opterećenja .....	38
Slika 8-1 Model tla .....	40
Slika 8-2 Prikaz modela tla nakon slijeganja .....	41
Slika 8-3 Prikaz efektivnih naprezanja.....	42



## POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Vrsta pilota s obzirom na njegovu duljinu .....	3
Tablica 2-2 Vrsta pilota s obzirom na njegovu nosivost i dimenzije .....	4
Tablica 5-1 Predloženo opterećenje inkremenata i vrijeme trajanja .....	27
Tablica 8-1 Parametri tla .....	39

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	gustoća
$A$	m <sup>2</sup>	površina
$v$	m/s	brzina
$L$	m	duljina
$F$	N	sila
$t$	s	vrijeme
-	°	kut
$m$	kg	masa
$q_b$	kN/m <sup>2</sup>	naprezanje na bazu pilota
$\bar{\tau}_s$	kN/m <sup>2</sup>	mobilizirano posmično naprezanje plašta
$k$		koeficijent reakcije tla
$EI_p$	kN/m <sup>2</sup>	krutost savijanja
$L_c$	m	kritična duljina
$u$		izvijanje
$H$		opterećenje
$M$		moment
$\Theta$		rotacija
$d$	m	promjer pilota
$p$		opterećenje po jedinici duljine pilota
$y$		izvijanje
$\rho_c$		stupanj homogenosti u krutosti tla
$E$	Pa	Youngov modul elastičnosti
$u$		lateralno izvijanje
$t_l$	m	debljina sloja
$f_l$	N/m	krutost sloja
$\Lambda$	N	bezdimenzionalna sila zabijanja
$Q$	N	sila zabijanja
$L$	m	duljina pilota
$EI$	N/m	krutost savijanja
$c_u$		čvrstoća tla
$P_{cr}$		opterećenje izvijanja

$V_r$		brzina valova na površini
$V_l$		brzina longitudinalnih valova
$w$	m	vertikalni pomak pilota
$Q$	kN	nosivost pilota

## 1. UVOD

Temelj građevine služi prenošenju sile kojom građevina djeluje na tlo a da pritom ne dođe do urušavanja građevine, sloma tla ili neke druge hazardne situacije. Tri su različite vrste temeljenja, to su: plitko temeljenje, duboko temeljenje i temeljenje u poboljšanom tlu. Odabir vrste temeljenja ovisi o veličini građevine, vrsti i svojstvu tla u kojem se gradi, prisutnosti podzemne vode, potencijalnoj seizmičkoj aktivnosti itd.

Parametri i vrsta temelja propisani su normom *Eurokod 7* koji je sastavljen od dva dijela. Prvi dio *EN 1997-1 Geotehničko projektiranje – Dio 1: Opća pravila* je nadopunjen 2004. drugim dijelom *EN 1997-2 Geotehničko projektiranje – Dio 2: Istraživanje i ispitivanje tla*. *Eurokod* je skup normi za projektiranje konstrukcija i građevinskih objekata koje su zajednički donijele europske države stoga se većinom primjenjuje u Europi. *Eurokod 7* je norma koja se odnosi na geotehničko projektiranje te istraživanje i ispitivanje tla.

U ovom radu je opisano duboko temeljenje odnosno izrada pilota u tlu. Pilot je građevina stupastog oblika koja služi za prijenos sile opterećenja najčešće većih građevina kroz meke ili rahle slojeve tla do slojeva koji svojom čvrstoćom to mogu podnijeti. Dimenzioniranje pilota i njegova ugradnja započinje istražnim radovima u tlu kojima se nastoje odrediti parametri tla.

Napretkom znanosti postoji sve više vrsti pilota i načina njihove ugradnje stoga se prilikom odabira nastoji odabrati opcija koja će zadovoljiti financijske i konstruktivne faktore. U današnje vrijeme razvili su se razni računalni programi koji numeričkim analizama predviđaju ponašanje tla prije, tijekom i nakon ugradnje što uvelike pomaže prilikom projektiranja i dimenzioniranja pilota. Nakon što su piloti dimenzionirani pristupa se izradi probnih pilota. Najčešće se provode *Statička* i *Dinamička ispitivanja probnih pilota*. Rezultati ovih ispitivanja daju nam realne podatke o nosivosti pilota. U ovom radu analiza predviđanja ponašanja tla će se provesti u računalnom programu PLAXIS 2D.

Kao primjer za usporedbu numeričke analize i statičkog ispitivanja probnih pilota poslužila je stambena višekatnica koja ima duboko temeljenje odnosno pilote.

Cilj ovog rada je napraviti usporedbu rezultata numeričke analize u računalnom programu PLAXIS 2D i in situ rezultata statičkog ispitivanja probnog opterećenja pilota.

## 2. IZBOR METODE IZRADE PILOTA

Pilot je građevina stupastog oblika koja služi za prijenos sile opterećenja najčešće većih građevina kroz meke ili rahle slojeve tla do slojeva koji svojom čvrstoćom to mogu podnijeti. Piloti se najčešće klasificiraju prema metodi izrade. Dugo vremena dijelili su se na *bušene* i *zabijene* pilote, međutim napretkom tehnologije i primjenom novih metoda došlo je do nove klasifikacije. Danas se piloti dijele na *razmičuće* i *nerazmičuće*. Razmičući piloti su uglavnom zabijeni a karakterizira ih radijalno razmicanje prilikom penetracije pilota što za posljedicu ima zbijanje krupnozrnatog tla pa se metoda i koristi u krupnozrnatom tlu. Nerazmičući piloti su uglavnom bušeni i karakterizira ih smanjenje horizontalnih naprezanja u tlu prilikom iskopa koja se samo djelomično vraćaju nakon betoniranja te se koriste u sitnozrnatom tlu.

### 2.1. Odabir vrste pilota ovisno o uvjetima u tlu

Uvjeti u tlu imaju značajan utjecaj na odabir vrste pilota i metode izrade. Prisutnost vode i njena fluktuacija uvelike otežavaju izradu pilota. To se posebno odnosi na bušene pilote gdje je moguće urušavanje stijenske bušotine. Kako bi se izbjegao negativan utjecaj vode koriste se privremene ili trajne zaštitne kolone, mješavine bentonita ili polimerske suspenzije te se veća pažnja pridaje kvaliteti betona i metodi ugradnje betona.

Ukoliko se na području ugradnje pilota nalaze tvrđi slojevi tla ili stijena potrebno je odrediti njihove karakteristike. Ugradnja zabijenih i bušenih pilota u takvim uvjetima može biti iznimno zahtjevna i skupa.

Zbog prevelike konsolidacije gornjih slojeva tla moguća je pojava povlačenja pilota prema dolje nakon ugradnje. Ove sile također treba uzeti u obzir tijekom dimenzioniranja pilota.

Kod pilota ugrađenih na kosinama, nakon sloma odnosno pojave klizanja na padini dolazi do velikih posmičnih naprezanja u tijelu pilota. Također, piloti mogu biti ugrađeni u kemijski agresivna tla koja utječu na dugotrajnost strukture pilota pa je za primjerice pilote koji se ugrađuju na licu mjesta preporučena upotreba zaštitne kolone.

### 2.2. Odabir pilota ovisno o konstrukcijskim zahtjevima

#### 2.2.1. Pristup i veličina gradilišta

Gradilište nije uvijek idealno za izvođenje radova stoga se prije početka radova treba obratiti pažnja na potencijalne probleme koji su uglavnom sljedeći:

- 1 Mogućnost postavljanja opreme za izvođenje radova, primjerice kranova te mogućnost za njihovu upotrebu.
- 2 Izgradnja u urbanom području gdje je gradilište okruženo stambenim ili sličnim objektima.
- 3 Izgradnja na terenu pod nagibom.

Brzina radova će biti veća ukoliko se koristi više opreme, ali veličina gradilišta je često ograničavajući faktor. Iz tog razloga se pažnja usmjeruje na redoslijed radova i organizaciju gradnje.

### 2.2.2. Ograničavajuća upotreba opreme i efikasnost

Obzirom na vrstu i duljinu pilota odabire se oprema za ugradnju. Tablicom 2-1 prikazane su vrste pilota s obzirom na duljinu za koju je ugradnja pogodna, dok je Tablicom 2-2 prikazana vrsta pilota s obzirom na predviđeno opterećenje i dimenzije.

**Tablica 2-1** Vrsta pilota s obzirom na njegovu duljinu

<i>Vrsta pilota</i>	<i>Uobičajeni raspon duljine (m)</i>
Čelični 'H' profil	30-50
Čelična cijev	30-40
Predgotovljeni betonski	30 m bez spajanja
Predgotovljeni betonski – spojeni	30-40
Zabijeni piloti – trajna betonska ćelija	10
Zabijeni piloti – pomoćna kolona	10
Bušeni piloti – rotacijski malog promjera	25-30
Bušeni piloti – rotacijski većeg promjera	50-60
Bušeni piloti – CFA	25-30

**Tablica 2-2** Vrsta pilota s obzirom na njegovu nosivost i dimenzije

<i>Vrsta pilota</i>	<i>Uobičajena nosivost (kN)</i>	<i>Veličina (mm)</i>
Čelični 'H' profil	600-4400	do 350 x 400
Čelična cijev	400-7300	do 900
Predgotovljeni betonski	600-2000	200-600 sq
Predgotovljeni betonski – spojeni	550-1500	do 390 sq
Zabijeni piloti – trajna betonska ćelija	700-2000	400-750
Zabijeni piloti – pomoćna kolona	350-2000	275-550
Bušeni piloti – rotacijski malog promjera	100-1500	150-600
Bušeni piloti – rotacijski većeg promjera	2000-30000+	750-2100
Bušeni piloti – CFA	400-2600	350-750

Brzina radova je vjerojatno najbitnija stavka uz cijenu radova. Brzina uvelike ovisi o vrsti pilota, opremi za ugradnju i vrsti tla. Primjerice kod zabijenih pilota veća oprema može značiti i dvostruko brži napredak, ali se mora pripaziti da prilikom zabijanja ne dođe do oštećenja pilota. Idealno uvjeti su meko tlo u gornjim slojevima ispod kojih se nalaze dobro nosivi slojevi. S druge strane bušeni piloti odlično napreduju u područjima gdje je primjena privremene kolone minimalna, odnosno gdje je što manja potreba za stabilizacijom mekog tla blizu površine.

Za veće dubine koriste se bušeni piloti s većim rotacijskim promjerom pošto se efikasnost zabijanja pilota smanjuje s dubinom. Ukoliko se buši u nestabilnom tlu mogu se koristiti zaštitne kolone i/ili bentonitna isplaka s ciljem osiguranja stabilnosti bušotine. Bentonitna isplaka izrađuje se od bentonitne suspenzije čiji su osnovni elementi minerali glina.

CFA (Continuous-flight auger) je metoda se najčešće koristi kada zabijeni piloti proizvode presnažne vibracije za okolinu i također je metoda koja proizvodi najmanju buku stoga je poželjna u urbanim sredinama.

### 3. DIMENZIONIRANJE PILOTA

Presudnu ulogu prilikom odabira vrste i dimenzija pilota imaju ekonomski i praktični čimbenici. Za svaki pilot koji je uzet u razmatranje radi se analiza ukupne nosivosti pod radnim opterećenjem kojom se nastoji utvrditi ispunjava li isti svoju ulogu kao element temeljne konstrukcije te postoji li neki drugi potencijalni problem kao na primjer pristupačnost opreme za izradu pilota. S druge strane, nastoji se što efikasnije trošiti materijal za izradu pilota. Iz tog razloga fokus se stavio na ograničavanje deformacija na prihvatljivu razinu.

#### 3.1. Nosivost pilota na osna opterećenja

Pilot na kojeg je opterećenje nanoseno paralelno s njegovom osi nosit će to opterećenje dijelom na trenje duž plašta, dijelom preko normalnog naprezanja na bazi pilota, kao što je prikazano na slici 3-1. Fleming et al. (2009) navodi da je nosivost pilota  $Q$  pod aksijalnim opterećenjem jednaka zbroju nosivosti baze  $Q_b$  i nosivosti plašta  $Q_s$ . Iz toga slijedi:

$$Q = Q_b + Q_s = A_b q_b + A_s \bar{\tau}_s \quad (3-1)$$

gdje su:  $A_b$  – površina baze pilota,

$q_b$  – nosivost na bazu pilota,

$A_s$  – površina plašta,

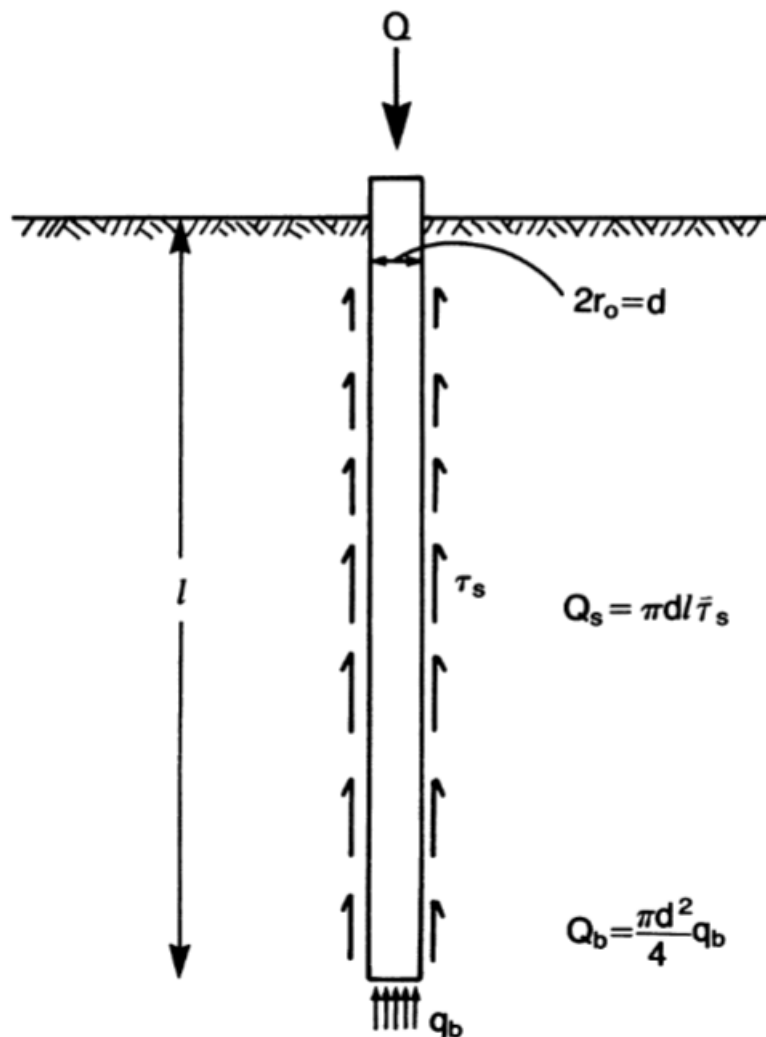
$\bar{\tau}_s$  – mobilizirano posmično naprezanje plašta.

Nosivost stope i plašta ovisi o geometriji i dimenzijama samog pilota te o vrsti tla u koje se pilot ugrađuje, stoga se mogu podijeliti na one gdje se nosivost prenosi na stopu pilota (*'end-bearing' piles*) i na one čiji je fokus opterećenja na plaštu (*'friction' ili 'floating' piles*). Takozvani *'end-bearing'* piloti se ugrađuju kada se nastoji prolaskom kroz mekše slojeve dohvatiti čvrsti sloj tla, dok kod takozvanih *'friction'* pilota nije moguće dohvatiti čvršći sloj tla. U sitnozrnatim tlima fokus je na nosivosti plašta, a u krupnozrnatim se nosivost dijeli između plašta i baze.

Potrebni su puno manji pomaci da se aktivira nosivost plašta (0,5% do 2% promjera pilota) u odnosu na nosivost baze (5% do 10%) što je bitno prilikom predviđanja slijeganja i raspodjele opterećenja između plašta i baze. Iz tog razloga krivulja slijeganja ima oblik prikazan slikom 3-2. Naime, tek nakon što se plašt u potpunosti aktivira počinje se intenzivno aktivirati baza što dovodi da značajnijih pomaka, stoga se može zaključiti da će

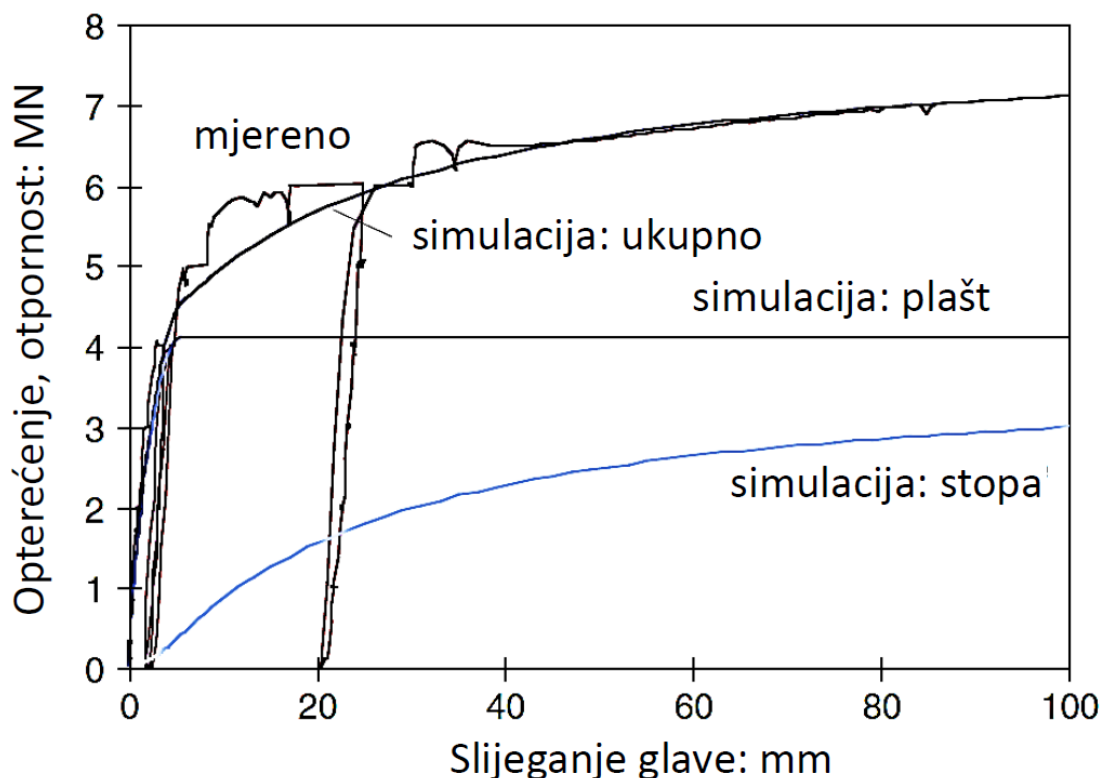


se u krupnozrnatim tlima dogoditi veće slijeganje zbog većeg prijenosa opterećenja na bazu pilota (Randolph, 2003).



**Slika 3-1** Osno opterećeni pilot

Raspodjela nosivosti ovisi o kombinaciji duljine i promjera pilota, stoga se prednost daje kombinacijama kod kojih je slijeganje manje, naravno i koje su ekonomski isplativije. Duži i tanji piloti se pokazuju puno efikasniji nego kraći i širi kako po pitanju nosivosti po volumenu koji je ugrađen tako i po pitanju čvrstoće pilota (Randolph, 1983). Ograničenost tanjih pilota dolazi iz ekonomskih razloga (velika brojnost) i zbog stabilnosti tla tijekom ugradnje (Burgess, 1976).



Slika 3-2 Krivulja slijeganja i nosivost na osna opterećenja (Fleming, 2009)

Metode procjene vrijednosti nosivosti stope pilota,  $q_b$ , i trenja plašta,  $\tau_s$ , su različite za krupnozrnata (in-situ mjerenja) i sitnozrnata tla (svojstva tla), ali im je zajedničko to što su procjene temeljene na empirijskim metodama i vrsti pilota koja se ugrađuje.

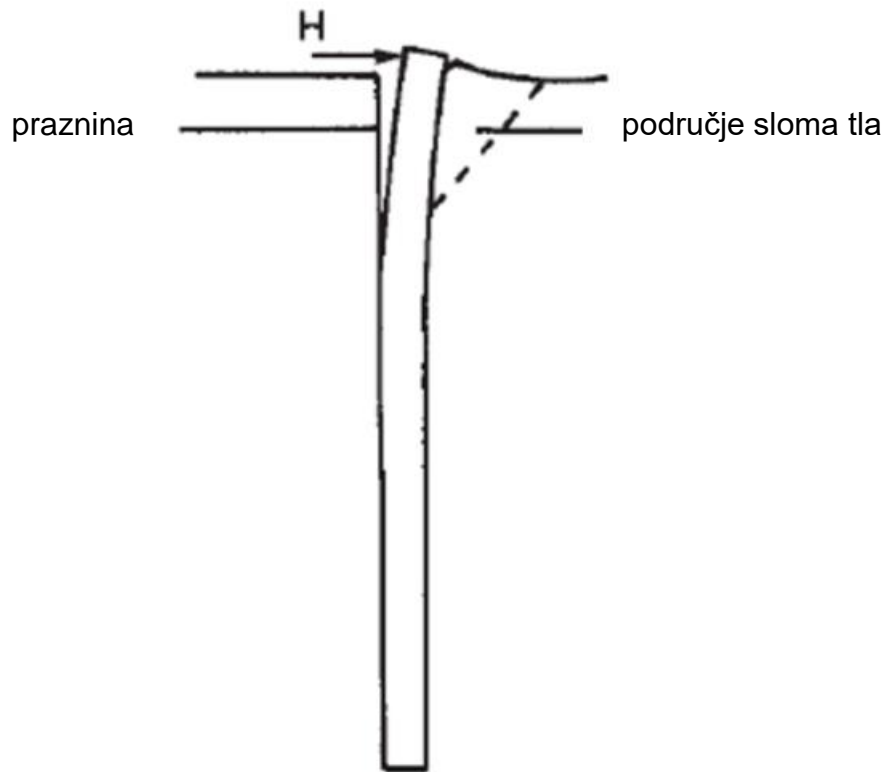
### 3.2. Nosivost pilota na bočna opterećenja

Lateralno ili bočno opterećenje pilota obično je znatno manje vrijednosti od vertikalnog odnosno osnog opterećenja te ukoliko se ne radi o potpornom zidu ili brani ne pridaje mu se prevelika važnost. U slučaju većih bočnih opterećenja na pojedinim mjestima postoji mogućnost ugradnje takozvanih ukošenih pilota (eng. '*raking piles*') koji su konstrukcijski teži za izvesti i ekonomski manje isplativi.

Usljed bočnog opterećenja blizu površine stvorit će se praznina između tla i pilota iz smjera opterećenja, dok će tlo s druge strane pilota biti u stanju aktivnog klina što najbolje prikazuje slika 3-3.

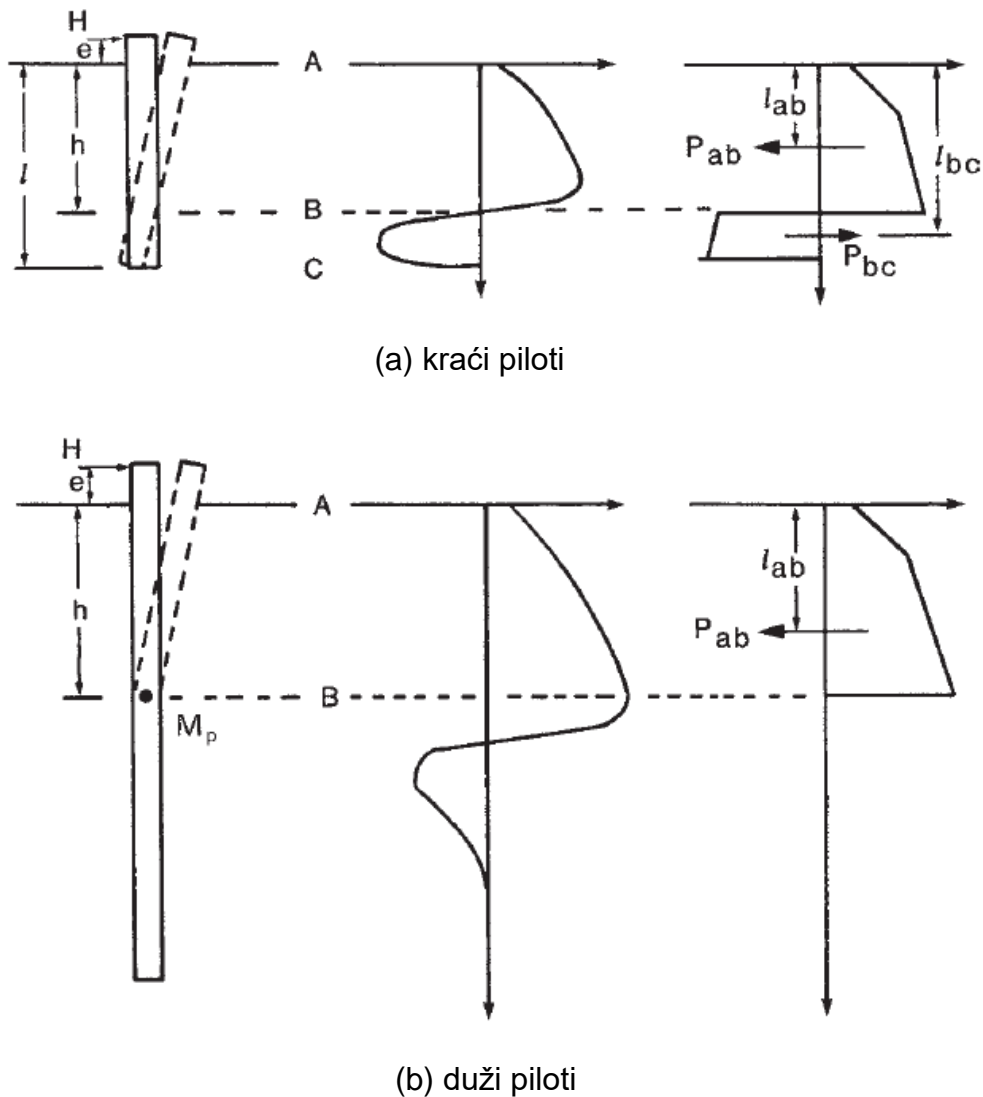
Slom pilota može se dogoditi na dva načina, ovisno o duljini pilota odnosno njegovom plastičnom momentu, to jest momentu pri kojem nastaje plastična deformacija. Kratki piloti će imati veću krutost i vrijednost plastičnog momenta, stoga će se rotirati kao kruto tijelo što

je prikazanom na lijevoj strani slike 3-4(a), dok će se kod duljih pilota razviti zglob oko kojeg će se nagnjati samo njegov gornji dio što je prikazano lijevom stranom slike 3-4(b).



**Slika 3-3** Deformacija pilota uslijed bočnih opterećenja

Na slici 3-4 srednji prikaz pokazuje raspodjelu bočnih naprezanja po dubini pilota. Vidljivo je da kod kraćih pilota bočna opterećenja djeluju ispred pilota do točke savijanja (B) te su najveća netom prije nje, dok su u samoj točki bočna opterećenja pilota jednaka nuli dok ispod točke savijanja bočno opterećenje pilota djeluju iza pilota. Desna strana slike 3-4 prikazuje momente u pilotu i smjer djelovanja momenata ( $P_{ab}$  i  $P_{bc}$ ) u pojedinom dijelu pilota. Kod duljih pilota momenti su jednaki nuli ispod točke savijanja pa se na taj način za proračun bočne nosivosti potrebno poznavati podatke samo iznad težišta.



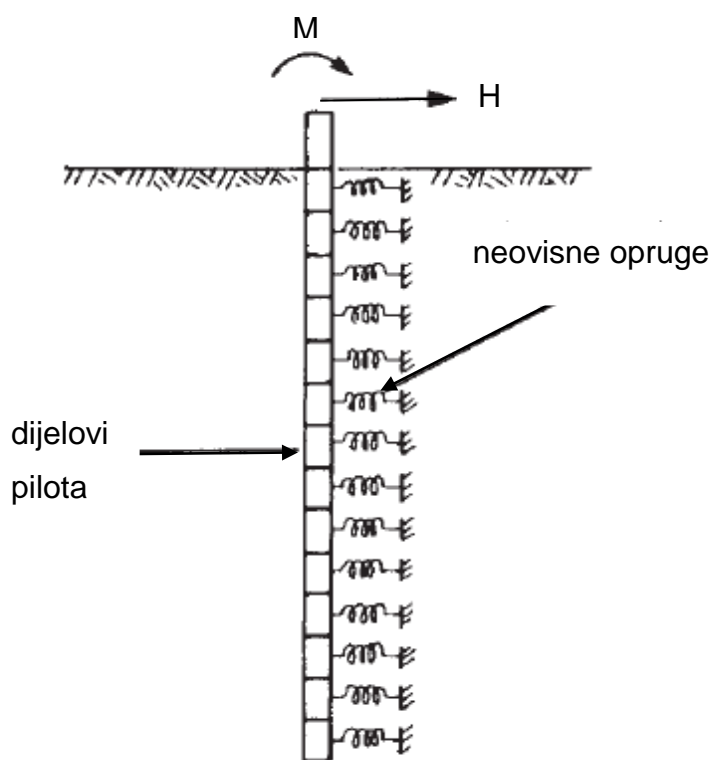
Slika 3-4 Otpornost tla duž osi bočno opterećenog pilota

### 3.3. Deformacija pilota kod bočnih opterećenja

Deformacija pilota pod lateralnim opterećenjem obično se događa u gornjem dijelu pilota. Obzirom da se smatra da opterećenje nema utjecaja na dubini većoj od 10 promjera pilota, svi modeli i idealizacije zanemaruju veće dubine od prethodno navedene. Model koji simulira uvjete na način da se tlo postavi iza gornjeg dijela pilota koje limitira djelovanje opterećenja smatra se prilično preciznim. Dva su pristupa modelu, u jednom se tlo promatra kao diskretne opruge dok se u drugom tlo promatra kao kontinuum.

### 3.3.1. Pristup preko reakcije podloge

Slikom 3-5 prikazana je Winklerova idealizacija tla prema kojoj se tlo na koje djeluje pilot pod lateralnim opterećenjem prikazuje kao niz opruga duž pilota. Krutost tih opruga označava se s  $k$ , koeficijentom reakcije tla. Ako je  $k$  konstantan duž pilota, tada su moguća analitička rješenja, dajući izvijajući oblik pilota te raspodjelu posmičnog napreznja i momenta savijanja duž pilota (Matlock and Reese, 1960). Ovim pristupom se određuju tri bitna parametra za koje moraju biti poznati ulazni podaci. Ukoliko su poznati koeficijent podloge ( $k$ ) i krutost na savijanje ( $EI_p$ ) može se odrediti kritična duljina ( $L_c$ ) nakon koje se pilot ponaša kao da je beskonačno dugačak. Za odrediti preostala dva parametra, izvijanje ( $u$ ) i rotaciju ( $\theta$ ) na površini, potrebno je imati podatke o kritičnoj duljini, opterećenju ( $H$ ) i momentu ( $M$ ).



Slika 3-5 Winklerova idealizacija tla

S napretkom tehnologije razvijali su se računalni algoritmi koji su omogućavali i primjenu nelinearnih opruga u tlu. Također, koeficijent podloge je zamijenjen odnosom  $p$  (opterećenje po jedinici duljine pilota) -  $y$  (izvijanje). Softveri koji koriste  $p$ - $y$  krivulju su LPILE (Reese i Wang, 1993) i PYGMY (Stewart, 1999b).

### 3.3.2. Elastični kontinuum

Pristup elastičnog kontinuumu razvio se zbog ograničenosti pristupa preko reakcije podloge, odnosno prikladne procijene koeficijenta podloge ( $k$ ). Naime, elastične analize su pokazale da  $k$  ne ovisi samo o parametrima tla, već i o krutosti pilota i načinu nanošenja opterećenja.

Kako bi se nadišla navedena ograničenja uvedena su nova rješenja koja se baziraju na modeliranju konačnih elemenata i graničnih elemenata pilota te su stavljani u kontinuum tla. Kako se radi o pilotima duljim od kritične duljine određuje se prosječna krutost tla. Prvo je potrebno odrediti jedinstveni modul posmika  $G^*$  za dio pilota u aktivnom djelu kako bi se izbjegla različita rješenja za upotreba različitih vrijednosti Poissonovog koeficijenta ( $\nu$ ), gdje  $G$  predstavlja modul posmika:

$$G^* = G(1 + 3\nu/4). \quad (3-2)$$

Potom se linearnom vezom odredi  $G_c$  koji je definiran kao prosječna vrijednost  $G^*$  duž aktivnog dijela pilota i  $\rho_c$  koji je definiran kao stupanj homogenosti u krutosti tla. Zatim slijedi određivanje Youngovog modula elastičnosti ( $E_p$ ) pilota te se u konačnici dobije jednadžba kritične duljine pilota ( $L_c$ ) gdje  $d$  predstavlja promjer pilota a  $EIp$  krutost na savijanje pilota:

$$E_p = \left( \frac{EIp}{\pi d^4 / 64} \right) \quad (3-3)$$

$$L_c = d(E_p/G_c)^{2/7} \quad (3-4)$$

Ukoliko tlo nije homogeno ili se krutost ne povećava proporcionalno s dubinom, procesom iteracije određuje se konačna vrijednost kritične duljine pilota ( $L_c$ ) i karakterističnog modula posmika ( $G_c$ ). Iz tih podataka i poznavanjem iznosa bočne sile ( $H$ ) i pripadajućeg momenta ( $M$ ) računaju se lateralno izvijanje ( $u$ ) i rotacija ( $\theta$ ) sljedećim izrazima (Randolph, 1981):

$$u = \frac{(E_p/G_c)^{1/7}}{\rho_c G_c} \left[ 0,27 \frac{H}{L_c/2} + 0,30 \frac{M}{(L_c/2)^2} \right] \quad (3-5)$$

$$\theta = \frac{(E_p/G_c)^{1/7}}{\rho_c G_c} \left[ 0,30 \frac{H}{(L_c/2)^2} + 0,80 \sqrt{\rho_c} \frac{M}{(L_c/2)^3} \right] \quad (3-6)$$

Maksimalni moment pilota kod bočne sile  $H$  pojavljuje su između  $L_c/4$  (u homogenim tlima) i  $L_c/3$  (u tlima gdje je krutost proporcionalna dubini). Vrijednost maksimalnog momenta također je dana izrazom:

$$M_{max} = (0,1/\rho_c)HL_c \quad (3-7)$$

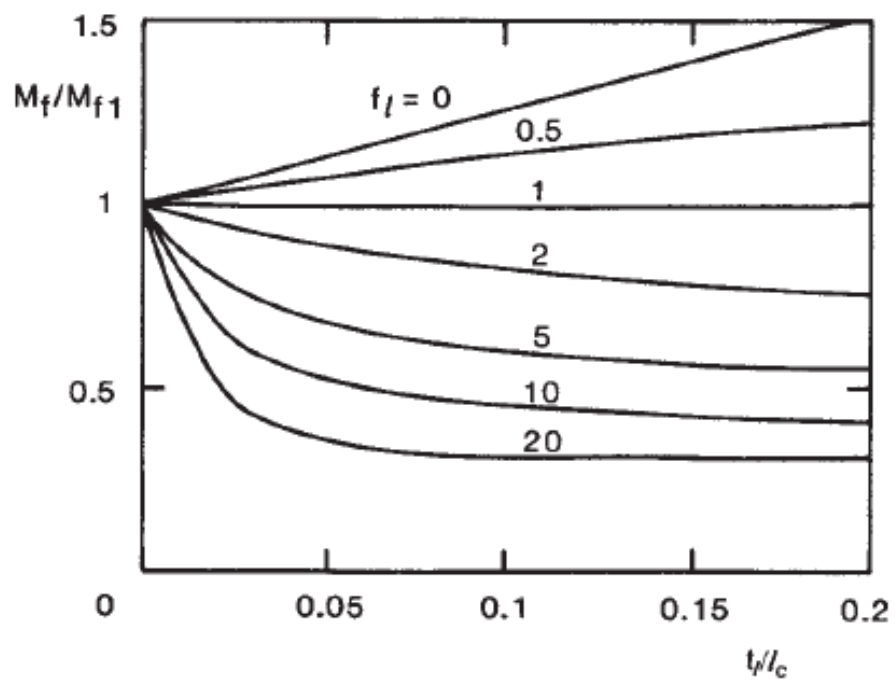
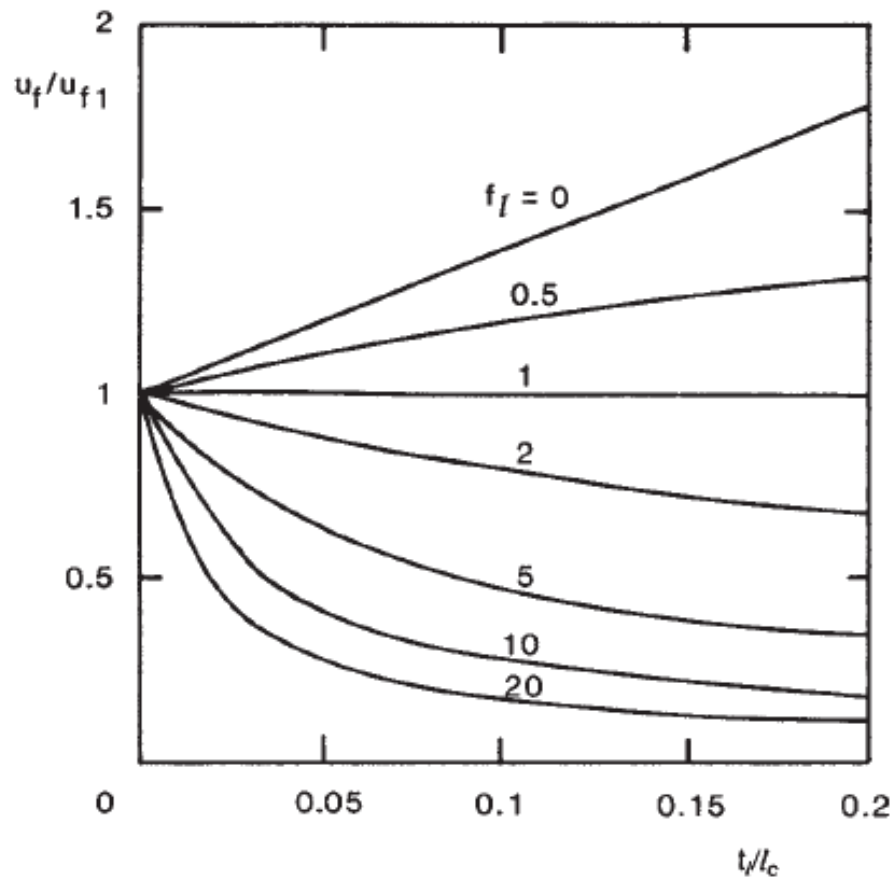
Centrifugalnim testom na pilotu ugrađenom u gusti pijesak (Barton, 1982) pokazano je da krutost tla, a samim time i modul posmika rapidno opada rastom vrijednosti izvijanja glave pilota, stoga se kao presudan kriterij prilikom dimenzioniranja pilota uzima maksimalni moment savijanja.

### 3.3.3. Idealizacija konzole

Model prema kojem se pilot pod bočnim opterećenjem idealizira kao konzola učvršćena na određenoj dubini ima veliki nedostatak jer ne uzima u obzir utjecaj obližnjih pilota i krutosti tla za dubinu na kojoj se nalazi točka u kojoj bi idealizirani nosač bio pričvršćen.

### 3.3.4. Profili uslojenog tla

Veliki utjecaj na reakciju pilota na bočno opterećenje imat će parametri tla blizu površine. Naime, prisutnost suhe kore ili plitkog sloja zrnastog materijala preko mekšeg sitnozrnatog tla uvelike smanjuje momente izvijanja i savijanja duž pilota. Na Slici 3-6 prikazani su odnosi omjera debljine sloja ( $t/l_c$ ) i omjeri izvijanja ( $u_f/u_{f1}$ ) i savijanja ( $M_f/M_{f1}$ ) s obzirom na krutost sloja ( $f_i$ ). Subskript 'f' označava učvršćenu glavu pilota, dok subskript '1' označava vrijednost za  $f_i = 1$  što znači predstavlja relativnu veličinu za prethodno navedene omjere, iako se isti prikaz može upotrijebiti i za pilote koji nemaju učvršćenu glavu. Kada sloj tla bliži površini ima veću krutost od onog ispod njega s debljinom sloja bližeg površini smanjuju se momenti izvijanja i savijanja



Slika 3-6 Učinak krutosti površinskih slojeva tla na momente izvijanja i savijanja pilota



### 3.3.5. Ukošeni piloti i djelovanje bočnog opterećenja na osnu nosivost

Piloti koji su izloženi osnom opterećenju zajedno s cikličnim bočnim opterećenjem obično se slome u trenutku kada je bočna komponenta opterećenja jednaka nuli. Do sloma dolazi zbog bočnih kretnji, odnosno izvijanja, koja su povezana s promjenom normalnog naprezanja ( $\Delta\sigma_n$ ) ispred i iza pilota (Baguelin *et al.*, 1977) što dovodi do naknadnog stvaranja rupa (eng. '*post-holing*' effect) oko pilota u blizini površine. Kako bi se izbjeglo stvaranje rupa koje vode do gubitka trenja stjenke, a zatim i sloma, ciklične bočne kretnje smiju se pojavljivati na dubini manjoj od 2% promjera pilota.

Ukoliko se izbjegne 'post-holing' efekt, jedini utjecaj bočnog opterećenja na osnu nosivost je povećanje normalnog naprezanja koje doprinosi porastu osne nosivosti, iako je dokazano da se kod ukošenih pilota smanjuje nosivost stjenke s porastom kuta ukošenosti (Hanna i Nguyen, 2003). Osne i bočne deformacije su praktički neovisne o kutu koji pilot čini s površinom, za kutove ukošene do 30° (Evangelista i Viggiani, 1976).

### 3.4. Izvijanje pilota

Prilikom izrade pilota postoje dvije kritične faze u kojima njegova stabilnost može biti ugrožena. Ukoliko se izvode piloti zabijanjem u tlo, uslijed zabijanja moguća su značajna odstupanja od predviđenog položaja te također uslijed radnih uvjeta gdje je osno opterećenje pilota blizu kritičnom opterećenju izvijanja može doći do oštećenja pilota.

#### 3.4.1. Izvijanje pilota uslijed zabijanja

Kod napredovanja zabijanog pilota u tlo može doći do toga da (eng. '*flutter*') pilot gubi predviđeni pravac. Rizik od gubitka pravca moguće je iščitati iz krivulje sa Slike 3-7. Krivulja ovisi o bezdimenzionalnoj veličini koja je dana jednadžbom:

$$A = QL^2/EI \quad (3-8)$$

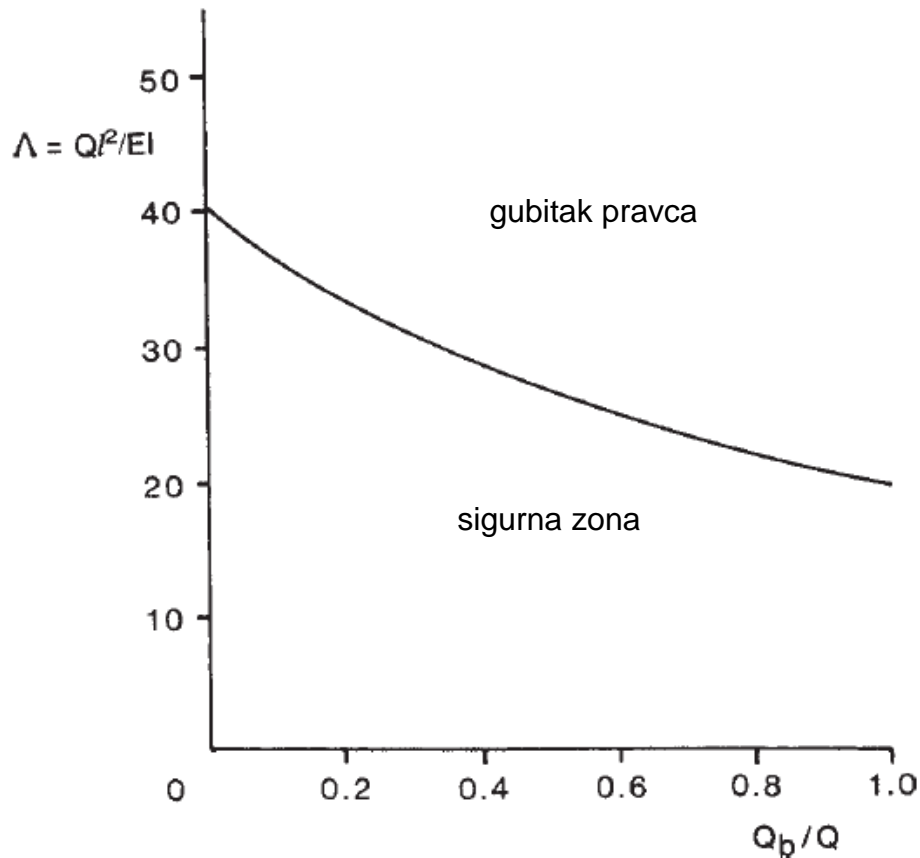
gdje su:  $A$  – bezdimenzionalna sila zabijanja,

$Q$  – sila zabijanja,

$L$  – duljina pilota

$EI$  – krutost na savijanje

i o omjeru sile zabijanja i sile koja dođe do baze ( $Q_b/Q$ ). Duljina pilota pri kojoj dolazi do gubitka predviđenog pravca pilota ovisi o posmičnoj čvrstoći tla ( $c_u$ ) te se pretpostavlja da je ona u potpunosti mobilizirana u trenju plašta duž pilota za vrijeme ugradnje. Analizom i krivuljama koje je dao Burgess (1980) pretpostavlja se da gubitak pravca pilota može doći kod relativno malih duljina pilota.



**Slika 3-7** Opasnost od gubitka pravca pilota (Burgess, 1980)

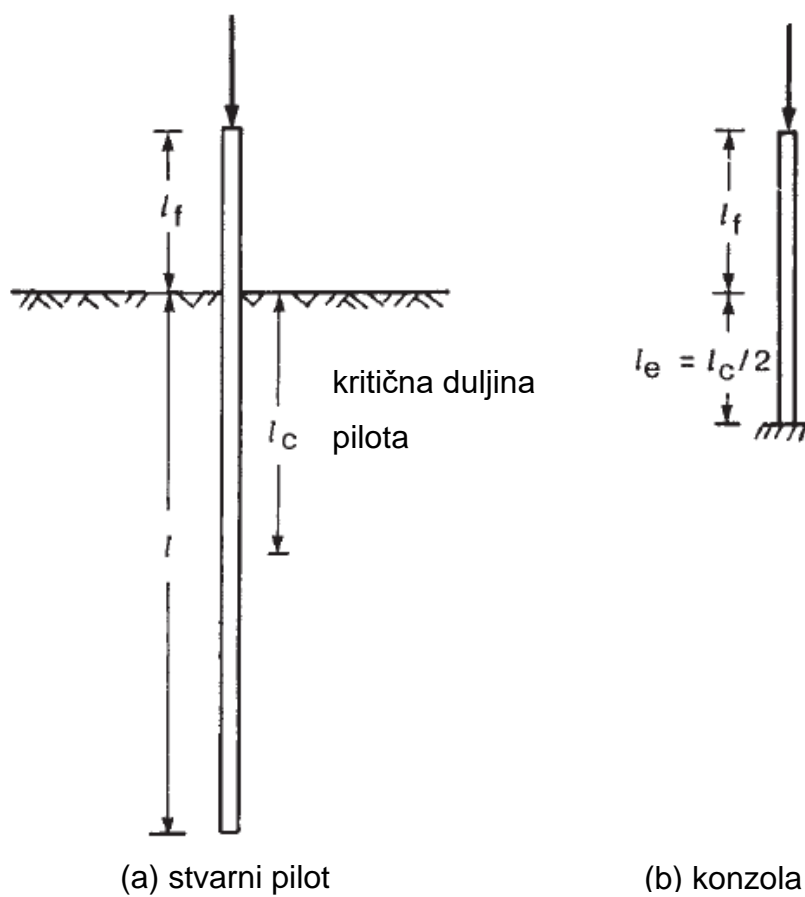
### 3.4.2. Izvijanje pod statičkim opterećenjem

Do nestabilnosti uslijed opterećenja nanesenog na pilot dolazi rijetko, ali je moguće uslijed zabijanja 'end-bearing' pilota kroz relativno mekane aluvijalne nanose. Potencijalno izvijanje će se dogoditi do kritične duljine pilota pod osnim opterećenjem. Kritična duljina obično iznosi 10 do 15 promjera pilota. Kako bi se odredilo maksimalno opterećenje do kojeg ne dolazi do izvijanja potrebno je postaviti odgovarajući model i odrediti potrebne parametre. Pošto do izvijanja može doći unutar kritične duljine navedeni dio zamjenjuje se

konzolom duljine  $L_e = L_c/2$  (vidi Sliku 3-8) i odgovarajućom krutosti na savijanje ( $EI$ ), tada se Eulerovom jednažbom dobije opterećenje izvijanja:

$$P_{cr} = \frac{\pi^2 EI}{4(L_f + L_e)^2} \quad (3-9)$$

gdje su:  $P_{cr}$  – opterećenje izvijanja,  
 $L_e$  – pola kritične duljine,  
 $L_f$  – duljina iznad površine  
 $EI$  – krutost na savijanje.



**Slika 3-8** Stvarna duljina pilota i dio zamijenjen konzolom

#### 4. ISPITIVANJE HOMOGENOSTI PILOTA

Neispravni odnosno piloti oštećene strukture imaju lošije karakteristike od proračunatih što može utjecati na stabilnost objekta. Ispitivanje homogenosti pilota pruža informacije o kontinuitetu pilota, defektima kao što su pukotine, suženju poprečnog presjeka, promjenama poprečnog presjeka te o približnoj duljini pilota. Postoje skuplje intruzivne metode koje se primjenjuju na jednom pilotu i daju njegovu puno detaljniju sliku i jeftinije indirektno metode koje su postale standardni postupci i primjenjuju se na grupi pilota. Ukoliko postoji anomalija prilikom testiranja, prionut će se testiranjima koja daju detaljnije rezultate dok se ne otkrije problem.

Postoji više vrsta ispitivanja te se odabir prikladnog ispitivanja vrši na temelju problema koji se može očekivati s obzirom na uvjete ugradnje i vrstu pilota. Ispitivanja homogenosti pilota mogu se podijeliti na sljedeće:

- akustična ispitivanja
- radiometrijska ispitivanja
- seizmička ispitivanja (zvučni odjek)
- ispitivanja udarnim valom
- dinamički odaziv tla.

Uz prethodno navedena mogu se još provesti ispitivanja iskopima oko glave pilota i istražna bušenja. Iako se ne smatraju ispitivanjem homogenosti, korisni se podaci mogu dobiti ispitivanjem nosivosti pilota.

##### 4.1. Akustična ispitivanja

Prednost ove metode je brzina i količina testova koje je moguće obaviti. Postoje ispitivanja s jednom i s dvije cijevi. Kada se ispitivanja provodi samo pomoću jedne cijevi ona je prethodno montirana ili se naknadno buši u unaprijed određenom pilotu zbog čega samo ispitivanje može dovesti do nedostataka u pilotu. Također, nemoguće je izvršiti ispitivanje do baze pilota, osim ako rupa nije bušena što je samo po sebi skupo.

Ispitivanje se izvodi u cijevi koja je ispunjena tekućinom (uglavnom voda). Kroz cijev se gore-dolje pomiče sonda s odašiljačem i prijammnikom akustične energije. Signal prolazi kroz medij (beton) i s malom odgodom dolazi do prijammnika, prvo tlačni valovi, a zatim posmični valovi. Ako je vrijeme odgode veće to znači da je beton porozan ili su u njemu prisutne

pukotine ili prislojci tla. Pretvornik pretvara signal u električnu energiju koja se bilježi u prijemniku kao amplitudno modulirani napon čiji intenzitet omogućuje interpretaciju. Zbog brojnih nedostataka ispitivanje s jednom cijevi, ono nije u redovitoj upotrebi.

Ispitivanje korištenjem dvije cijevi funkcionira na sličan način kao i sa jednom s razlikom da su odašiljač i prijamnik smješteni u zasebnoj cijevi što omogućuje njihovo postavljanje paralelno ili pod različitim kutovima i na taj način daje jasniju sliku zone u kojoj se nalazi anomalija. Pošto je potrebno da cijevi budu paralelne, cijevi se ne buše već se ugrađuju metalne ili plastične. Cijevi ne smiju biti puno veće od promjera prijemnika i odašiljača i moraju biti jednake dubine kako ne bi došlo do pogreške mjerenja u bazi pilota. Ugradnjom četiri cijevi moguće je izraditi 3D prikaz tijela pilota.

#### **4.2. Radiometrijska ispitivanja**

Ove vrste ispitivanja koriste radijaciju kako bi se ustanovila varijacije u gustoći materijala pilota te se na taj način locirali nedostaci. Same metode i pripreme koje prethode ispitivanju su slične kao i za akustična ispitivanja, oboje traže unaprijed odabrane pilote i cijevi za ispitivanja trebaju biti montirane u pilotu, ispitivanja je moguće provesti u jednoj ili dvije cijevi s razlikom da se radiometrijska ispitivanja mogu obaviti u svježe lijevanom betonu.

Postoje dvije metode radiometrijskog ispitivanja. Prva je ispitivanje povratkom gama-zraka koje stvara radioaktivni izvor, one putuju u beton gdje se raspršuju. Dio gama-zraka se odbija i vraća do detektora koji je odvojen od izvora te količina koja se vratila ovisi o gustoći materijala kroz koji prolazi. Ukoliko postoji zona manje gustoće, to upućuje na prisutnost tla u materijalu pilota.

Druga metoda je ispitivanje neutronima koji se ispucavaju kroz materijal između dvije cijevi. Neutroni se sudaraju se česticama vodika što znači da mogu indicirati kolika je vlažnost materijala kroz koji prolazi, odnosno postoji li tlo ili pukotine ispunjene vodom u tijelu pilota.

Povećanjem promjera pilota raste i potreban broj cijevi što dovodi do veće cijene, slično kao i kod akustičnih metoda. Ovo je razlog što ove metode nisu često u primjeni.

#### **4.3. Seizmička ispitivanja (zvučni odjek)**

Iznimno efikasna metoda koja je ograničena samo na neprekidne pilote, odnosno ne koristi se za predgotovljene pilote. Metoda je učinkovita jer se u kratko vrijeme može ispitati veliki broj pilota. Ispituju se piloti koji su nasumično odabrani nosivi piloti. Također, metoda je jeftina i jednostavna jer zahtjeva lagani udarac čekićem po vrhu pilota koji uzrokuje blage

udarne valove te uređaj čiji se senzori zalijepe također na vrh pilota te se njima očitava brzina širenja udarnih valova koji putuju do baze i reflektiraju se natrag. Mjere se brzina površinskih valova ( $V_r$ ) i brzina longitudinalnih valova ( $V_l$ ) čiji omjer daje konstantu ( $C$ ) koja bi trebala iznositi približno 1,90 što znači da je beton konzistentan i homogen duž cijelog pilota. Slikom 4-1 prikazano je seizmičko ispitivanje na pilotu s pripadajućom opremom.



**Slika 4-1** Uređaj za seizmičko ispitivanje pilota

Osim gustoće i homogenosti pilota, seizmičkim ispitivanjem može se odrediti i duljina pilota. Također, treba napomenuti da beton na kojem se provode ispitivanja treba biti star barem četiri dana te da je metoda ograničena dubinom pilota koja maksimalno može iznositi 30 metara.

#### 4.4. Ispitivanje udarnim valom

Ispitivanjem udarnim valom ili dinamičkim opterećenjem predviđa se statičko ponašanje pilota na temelju odgovora pilota na dinamičke pobude. U odnosu na ostala ispitivanja homogenosti iznimno je skupo i dugo traje, ali se može odrediti približna nosivost pilota. Obično je zamjena za statičko ispitivanje pilota. Zahtjevno je za interpretiranje, stoga je potrebno biti na oprezu, čak iako je napravljena korelacija sa statičkim ispitivanjem s istog mjesta.

Ispuštanjem posebnog čekića stvara se udarni val koji treba pobuditi pilot, a opet ne smije ga oštetiti. Paralelno se mjere pomaci, prati sila mjeračem naprezanja i osjetilom akceleracije.

Prethodno dobivenim podacima preko raznih korelacija nastoji se dobiti nosivost pilota podijeljena na krajnju nosivost stope i adhezije plašta. Problem nastaje pri utvrđivanju povratnog vlačnog vala koji je promijenjen odbijajući se od tla. Da bi se što točnije odredila sila povratnog vala tlo oko stijenke pilota treba istovremeno postići uvjete krajnjeg otpora.

#### 4.5. Dinamički odaziv tla

Dinamički odaziv tla često je korištena metoda koja daje dosta slične rezultate kao seizmičko ispitivanje, iako se pobuda pilota ostvaruje na drugačiji način, kontinuiranim udarcima o vrh pilota ostvaruju se vibracije pilota. Ove dvije metode se razlikuju u elektronici uključenoj u procesuiranje podataka. U ovom slučaju odaziv pilota promatra se pretvornikom brzine. Udarci proizvode valove određene frekvencije preko kojih se utvrđuju potencijalni nedostaci pilota te na kojoj se duljini pilota nalaze.

Prednost ove metode je što se može obaviti i na bušenim i zabijenim pilotima i to već nakon četiri dana od ugradnje. Prije ispitivanja potrebno je glavu pilota pripremiti 24 sata prije tako da bude poravnata bez izbočenja.

Nedostaci metode se očituju kod nekih vrsta tla i omjeru duljine i promjera pilota. U krutim glinama minimalan omjer treba biti 20:1, a maksimalan 30:1. Iako se mogu ispitivati i bušeni i zabijeni piloti, predgotovljeni piloti će dati nepravilne rezultate.

### 5. STATIČKO ISPITIVANJE PILOTA

Ispitivanjem homogenosti pilota provjeravaju se nedostaci kojima je mogući uzrok ljudska pogreška, odnosno način gradnje i kvaliteta izrade, dok se ispitivanjem pilota pod opterećenjem nastoje utvrditi njegova svojstva i učinak. Naime projektirani parametri mogu

se promijeniti tijekom ugradnje pilota, stoga se prethodno ugrađuje probni pilot na kojem se obavljaju ispitivanja pod opterećenjem.

Zadaci ispitivanja probnog pilota su utvrditi sljedeće:

- 1 krajnju nosivost stope pilota te ju usporediti s projektiranim parametrima;
- 2 relativnu vrijednost nosivosti plašta i stope pilota;
- 3 krutost veze pilot-tlo na predviđenu nosivost. Povratnom analizom ovog podatka određuju se moduli tla, stoga se deformacije grupe pilota mogu predvidjeti s velikom točnosti.

Statičko ispitivanje pilota prikazano je Slikom 5-1.



**Slika 5-1** Statičko ispitivanje pilota (Cementation Piling and Foundations Ltd., Rickmansworth)

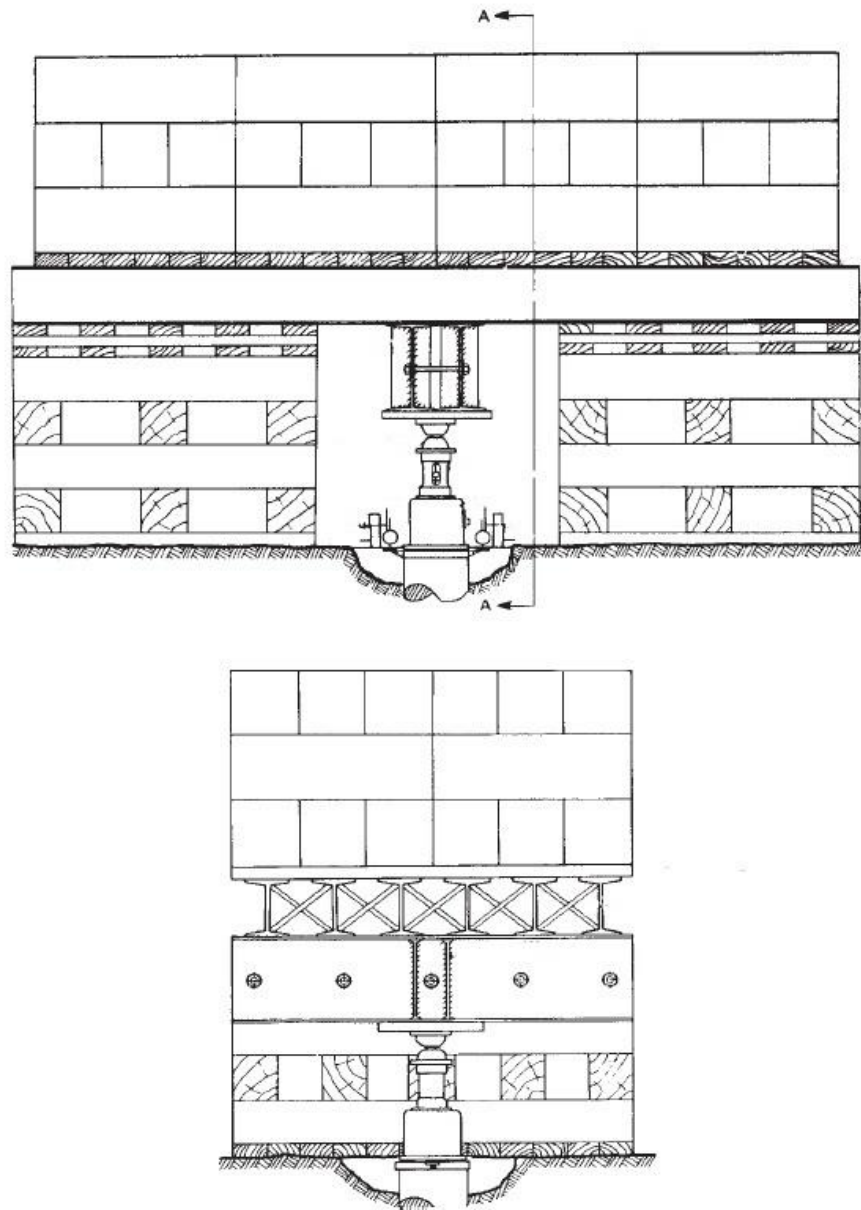
## 5.1. Oprema za ispitivanje

### 5.1.1. Osiguranje reakcije

Reakcija za statičko ispitivanje može se osigurati protuutegom. Shema je prikazana Slikom 5-2. Protuuteg (eng. *Kentledge*) obično je sastavljen od blokova, najčešće betonskih ili čeličnih, služi za pružanje reakcije te ga mogu zamijeniti cigle ili tankovi vode ili pijeska.

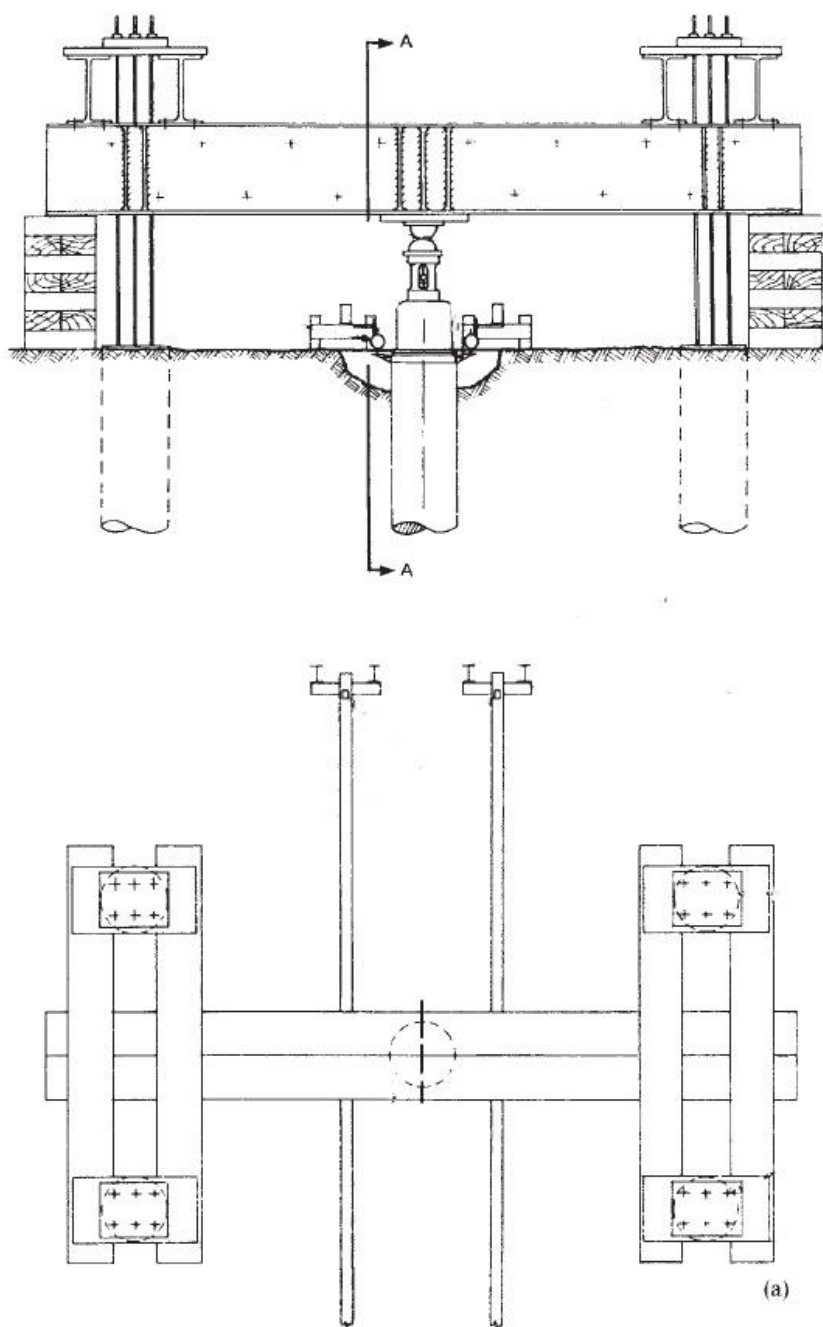


Jedini kriterij je da je nanosena masa stabilna tijekom i nakon ispitivanja te se iz tog razloga postavlja protu-uteg 20% teži od krajnjeg opterećenja, a težište se nastoji postaviti što bliže osi pilota.



**Slika 5-2** Shema ispitivanja protu-utegom

Obično se ispod protuutega kao potpora nalaze čelične ili drvene grede koje moraju biti dovoljno čvrste da ne dođe do pucanja i urušavanja konstrukcije. Između potpora, na propisanoj udaljenosti, smješten je probni pilot iznad kojeg dolazi hidraulička preša, pretvornik sile i potporna greda koja je izložena velikim silama izvijanja i savijanja, stoga je posebno konstruirana za određena maksimalna opterećenja. Između grede i preše postavlja se čelična ploča koja raspodjeljuje opterećenje koje stvara preša.



**Slika 5-3** Shema ispitivanja sustavom vlačnih pilota

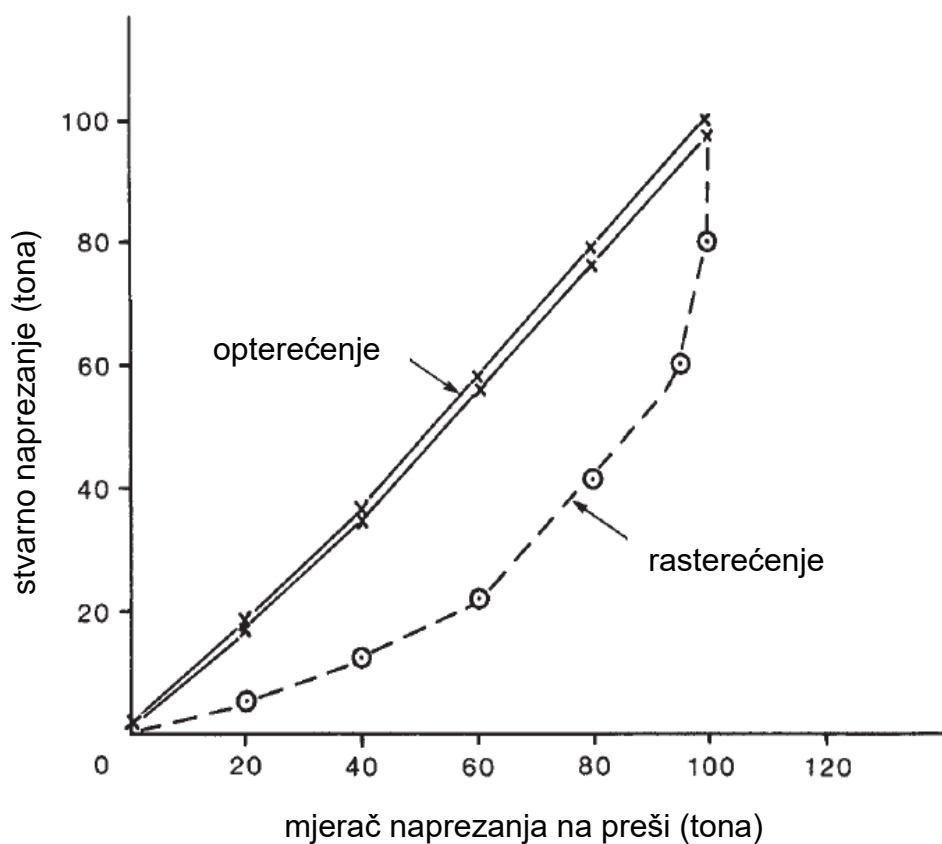
U slučajevima da nije moguće postići dovoljnu reakciju protutezima kao alternativa se koristi usidreni sustav vlačnih pilota (eng. *Tension piles*). To su najčešće susjedni piloti koji moraju osigurati dovoljan otpor izvlačenja. Sustav funkcionira tako da se na susjedne pilote preko zavarenog podloška ugrade čelične šipke koje se na vrhu sustava prednapregnu te na taj način simuliraju sidra. Sila se dalje preko preše nanosi na probni pilot. Shema sustava je prikazana Slikom 5-3.

Sličan sustav je moguće izvesti u stijeni, gdje se sidra ugrađuju u stijenu umjesto na susjedne pilote.

### 5.1.2. Nanošenje opterećenja i mjerenja

Opterećenje na probni pilot se nanosi preko hidrauličke preše. Pošto opterećenje mora biti paralelno s pilotom, ispod reakcijske grede se postavlja sferično sjedište velikog radijusa.

Mjerni pretvornik sile se smješta i kalibrira paralelno s prešom. Trenje unutar preše uzrokuje pojave nelinearnosti prilikom ciklusa rasterećenja što je vidljivo sa Slike 5-4.



**Slika 5-4** Kalibracija hidrauličke preše

Zbog pouzdanosti rezultata potrebno je redovito kalibrirati pretvornik sile.

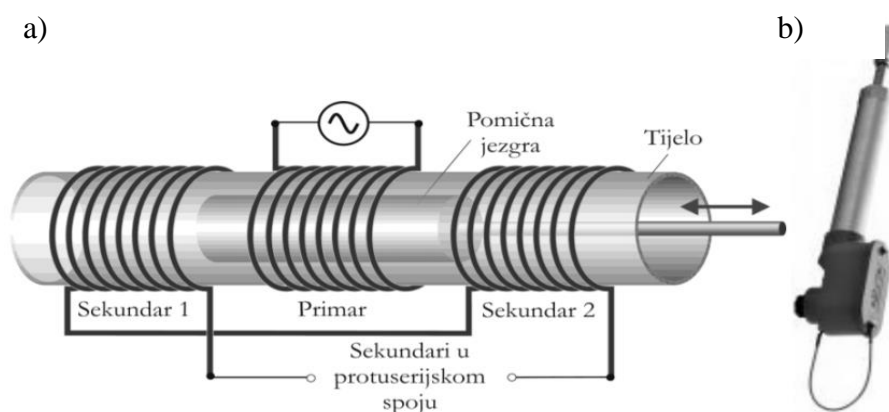
Za mjerenje slijeganja najčešće se koristi sustav pretvornika pomaka koji predstavlja moderno rješenje, evidentira podatke tijekom cijelog ispitivanja te je ručno očitavanje svedeno na minimum. Upotrebljavaju se dvije vrste sustava pretvornika pomaka:

- potencijometar
- LVDT (linearno varijabilni diferencijalni transformator).

*Potenciometar* je otpornički razdjelnik električnog napona. Za statičko ispitivanje pilota se koristi potenciometar s promjenjivim rasporedom otpora odnosno promjenjivi električni otpornik s kliznim spojem. Kako su padovi napona na pojedinim dijelovima otpornika razmjerni (proporcionalni) električnim otporima tih dijelova, mogu se odabrati određeni dijelovi napona između krajeva potenciometra.

*LVDT (Linearno varijabilni diferencijalni transformator)* ili kraće diferencijalni transformator prema podjeli se svrstava u induktivne pretvornike pomaka. Njegovo načelo rada temelji se na tijelu omotanom jednim primarnom namotom i dva sekundarna namota te pomične magnetne jezgre koja se nalazi unutar tijela (Slika 5-5a). Izmjeničnim naponom uzbudi se primarni namot koji potom generira napon u sekundarne namote kroz jezgru. Na taj način jezgra se pomiče prema jednom od sekundarnih namota. Pošto su sekundarni namoti spajaju u protuspoj stvara razliku međuinduktiviteta između primarnog i dva sekundarna namota te se pomoću demodulatora očitava informacija o amplitudi pomaka.

Komercijalno osjetilo je prikazano Slikom 5-5b.



**Slika 5-5** Diferencijalni transformator kao pretvornik pomaka a) načelo rada b) komercijalno osjetilo

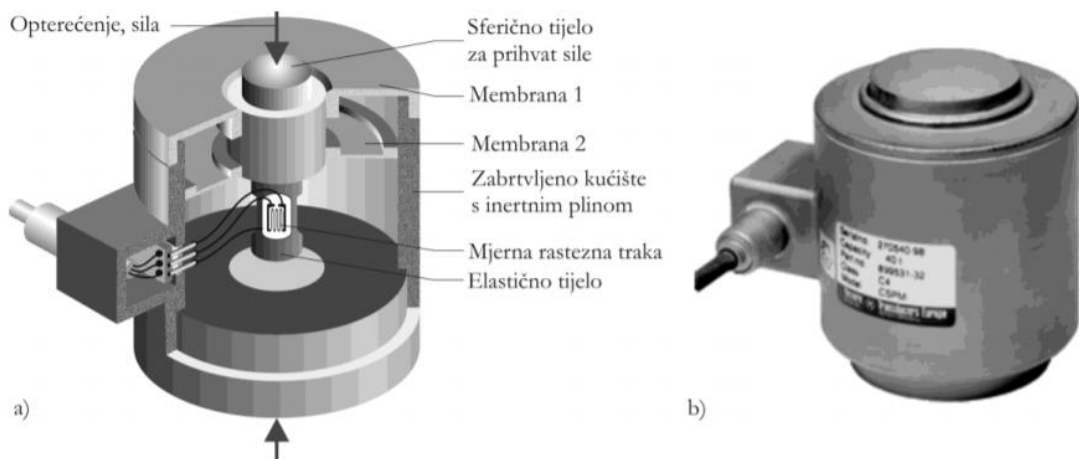
Točka mjerenja pomaka nalazi se na vrhu pilota ili na prstenu montiranom pri vrhu pilota, s tim da pretvornici pomaka mjere relativni pomak pa ih je potrebno montirati na neku fiksnu točku odnosno na mjestu koje je osigurano od slijeganja. Referentna greda je obično aluminijska konstrukcija s osloncima dovoljno udaljenim od samog pilota.

Osim prethodno navedenog, u upotrebi je sustav optičkog izravnjanja koji ima 10 puta manju preciznost, ali može biti od koristi kada se ne može postaviti referentna greda.

### 5.1.3. Mjerni pretvornik sile

Sila je vektorska veličina kojoj je potrebno odrediti intezitet i smjer. Ako se govori o statičkom ispitivanju pilota smjer je poznat te preostaje utvrđivanje intenziteta sile kojom se nanosi opterećenje. Opterećenje pod određenom silom stvara deformacije na tijelu pilota i obzirom da se odnos te sile i deformacije ne može utvrditi na tijelo pilota se postavlja elastično tijelo koje ima poznate odnose sile i deformacija. Elastična tijela smještena su unutar mjerne ćelije koja pretvara deformacije materijala prikupljene rasteznim mjernim tijelima u električni signal. Mjerna ćelija prikazana je Slikom 5-6a, a dijele se na sljedeće:

Slikom 5-6b prikazano je komercijalno osjetilo.



**Slika 5-6** a) Presjek mjerne ćelije b) Vanjski izgled mjerne ćelije CSP-M tvrtke Vishay

### 5.2. Postupci statičkog ispitivanja pilota

Statičko ispitivanje pilota može se provesti na dva načina. Uobičajeno se izvodi kao ispitivanje postepenim povećanjem opterećenja kojim se ispituju 'end-bearing' piloti te za određivanje parametara slijeganja u glinovitom tlu. Alternativna opcija je ispitivanje konstantnim prirastom penetracije.

### 5.2.1. Ispitivanje postepenim povećanjem opterećenja

Ovaj postupak predviđa opterećenje pilota u inkrementima i vrijeme trajanja svakog inkrementa. ICE (*Institution of Civil Engineers*) *Specification for Piling* je predložio strukturu postupka koja je prikazana tablicom 9.2 dok ASTM (*American Society for Testing Materials*) ima sličan postupak. DVL (*Design Verification Load*) označava projektirano opterećenje, dok SWL (*Specified Working Load*) označava radno opterećenje.

**Tablica 5-1** Predloženo opterećenje inkremenata i vrijeme trajanja

<i>Opterećenje</i>	<i>Minimalno vrijeme trajanja opterećenja</i>
25% DVL	30 min
50% DVL	30 min
75% DVL	30 min
100% DVL	1 h
75% DVL	10 min
50% DVL	10 min
25% DVL	10 min
0	1 h
100% DVL	6 h
100% DVL + 25% SWL	1 h
100% DVL + 50% SWL	6 h
100% DVL + 25% SWL	10 min
100% DVL	10 min
75% DVL	10 min
50% DVL	10 min
25% DVL	10 min
0	1 h

Osim navedenog postupka ICE *Specification for Piling* preporučuje da se prirast penetracije pilota ograniči na 0,24 mm/h ako je pomak glave pilota veći od 24 mm, ali ako je pomak glave pilota manji od 10 mm preporučena stopa pomaka iznosi 0,1 mm/h prije nego je sljedeća razina opterećenja dodana.

### 5.2.2. Ispitivanje konstantnim prirastom penetracije

CRP (*Constant Rate of Penetration*) je ograničen za posebna ispitivanja pilota. Stopa penetracije iznosi između 0,5 i 2 mm/min, u glinama je stopa i manja. Pošto se opterećenje nanosi kontinuirano, preporučuje se korištenje hidraulične preše gdje se preko računalnog programa kontrolira nanošenje opterećenja. Prilikom CRP ispitivanja opterećenje se nanosi do sloma pilota što se očituje prestankom prirasta opterećenja ili kada penetracija dosegne 10 % promjera pilota.

### 5.3. Interpretacija rezultata

Krivulje slijeganja pilota kakve se danas koriste osmislio je Tomlinson (1977). Podaci o slijeganju statičkim probnim ispitivanjem pilota se stavljaju na dijagram na kojem se dobivena krivulja uspoređuje s tipičnim krivuljama baziranim na empirijskim podacima. Ukoliko krivulja vidljivo odstupa od tipične krivulje, to ukazuje na neočekivane geološke probleme kao što su mekane osjetljive gline, defekte u tijelu pilota ili na lošu izvedbu pilota.

Iz samih krivulja nije moguće sa sigurnošću podijeliti vrijednosti opterećenja koje podnose zasebno dijelovi plašta pilota i baza, stoga se ugrađuju mjerni pretvornici deformacija u tijelo pilota.

Nosivost pilota može se odrediti pomoću dva kriterija:

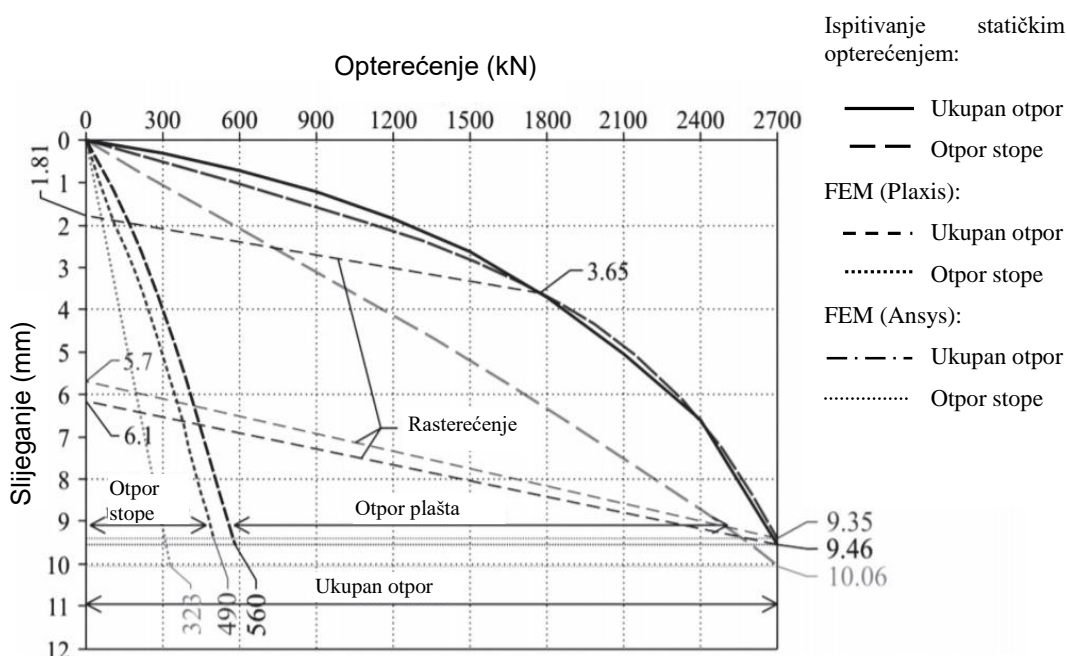
- 1 dostizanje opterećenja pod kojim se tlo nastavlja slijegati bez prirasta opterećenja;
- 2 dostizanje opterećenja koje uzrokuje slijeganje vrijednosti 10% radijusa pilota.

## 6. PREGLED PRETHODNIH USPOREDBA REZULTATA NUMERIČKE ANALIZE I STATIČKOG ISPITIVANJA PILOTA

Holko i Stacho (2014) objavljuju rad u kojem uspoređuju rezultate statičkog probnog ispitivanja pilota i numeričke analize koristeći računalne programe PLAXIS 2D i ANSYS. Cilj članka je bio prikazati točnost numeričke analize u odnosu na prava terenska ispitivanja. PLAXIS 2D i ANSYS daju slične rezultate (PLAXIS ipak nešto točnije), ali fokus ovog rada ja na PLAXIS-u stoga se ANSYS neće spominjati.

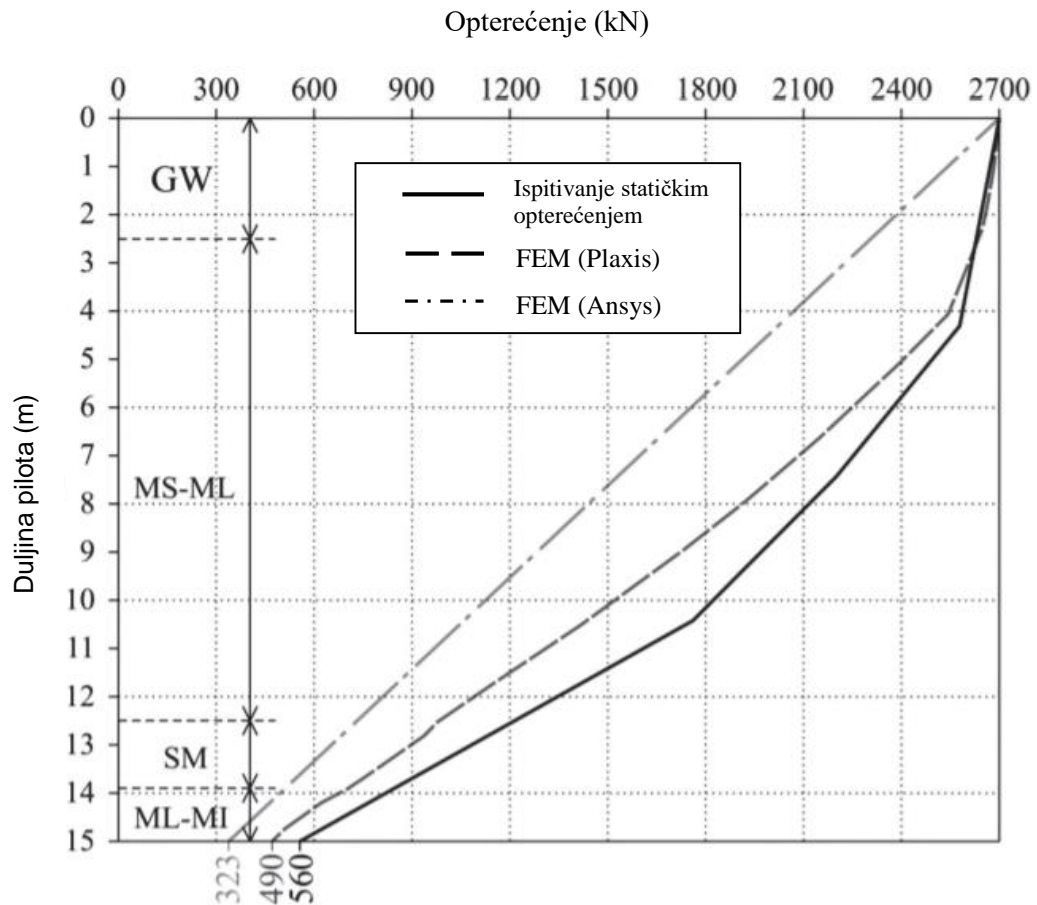
Statičko ispitivanje provedeno je na pilotu izvedenom CFA metodom dužine 15 m i promjera 630 mm.

Za numeričku analizu korišten je HS (Hardening Soil) model tla s pripadajućim svojstvima i slojevima tla. Utjecaj promjena u tlu nastalim ugradnjom pilota definiran je parametrom  $R_{inter}$  (0,85-1,00). Obzirom da se radi o jednom pilotu odabran je osnosimetričan model. Pilot je modeliran koristeći stvarni polumjer i duljinu (Druga faza). Naneseno je opterećenje na vrh pilota u vrijednosti od 8662 kPa što je ekvivalentno 2700 kN. Rezultati analiza prikazani su pomoću dijagrama prikazanih slikama 6-1 i 6-2.



Slika 6-1 Krivulje slijeganja i pilota





**Slika 6-2** Usporedba krivulja sile opterećenja po duljini pilota

Krivulje statičkog ispitivanja i numeričke analize se gotovo u potpunosti poklapaju oblikom tek nešto manje na Slici 6-2 putanjom. Iz svega se da zaključiti da numerička analize daju dobre rezultate zadovoljavajuće točnosti.

## 7. ISPITIVANJE NOSIVOSTI PILOTA STATIČKIM OPTEREĆENJEM

U Zagrebu, u Ilici projektirana je građevina s 15 katova + prizemlje s tlocrtnim dimenzijama 18,7 x 18,7 m kvadratnog oblika. Pošto su analize nosivosti i slijeganja buduće građevine pokazale nedostatnu nosivost i prekomjerna slijeganja, buduće građevine izvedene na samoj temeljnoj ploči, došlo se do zaključka da je potrebno duboko temeljenje (Mateković, 2015).

Kako bi se potvrdila predviđena geomehanička otpornost pilota, provedeno je je probno ispitivanje nosivosti statičkim postupkom za koje je projektom predviđeno jedno probno polje za pilot promjera 60 cm i duljine 23 m u tlu. Maksimalna predviđena sila ispitivanja probnog pilota statičkim opterećenjem iznosila je 5 000 kN (Matković, 2017).

Radovi na izvedbi pilota su obavljani prema normi HRN EN 1536:2008, Izvedba posebnih geotehničkih radova – Bušeni piloti. Probni pilot je armiran uzdužnom armaturom B500B 8Φ32 mm i spiralnom armaturom B500B Φ12 mm, hod spirale 20 cm, 10 cm i 8 cm u zoni nanošenja sile (nadzemni dio). Beton pilota je razreda C 40/50,  $d_{\max} = 16$  mm, minimalna količina cementa 400 kg/m<sup>3</sup>, razred konzistencije S-4 (Matković, 2017).

Cilj ispitivanja je bio utvrditi ukupnu nosivost ( $Q_{tot}$ ) te nosivost po stopi ( $Q_s$ ) i bazi ( $Q_b$ ). Također je određena sila puzanja ( $Q_c$ ).

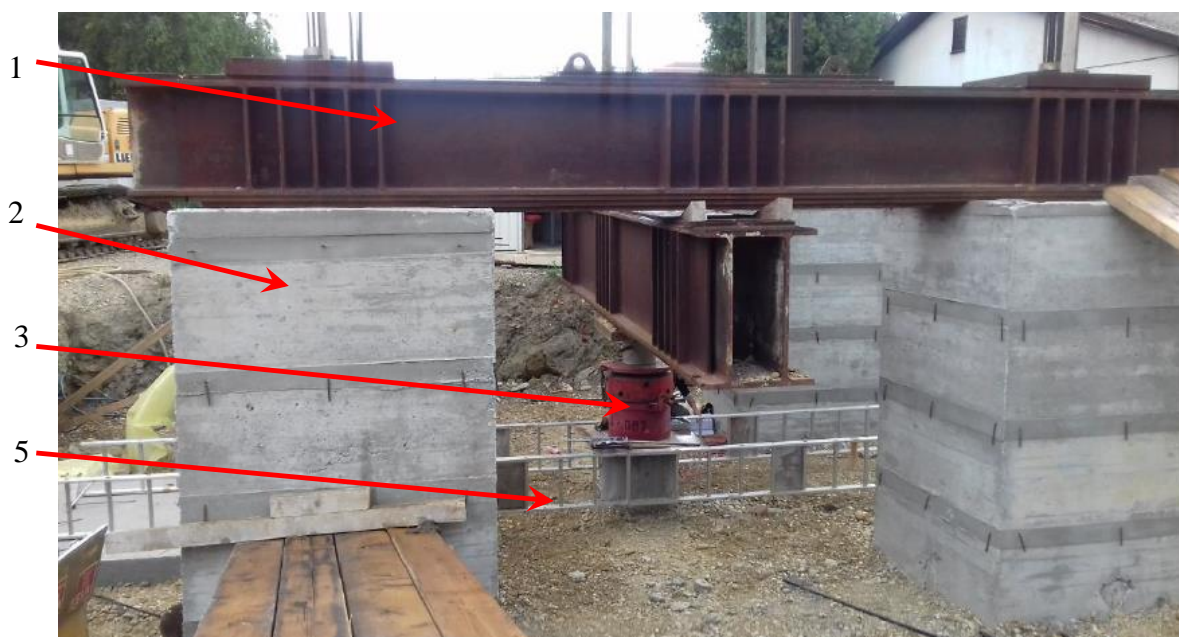
### 7.1. Korištena oprema za statičko ispitivanje

Sama konstrukcija za statičko opterećenje sastojala se od četiri vlačna pilota duljine 14,0 m i promjera 150 cm, na preporučenom razmaku od probnog pilota, preko kojih se prenosila sila u tlo. U vlačne pilote ugrađena su geotehnička prednapeta sidra. Silu na vlačne pilote prenose čelični nosači sastavljeni od glavne grede i dvije sekundarne grede dužine 5,6 m međusobno postavljene u horizontalni H položaj. Tlačnu silu na pilot prenosila je hidraulička preša kapaciteta 8 000 kN, a centričnost joj je omogućena sfernim zglobovom na gornjem dijelu preše.

Sila na glavi pilota je kontrolirana mjernim pretvornikom kapaciteta 10000 kN, postavljenom neposredno iznad preše. Pomaci glave pilota mjereni su pomoću četiri digitalne mikrourice preko aluminijske referentne grede duljine 8 m. Preciznost mjerenja je bila 0,001 mm. Mjerenje relativnih deformacija pilota po dubini radi razlučivanja nosivosti pilota na vrhu i na plaštu je provedeno na pet točaka duž pilota dubine 23 metra. Korišteni su senzori koji mjere relativnu deformaciju točnošću 1/1000 promila (1μm/m) (Matković, 2017).

Na Slikama 7-1 i 7-2 vidljivi su elementi sustava:

- glavni (čelični) nosač za prijenos sile na vlačne pilote (1)
- vlačni piloti (2)
- hidraulična preša (3)
- mjerni pretvornik za silu (4)
- referentna greda (prostorna aluminijska rešetka) (5)
- digitalni mjerači pomaka glave pilota (6)
- 12 kanalna centrala za prijenos električnih signala u računalo (pomaci, sila) (7).



**Slika 7-1** Konstrukcija za ispitivanje pilota statičkim postupkom

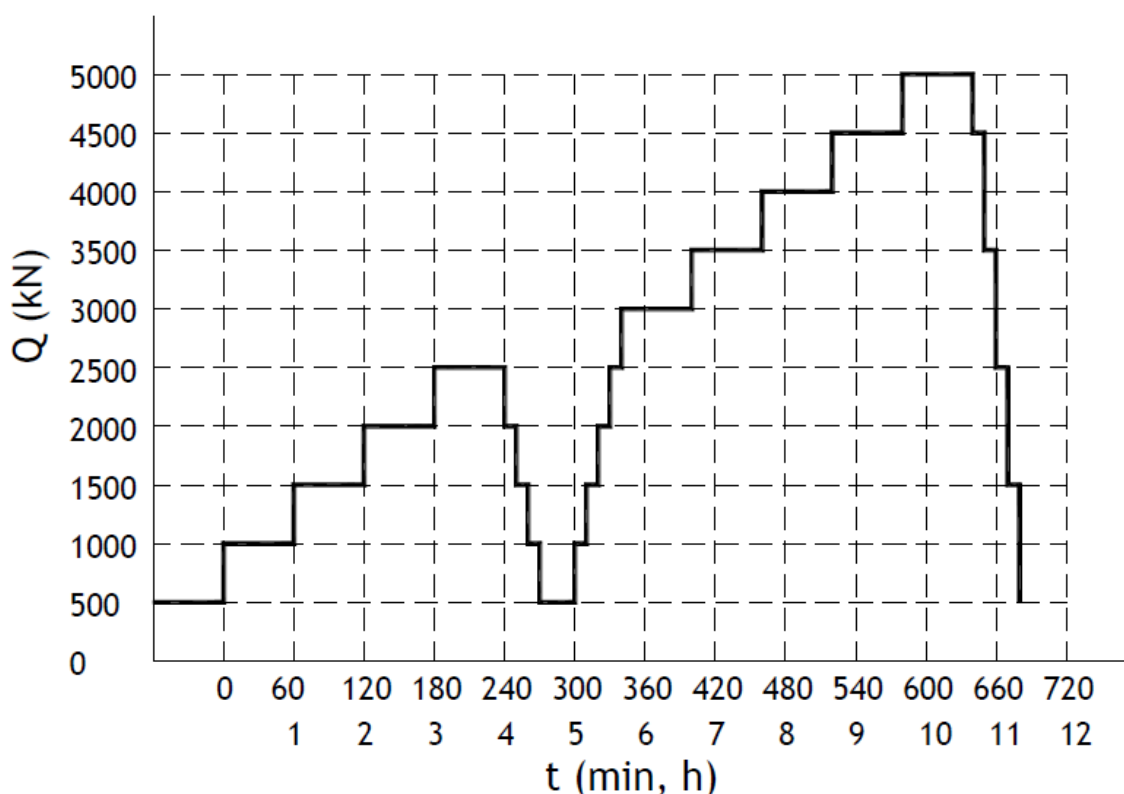


**Slika 7-2** Glava pilota, hidraulička preša, pretvornik sile i digitalni mjerači pomaka

## 7.2. Postupak probnog opterećenja pilota

Statičko ispitivanje probnih pilota je provedeno sukladno uputama iz *Suggested method ISSMGE, Subcommittee on Field and Laboratory Testing: „Axial Pile Loading Test-Part 1: Static Load“*. Maksimalna sila opterećenja pilota definirana je u iznosu  $Q_L = 5000$  kN (Matković, 2017).

Kao kriterij sloma usvojeno je postizanje vertikalnog pomaka pilota u iznosu 10% promjera pilota tj.  $\approx 6$  cm. Maksimalna postignuta sila tijekom ispitivanja bila je  $Q_L = 4400$  kN. Piloti su opterećivani u dvije faze (vidi Sliku 7-3). Sila od 500 kN je „nulto opterećenje“, tj. početak mjerenja. U prvoj fazi piloti su opterećivani do 50% sile ispitivanja, tj. do 2 500 kN. Opterećenje je nanošeno u dodatna četiri koraka po 500 kN i zatim se pilot rasteretio. Na taj način se eliminira eventualni prazni hod kao i kontaktno prilagođavanje sistema. U drugoj fazi se pilot opteretio do maksimalne sile ispitivanja od 4500 kN. Opterećenje je nanošeno u inkrementima po 500 kN. Svaki inkrement se održavao jedan sat odnosno dok prirast pomaka ne padne ispod 0,1 mm na sat. U rasterećenju se sila održavala 10 minuta (Matković, 2017).

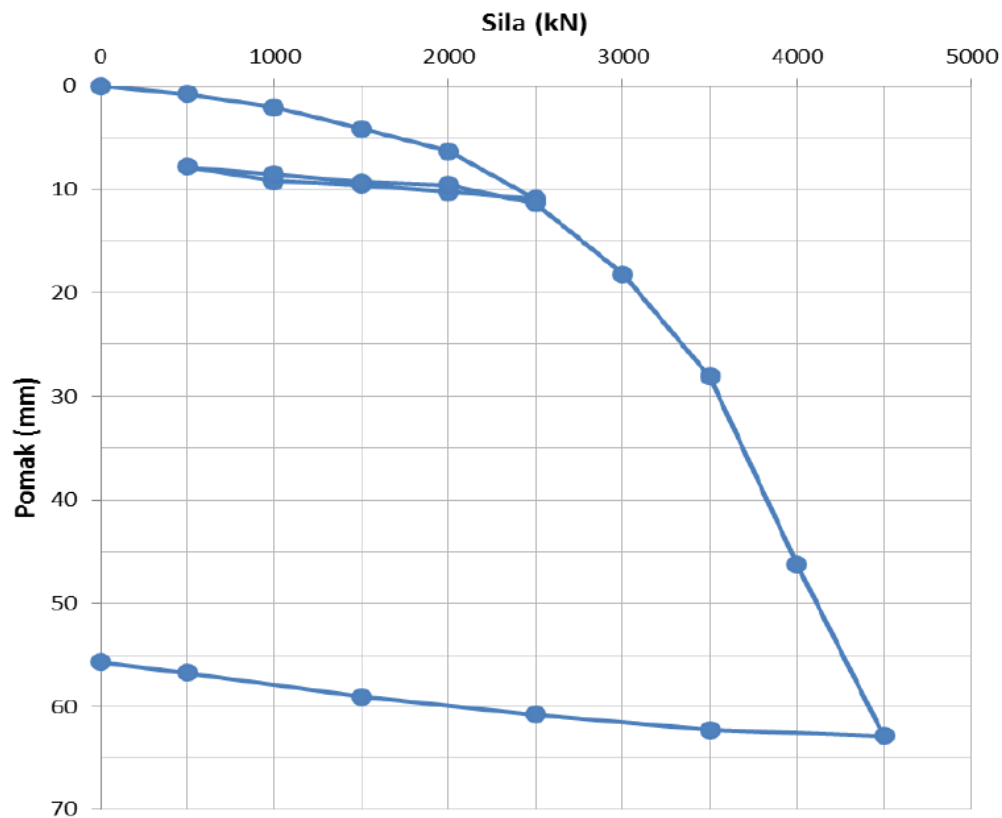


Slika 7-3 Program ispitivanja pilota statičkim postupkom

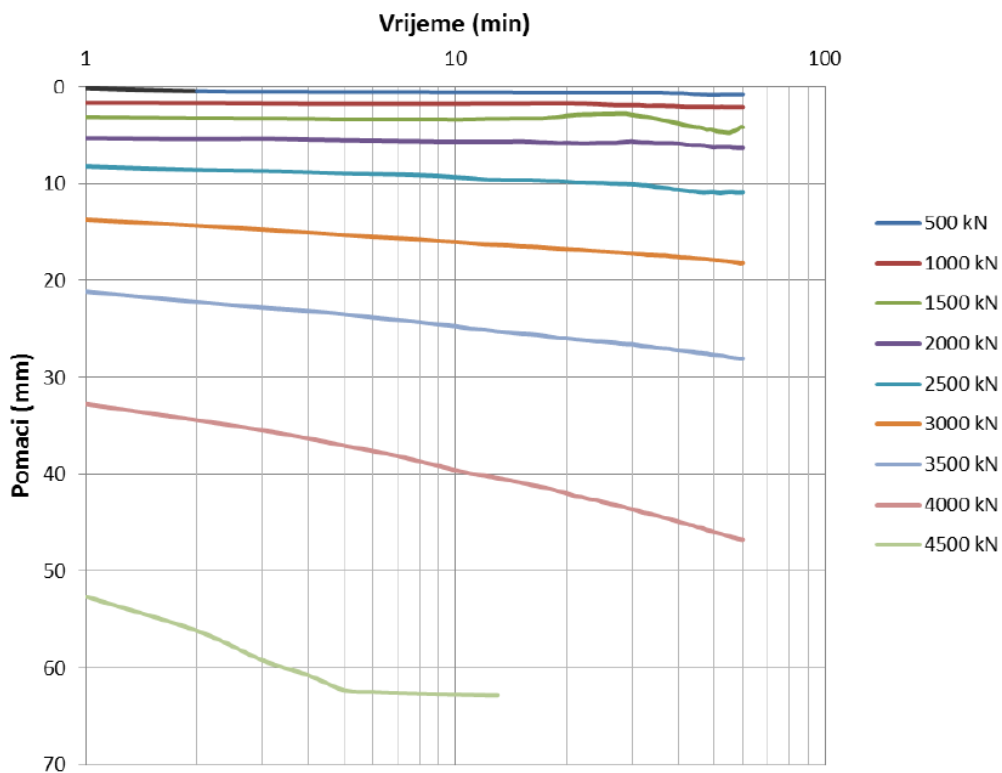
Sva mjerenja tijekom pokusa probnog opterećenja su automatski registrirana i pohranjena na osobnom računaru. Tijekom postupka probnog opterećenja sila i pomaci su prikazani na ekranu u realnom vremenu kako bi se imala kontrola nad pokusom. Interpretacija rezultata mjerenja, tj. određivanje otpornosti pilota bazirano je na postignutoj sili prilikom sloma pilota, odnosno prema kriteriju puzanja u vremenu za pojedine inkremente opterećenja (Matković, 2017).

### 7.3. Interpretacija rezultata

Na Slici 7-4 je dijagram koji prikazuje odnos sile i pomaka glave pilota za pojedine inkremente opterećenja. Postignuta sila od 4400 kN je ujedno i maksimalna sila ispitivanja odnosno  $Q_{ult} = 4400$  kN. Pomak se mjerio s četiri mjerna pretvornika te je u trenutku sloma tla srednja vrijednost pomaka glave pilota iznosila 62,836 mm što je nešto više od 10% promjera pilota. Slikom 7-5 je prikazan dijagram porasta pomaka glave pilota za svaki stupanj opterećenja.



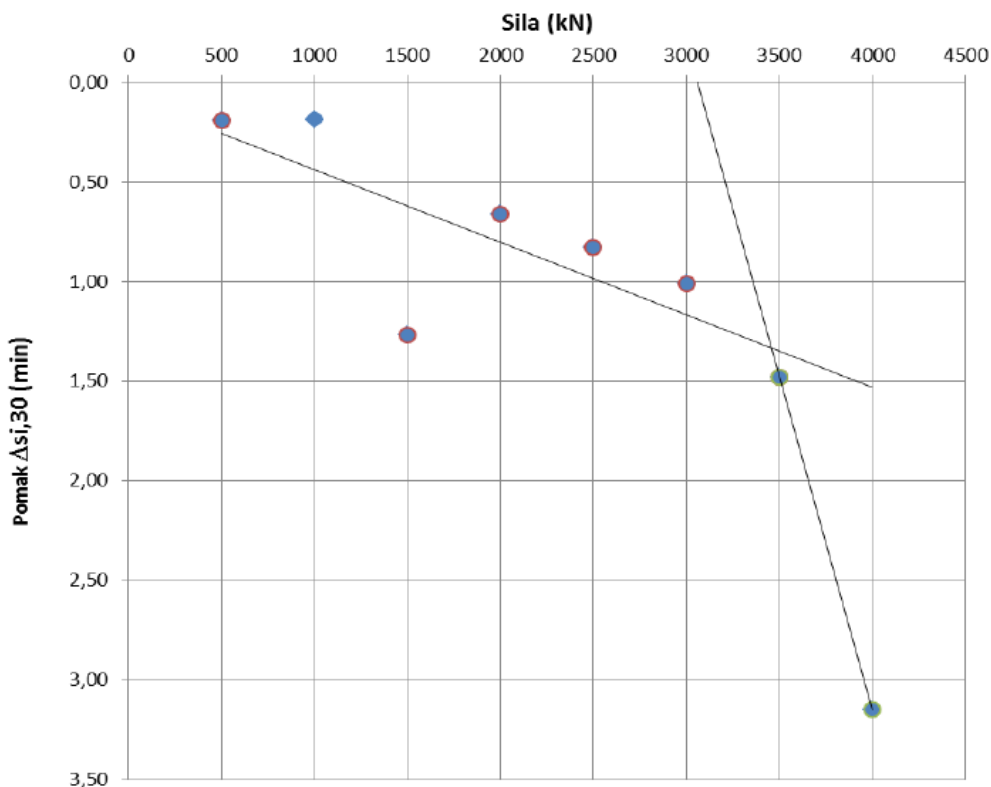
Slika 7-4 Dijagram sila-pomak glave pilota



Slika 7-5 Porast pomaka glave pilota za svaki stupanj opterećenja

Sila puzanja ( $Q_c$ ) je definirana kao sjecište dva pravca koji predstavljaju prosječne vrijednosti porasta pomaka pri konstantnom opterećenju u zadnjih 30 minuta svakog stupnja opterećenja ( $\Delta s_{i,30}$ ). Sila puzanja je određena preko grafa prikazanog Slikom 7-6.

Iz dijagrama očitana vrijednost sile puzanje iznosi  $Q_c = 3400$  kN (Matković, 2017).



**Slika 7-6** Određivanje sile puzanja ( $Q_c$ )

Relativne deformacije pilota po dubini mjerene su sensorima koji su pričvršćeni na armaturni koš probnog pilota. Cilj mjerenja relativnih deformacija po dubini je razlučivanje nosivosti pilota na stopi i po pojedinim dijelovima plašta. Dubine na kojima su ugrađeni senzori su sljedeći:

- 0,2 m od glave pilota
- 11,0 m od glave pilota
- 13,5 m od glave pilota
- 18,0 m od glave pilota
- 22,8 m od glave pilota.

Slikom 7-7 na lijevoj strani prikazana je tablica relativnih deformacija pilota po dubini, dok je na desnoj strani tablica koja prikazuje izračunate sile, preko relativnih deformacija, koje djeluju duž pilota a raspoređene su po slojevima. Slika 7-8 grafički prikazuje sile duž pilota.

Mjerena deformacija za stupanj opterećenja							Izračunata sila					
Dubina	500 kN	1500 kN	2500 kN	3000 kN	4000 kN	4500 kN						
m	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	$\mu\epsilon$	kN	kN	kN	kN	kN	kN
0,00							500,0	1500,0	2500,0	3000,0	4000,0	4500,0
0,20	42,00	133,00	236,40	289,80	364,10	85,90	356,3	1128,1	2005,2	2458,2	3088,4	728,6
11,00	25,30	68,90	112,70	115,30	163,00	66,00	214,6	584,4	956,0	978,0	1382,6	559,8
13,50	16,50	47,20	85,30	94,80	113,20	61,60	140,0	400,4	723,5	804,1	960,2	522,5
18,00	8,30	19,50	38,60	49,20	59,50	51,80	70,4	165,4	327,4	417,3	504,7	439,4
22,80	1,70	4,70	10,40	38,00	42,30	20,10	14,4	39,9	88,2	322,3	358,8	170,5

**Slika 7-7** Tablice mjerenih deformacija za stupanj opterećenja i izračunate sile

Sila se računala prema sljedećoj jednadžbi:

$$F = \epsilon (AE) \quad (7-1)$$

gdje su: **F** – sila duž pilota

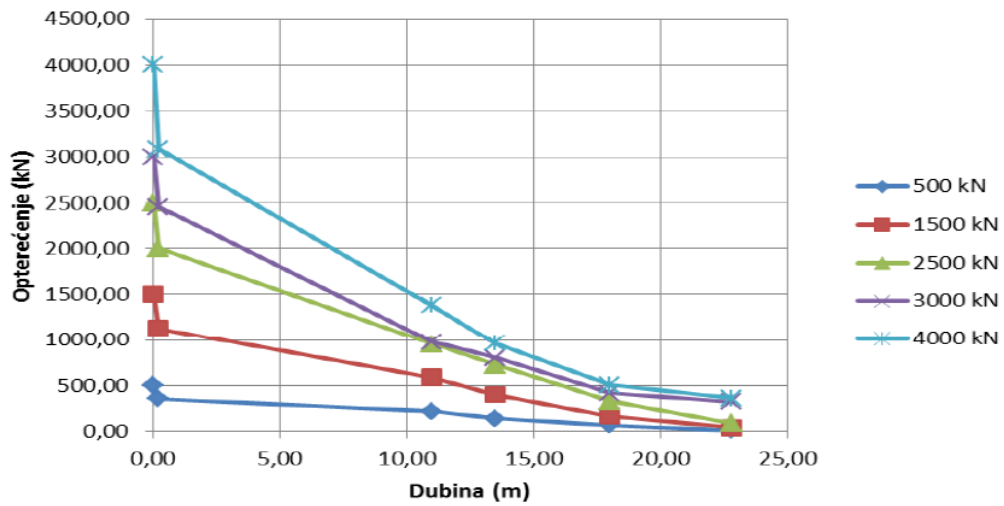
**$\epsilon$**  – izmjerena deformacija

**A** – površina poprečnog presjeka

**E** – Youngov modul elastičnosti pilota

Za površinu poprečnog presjeka uzet je  $A = 0,283 \text{ m}^2$ , pošto je  $D = 0,6$  dok je za Youngov modul elastičnosti betona uzet  $E = 30 \cdot 10^6 \text{ kN/m}^2$ .





**Slika 7-8** Raspodjela sila duž pilota za različite stupnjeve opterećenja

Rezultati probnog ispitivanja pilota:

- Ispitana nosivost pilota,  $Q_{tot} = 4400 \text{ kN}$
- Ispitana nosivost stope pilota,  $Q_b = 360 \text{ kN}$
- Ispitana nosivost plašta pilota,  $Q_s = 4040 \text{ kN}$
- Sila puzanja,  $Q_c = 3400 \text{ kN}$

## 8. NUMERIČKA SIMULACIJA STATIČKOG PROBNOG ISPITIVANJA PILOTA

Za numeričku simulaciju statičkog probnog ispitivanja pilota na lokaciji Ilica korišten je računalni program PLAXIS 2D. Simulacija statičkog ispitivanja napravljena je s ciljem usporedbe rezultata probnog ispitivanja i numeričke simulacije. Za simulaciju su korišteni ulazni parametri koji su dani i opisani u prethodnom poglavlju. Parametri tla korišteni za simulaciju prikazani su Tablicom 8-1. Za izradu modela korišten je osnosimetrični model s trokutastim elementima s 15 čvorova. Pilot je modeliran kao zaseban sloj tla.

### 8.1. Izrada modela i proračun

Prilikom izrade modela nastojalo se što preciznije definirati debljine slojeva te parametre tla tako da približno odgovaraju stvarnom stanju.

Na temelju jednoosne tlačne čvrstoće, ( $q_u$ ) određena je nedrenirana posmična čvrstoća ( $s_{u,ref}$ ) sljedećim izrazom:

$$S_{u,ref} = \frac{q_u}{2} \quad (8-1)$$

Youngov modul elastičnosti definiran je empirijski na temelju vrijednosti edometarskog modula. Youngov modul elastičnosti pilota odgovara Youngovom modulu elastičnosti armiranog betona, što je relativno poznata veličina.

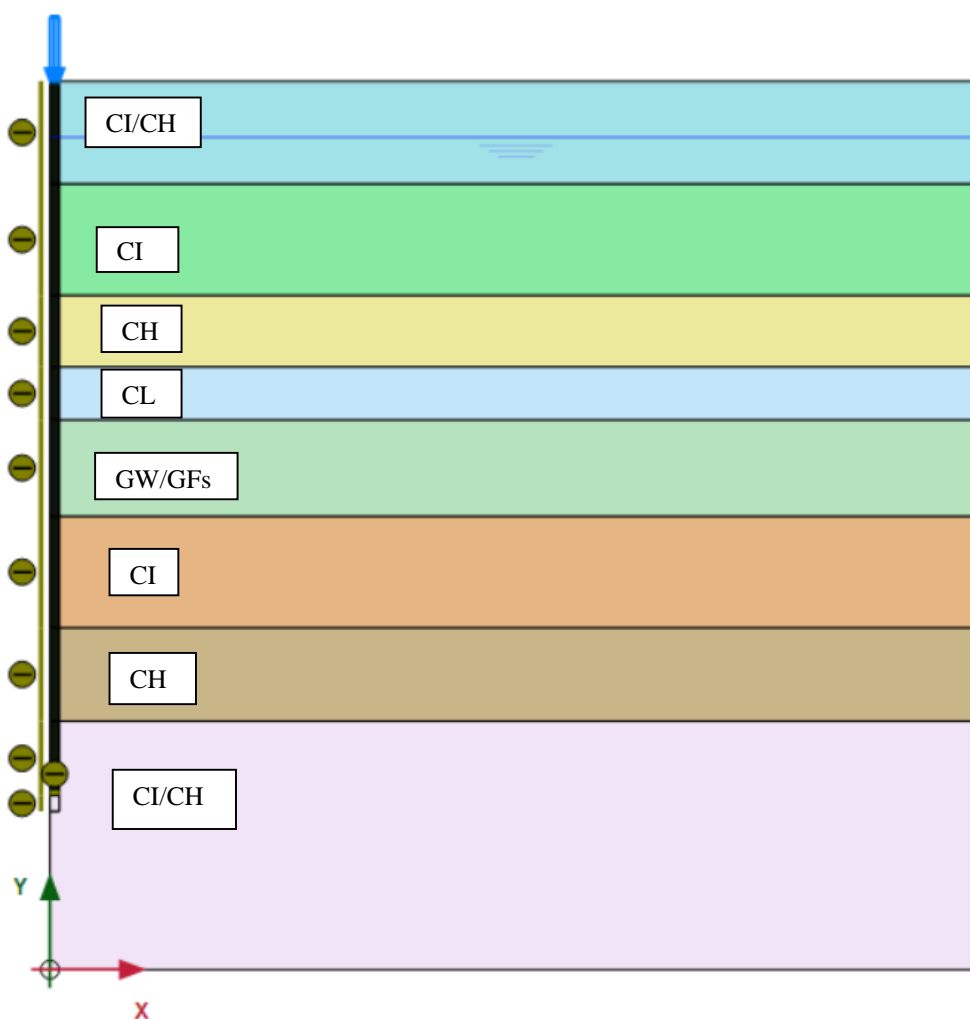
**Tablica 8-1** Parametri tla

Parametar	Ime	1	2	3	4	5	6	7	8	Pilot
		CI/CH	CI	CH	CL	GW/GF <sub>s</sub>	CI	CH	CI/CH	
Model materijala	Model	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	MC	LE
Tip ponašanja	D	D	D	D	D	D	UD	UD	UD	NP
Gustoća suhog uzorka (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{unsat}$	14,0	12,9	13,7	14,0	17,0	17,6	17,3	16,9	24,0
Gustoća vlažnog uzorka (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_{sat}$	18,4	18,0	18,9	18,9	20,0	21,1	21,1	20,6	24,0
Youngov modul elastičnosti (kN/m <sup>2</sup> )	E	3150	4050	5400	4500	25000	7200	7200	7200	30E6
Edometarski modul (kN/m <sup>2</sup> )	$E_{oed}$	4240	5452	7269	6058	27000	15400	15400	154000	30,6E6
Poissonov koeficijent	$\nu$	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,4	0,4	0,4	0,1
Kut trenja (°)	$\varphi$	15	13	11	9	36	-	-	-	-
Kohezija/Nedrenirana posmična čvrstoća (kN/m <sup>2</sup> )	$c/S_{u,ref}$	15/-	10/-	33/-	22,5/-	-	-/123	-/123	-/138	-

Oznake kratica koje se spominju u tablici su sljedeće:

- MC – Mohr-Coulombov model;
- LE – linearno-elastični model;
- UD – undrained (nedrenirano stanje);
- NP – non-porous (neporozno stanje);
- D – drained (drenirano stanje).

Model je definiran u ukupnim dimenzijama 28,6 x 30,0 m. Dimenzije pilota su odgovarale stvarnima dimenzijama probno opterećivanog pilota, duljina 23 m i promjer 0,6 m. Pri simulaciji korišten je osnosimetrični model pa je samo pola pilota vidljivo (0,3 m). Prilikom ugradnje pilota dolazi do određenih promjena u okolnom tlu zbog čega se u model stavlja *interface* elementi pomoću kojih se te promjene simuliraju. Numerički model prikazan je na slici 8-1. Prisutnost podzemne vode je na koti 3,20 m od ušća bušotine.

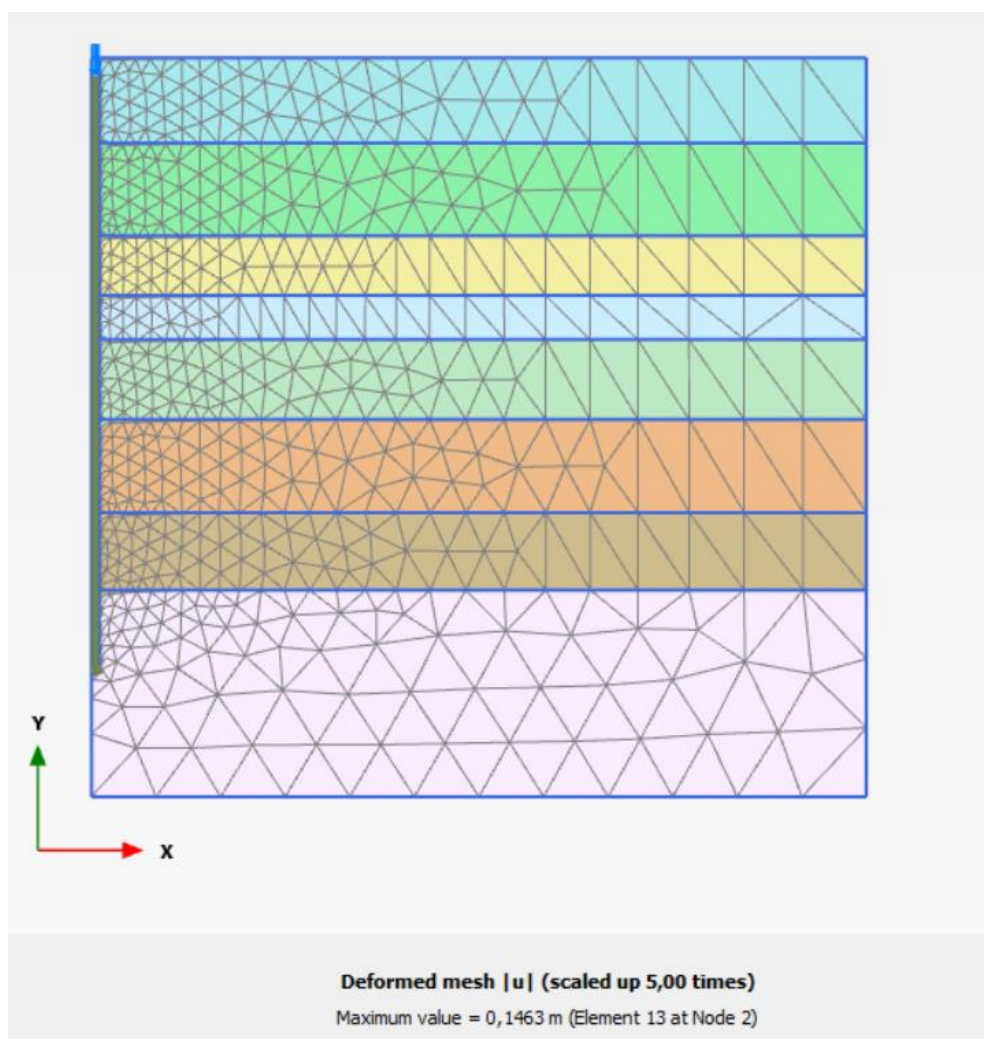


Slika 8-1 Model tla

Faze opterećenja i rasterećenja odgovarale pilota in situ provedenom ispitivanju statičkog probnog opterećenja pilota. Prije same simulacije statičkog probnog opterećenja pilota, definirana je inicijalna faza te faza ugradnje pilota. Sama numerička simulacija provedena je u pojednostavljenom obliku bez promatranja utjecaja vremenske komponente odnosa naprezanja pilota i njegovih deformacija. Samim time u sklopu ove numeričke simulacije silu puzanja ( $Q_c$ ) nije moguće odrediti.

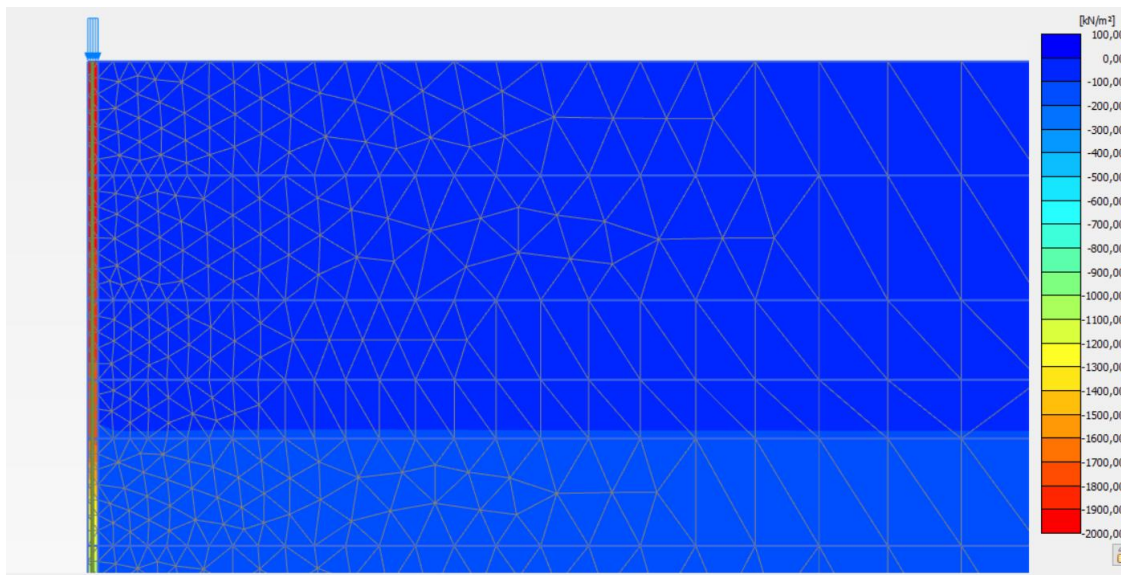
## 8.2. Rezultati proračuna

Nakon nanošenja zadnje faze opterećenja predviđenog programom  $Q = 4500$  kN došlo je do predviđenog sloma tla. Prema očekivanjima došlo je određenog slijeganja glave pilote i okolnog tla te deformacija u tlu i duž pilota. Najveće slijeganja dogodila su se na mjestu gdje je ugrađen pilot te ukupno slijeganje iznosi 146,3 mm što se vidi na Slici 8-2.



Slika 8-2 Prikaz modela tla nakon slijeganja

Na tim mjestima su ujedno i najveća efektivna naprezanja što je vidljivo na Slici 8-3. Crvenom bojom su zabilježena veća efektivna naprezanja. Udaljavanjem od pilota efektivna naprezanja se smanjuju.



**Slika 8-3** Prikaz efektivnih naprezanja

## 9. ZAKLJUČAK

Provedeno je statičko ispitivanje probnog pilota prilikom izgradnje objekta na lokaciji Ilica u Zagrebu. Ispitivanje je provedeno da bi se utvrdilo odgovarala li proračunska nosivost pilota in situ stanju. Ispitivanje je provedeno kroz više inkrementa na način da se prilikom svakog novog inkrementa dodavalo 500 kN novog opterećenja. Prilikom nanošenja sile do 4500 kN, pri djelovanju sile od 4400 kN došlo je do sloma temeljnog tla što je bilo vidljivo iz pomaka pilota koji su dosegili vrijednost 10% promjera pilota što je bilo definiran kriterij sloma.

Simulacija odnosno numerička analiza statičkog probnog ispitivanja pilota provedena je u programu PLAXIS 2D. Model je napravljen prema dostupnim in situ parametrima. Simulacija je provedena u više faza. U prvoj fazi aktivirano je tlo dok se u drugoj fazi ugrađuje pilot. U daljnjim fazama počinje inkrementalno opterećenje i rasterećenje pilota. Simulacija je provedena do sile od 4400 kN. Pri tome je ostvaren ukupni pomak glave pilota od 146,3 mm, što je veća vrijednost nego prilikom in situ ispitivanja. Pretpostavlja se da je navedenom uzrok moguća odstupanja parametara tla kao i to što u analize nije uključeno vrijeme.

## 10. LITERATURA

BAGUELIN F., FRANK R., SAID Y.H. 1977. *Theoretical study of lateral reaction mechanism of piles*. Geotechnique. Volume, 27 Issue 3, str. 405-434

BARTON Y. O. 1982. *Laterally loaded model piles in sand: centrifuge tests and finite element analyses* (Ph.D. thesis). University of Cambridge

BURGESS I.W. 1976. *The stability of slender piles during driving*. Geotechnique, 26(2): str. 281-292

BURGESS I.W. 1980. *Reply to discussion by Ly B.L.* Geotechnique, 30(3): str. 322-323

*EN 1997-1 Geotehničko projektiranje – Dio 1: Opća pravila*

*EN 1997-2 Geotehničko projektiranje – Dio 2: Istraživanje i ispitivanje tla*

EVANGELISTA A., VIGGIANI C. 1976. *Accuracy of numerical solutions for laterally loaded pile in elastic half-space*. Proc. 2nd Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics. Blacksburg, Vol. 3: str. 1367-1370

FELLENIUS B.H. 1980. *The analysis of results from routine pile load tests*. Ground Engineering, London, Vol. 13, No. 6, str. 19 - 31

FLEMING K., WELTMAN A., RANDOLPH M., ELSON K. 2009. *Piling Engineering*. Treće izdanje. Oxon: Taylor & Francis.

FRADEN J. 2003. *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, Fourth Edition*. Springer

HANNA A., T.Q. NGUYEN 2003. *Shaft resistance of single vertical and batter piles driven in sand*. ASCE J. Geot. And Geo Envir. Eng., 129(7): 601-607

HOLKO M., STACHO J. 2014. *Comparison of numerical analyses with a static load test of a continuous flight auger pile*. Slovakia Journ. of Civil Engin. Vol. 22, No. 4, str 1 – 10

*HRN EN 1536:2008, Izvedba posebnih geotehničkih radova – Bušeni piloti*

MATEKOVIĆ D. 2015. *Geomehanički elaborat*. Zagreb. Projekt Adrion d.o.o., 03D/2015

MATKOVIĆ I. 2017. *Izveštaj o probnom opterećenju pilota*. Zagreb: Institut IGH d.d., 72220-112/2017

MATLOCK H., REESE L.C. 1960. *Generalised Solutions for Laterally Loaded Piles*. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 86, Issue 5, str. 63-91

RANDOLPH M.F. 1981. *The response of flexible piles to lateral loading*. Geotechnique, 31(2): 247-259

RANDOLPH M.F. 1983. *Settlement considerations in the design of axially loaded piles*. Ground Engineering. 16(4), str. 28-32

RANDOLPH M.F. 2003. *Science and empiricism in pile foundation design*. Geotechnique 53(10), str. 847-875

REESE L.C., WANG S.T. 1993. *LPILE 4.0*. Ensoft, Inc. Austin, Texas.

STEWART D.P. 1999b. *PYGMY user manual, version 2.1*, School of Civil and Resource Engineering, The University of Western Australia

*Suggested method ISSMGE, Subcommittee on Field and Laboratory Testing: „Axial Pile Loading Test-Part 1: Static Load”*

TOMLINSON M.J. 1977. *Pile Design and Construction Practice*. London: Viewpoint Publications



VESIC A.S. 1997. *Design of Pile Foundations*. National Co-operative Highway Research Program. Synthesis of Highway Practice No 42. Transportation Research Board. National Research Council. Washington D.C.