# Kombinirano temeljenje temeljna ploča-piloti na ElTo Zagreb

**Peić, Matija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

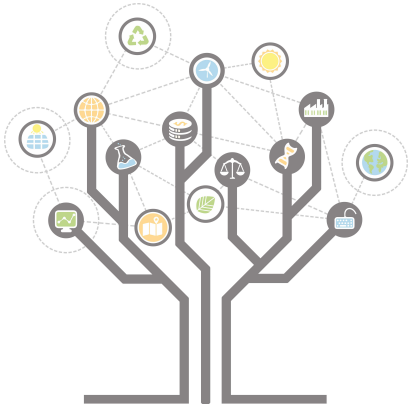
**2020**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:638337

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-10-03**



*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

MATIJA PEIĆ

# KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA-PILOTI NA ElTo ZAGREB

DIPLOMSKI RAD

Varaždin, 2020.

Sazivam članove ispitnog povjerenstva

za _____ u _____ sa

Obranu ovog rada kandidat će vršiti i pred

ispitnim povjerenstvom u Varaždinu

Varaždin, _____

Predsjednik
ispitnog povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Igor Petrović

**Članovi povjerenstva**

1) Izv. prof. dr. sc. Krešo Ivanušić
2) Izv. prof. dr. sc. Boris Kavur
3) Prof. dr. sc. Stjepan Stričec

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
GEOTEHNIČKI FAKULTET

DIPLOMSKI RAD

# KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA-PILOTI NA ElTo ZAGREB

KANDIDAT:
Matija Peić

MENTOR:
Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić

Varaždin, 2020.

Sveučilište u Zagrebu
Geotehnički fakultet

# ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Pristupnik: MATIJA PEIĆ

Matični broj: 249 - 2018./2019.

Smjer: GEOINŽENJERSTVO OKOLIŠA

**NASLOV DIPLOMSKOG RADA:**

KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA-PILOTI NA EITo ZAGREB

Rad treba sadržati: 1. Uvod
2. Plitko temeljenje
3. Duboko temeljenje
4. Geotehnički modeli tla
5. Kombinirano temeljenje
6. Kombinirano temeljenje temeljna ploča-piloti na EITo Zagreb
7. Zaključak
   Literatura

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

Zadatak zadan: 10.03.2020. Rok predaje: 07.09.2020.

Mentor:
Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić

REPUBLIKA HRVATSKA 1 VARAŽDIN GEOTEHNIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

Predsjednik Odbora za nastavu:
Izv.prof.dr.sc. Igor Petrović

# IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrdujem da je diplomski rad pod naslovom:

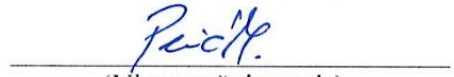
KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA-PILOTI NA ELTO ZAGREB

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **Izv.prof.dr.sc. Kreše Ivandića.**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 1.9.2020.

Matija Peić
(Ime i prezime)



(Vlastoručni potpis)

# IZJAVA MENTORA O POSTOTKU SLIČNOSTI ZAVRŠNOG RADA S VEĆ OBJAVLJENIM RADOVIMA

Izjavljujem i svojim potpisom potvrdujem da je diplomski rad pod naslovom:

KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA-PILOTI NA ELTO ZAGREB

pregledan anti-plagijat programskim paketom PlagScan te da postotak sličnosti cjelovitog završnog rada, s već objavljenim radovima, ne prelazi 20%, kao i da pojedinačni postotak sličnosti završnog rada sa svakom literaturnom referencom pojedinačno ne prelazi 5%.

U Varaždinu, 1.9.2020.

Izv.prof.dr.sc. Krešo Ivandić
(Mentor)

(Vlastoručni potpis)

# SAŽETAK

Autor: Matija Peić

KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA-PILOTI NA ElTo ZAGREB

Temeljenje konstrukcija je geotehnički zahvat čije su zadaće osiguravanje neprekoračenja nosivosti tla i dopuštenih relativnih i apsolutnih vrijednosti slijeganja te sprječavanje nepoželjnih utjecaja na okolne građevine. Ovisno o karakteristikama podtemeljnog tla, temeljenja dijelimo na plitka, duboka i kombinirana. Plitka temeljenja se koriste kada su karakteristike tla zadovoljavajuće za zadane uvjete slijeganja i nosivosti odmah ispod najniže kote građevine. Dubokim temeljenjem se opterećenje građevine prenosi u dublje slojeve tla povoljnijih svojstava. Kombinirano temeljenje se koristi u složenijim uvjetima, odnosno, kada lokalni geotehnički uvjeti tla nisu pogodni za korištenje samo plitkog ili samo dubokog temeljenja. Najčešće se radi o kombinaciji temeljne ploče (koja spada u plitko temeljenje) i pilota (koji su vrsta dubokog temeljenja). U ovoj se kombinaciji opterećenje građevine raspoređuje u međusobnoj interakciji elemenata nosivog sklopa temeljna ploča – piloti - temeljno tlo, na način da svaki od njih preuzima na sebe optimalnu ulogu.

Primjer primjene kombiniranog temeljenja je strojarnica Elektrane - Toplane Zagreb (ElTo Zagreb). U radu će se prikazati problematika procesa kombiniranog temeljenja za navedenu građevinu.

**Ključne riječi:** temeljenje, temeljna ploča, piloti, kombinirano temeljenje, ElTo Zagreb

# ABSTRACT

Author: Matija Peić

RAFT FOUNDATIONS FOR ElTo ZAGREB

Foundation is a geotechnical intervention whose tasks are to ensure the bearing capacity of soil and acceptable relative and absolute subsidence values, and to prevent non preferable affects to surrounding buildings. Depending on the characteristics of subsoil, foundations are divided into shallow, deep and combined pile raft foundations. Shallow foundations are used when soil characteristics are satisfactory for given subsidence and load bearing conditions just below the lower elevation of a building. Deep foundations transfer the load of a building into deeper, more quality soil layers. Combined pile raft foundations are used in more complex conditions when geotechnical soil conditions are not suitable for the use of only shallow or only deep foundations. It is most often a combination of a raft (which is a type of a shallow foundation) and piles (which are a type of a deep foundation). In this combination, the load of a building is evenly distributed on a combined foundation.

An example of the application of a pile raft foundation is an engine room of the Zagreb Power Plant (ElTo Zagreb). The paper presents the problems of a raft foundation process for this building.



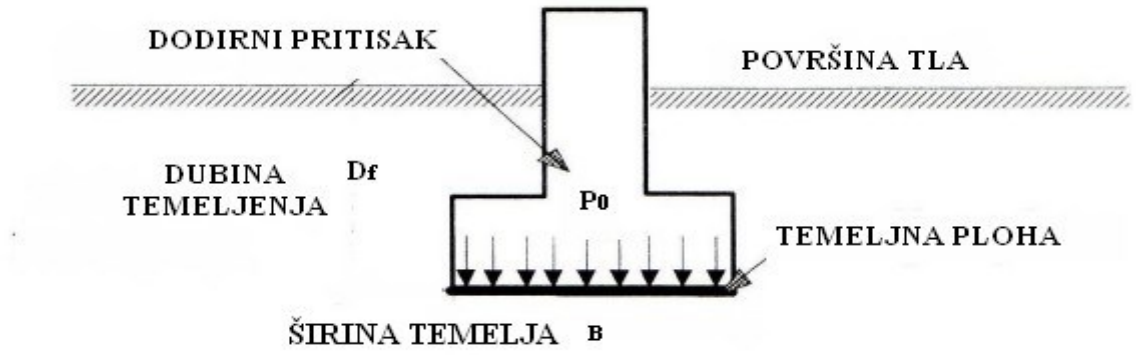
**Key words:** foundation, raft, pile, pile raft foundation, ElTo Zagreb

**SADRŽAJ**

SAŽETAK ..... I
ABSTRACT ..... II
1.UVOD ..... 1
2. PLITKO TEMELJENJE ..... 4
2.1. Podjela plitkih temelja ..... 5
2.2. Temeljna ploča ..... 7
2.3. Nosivost temeljne ploče prema Eurocodu 7 ..... 7
3. DUBOKO TEMELJENJE ..... 9
3.1. Podjela dubokih temelja ..... 9
3.2. Piloti ..... 13
3.2.1. Proračun pilota ..... 15
3.2.1.1. Pilot opterećen vertikalnom silom ..... 16
3.2.1.2. Pilot opterećen horizontalnom silom ..... 18
3.2.2. Proračun nosivosti grupe pilota ..... 22
4. GEOTEHNIČKI MODELI TLA ..... 26
4.1. Winkler-ov model tla ..... 26
4.2. Model tla kao elastičan kontinuum ..... 27
4.3. Model tla analiziran metodom konačnih elemenata ..... 28
5. KOMBINIRANO TEMELJENJE ..... 30
5.1. Dimenzioniranje kombiniranog temeljenja ..... 32
5.2. Određivanje dužine i promjera pilota i temeljne ploče ..... 34
6. KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA - PILOTI NA ELEKTRANA - TOPLANA ZAGREB ..... 35
6.2. Sastav i karakteristike temeljnog tla te dubine podzemne vode ..... 35
6.3. Kombinirani temelji temeljnih ploča i pilota za ElTo Zagreb ..... 37
6.4. Proračun kombiniranog temelja kotla na ispušne plinove ..... 38
6.5. Proračun kombiniranog temelja za plinsko-turbinski agregat ..... 46
6.6. Proračun kombiniranog temelja za parno-turbinski agregat ..... 52
7. ZAKLJUČAK ..... 57
LITERATURA ..... 58
POPIS SLIKA I TABLICA ..... 59

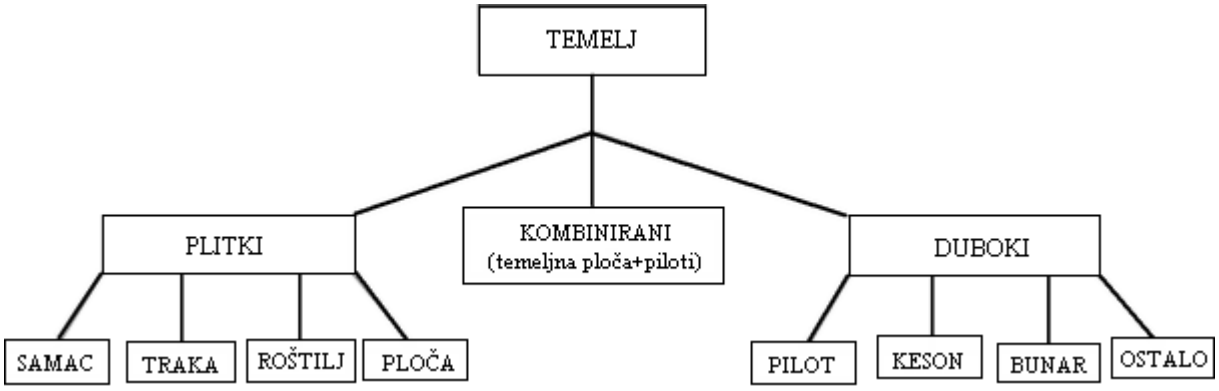
# 1.UVOD

Temeljenje konstrukcija je vrsta geotehničkog zahvata u tlu čija je svrha prijenos naprezanja građevine preko temelja u podtemeljno tlo. Temelj je dio svake građevine, a njegova uloga je da se opterećenje nastalo građevinom prenese u prirodno tlo, na način da zadovoljava sve norme kojima se omogućuje trajna uporabivost neke građevine. Kao sastavni dio svake građevine, temelj može biti različitog oblika i veličine, a ovisno o preuzimanju opterećenja može se nalaziti na različitoj dubini. Navedeno ovisi o vrsti građevine iznad i karakteristikama tla ispod temelja. Na Slici 1. prikazani su dijelovi temelja te osnovni pojmovi vezani uz temelj i postupak temeljenja.



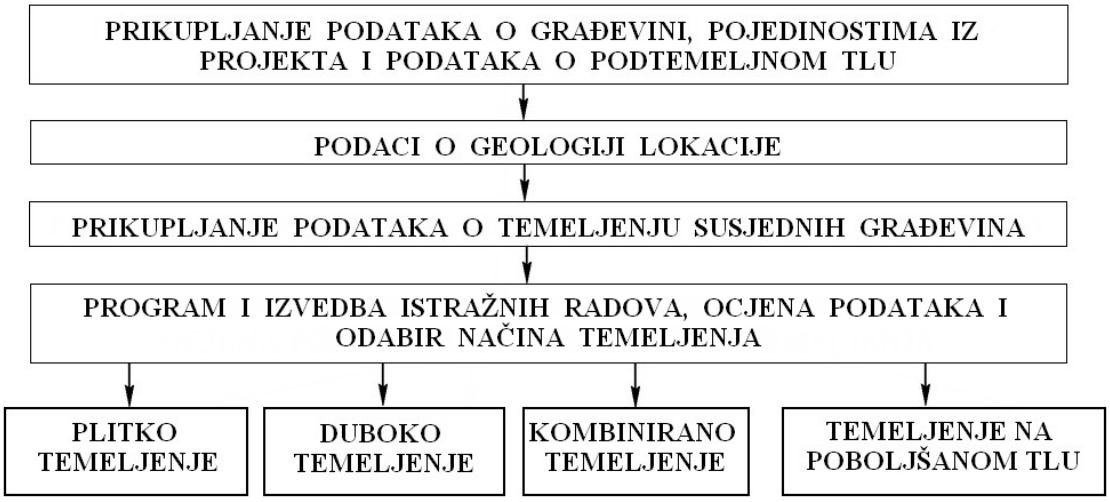

Slika 1. Shematski prikaz temelja

Podjelu temeljenja različiti autori interpretiraju na svoj način, ali najčešća podjela temeljenja svodi se na plitke, duboke ili kombinirane temelje, a navedeno prikazuje shematski prikaz na Slici 2. Kod primjene plitkih temelja dubina ukopavanja temelja manja je od širine temelja. Plitki temelji mogu na različite načine prenositi opterećenje u tlo, pa tako ih dijelimo na: samce, trake, roštilje i ploče. Duboki temelji su oni pri kojima je dubina temeljenja veća četiri puta od širine temeljne stope, a prijenos opterećenja građevine se, osim po temeljnoj plohi, prenosi i po plaštu. Duboke temelje možemo podijeliti na: pilote, kesone, bunare i ostale manje zastupljene metode. Zahtjevniji građevinski pothvati zahtijevaju primjenu kombiniranog temeljenja, odnosno kombinaciju plitkog i dubokog temeljenja.




Slika 2. Shematska podjela temelja

Način temeljenja ovisi o mnogo čimbenika koje utvrđujemo prije projektiranja samog temelja te postoji određeni redoslijed utvrđivanja tih čimbenika. Prvo je potrebno prikupiti podatke o građevini, o pojedinostima iz projekta i podatke o podtemeljnom tlu, zatim podatke o geologiji lokacije te o temeljenju susjednih građevina, nakon čega se izrađuje program i izvode istražni radovi na temelju kojih ocjenjujemo podatke i odabiremo način temeljenja (Reese i dr., 2006). Na Slici 3. skiciran je kronološki redoslijed čimbenika koje uzimamo u obzir pri odabiru vrste temeljenja.



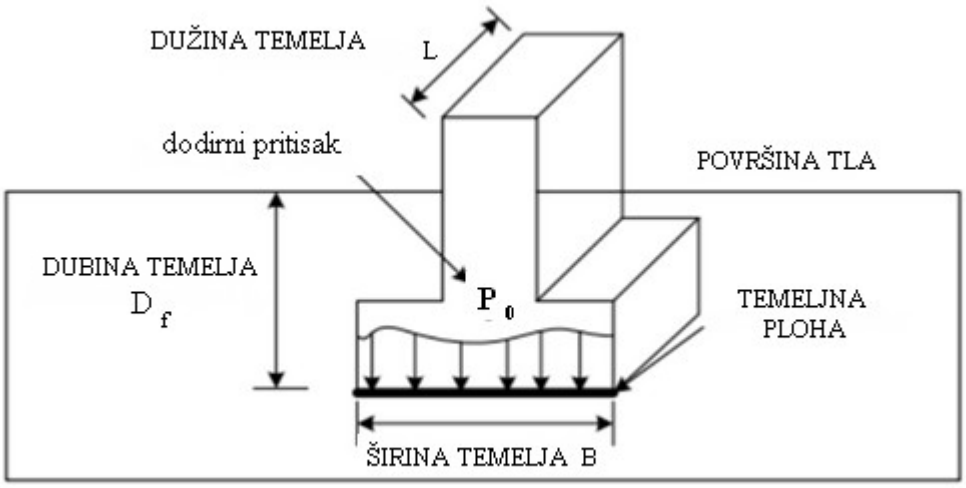

Slika 3. Shematski prikaz redoslijeda odabira vrste temeljenja

Glavni podaci koje uzimamo u obzir odnose se na karakteristike podtemeljnog tla, jer navedeno određuje vrstu najprihvatljivijeg temelja. Osim toga, karakteristike podtemeljnog tla određuju načine na koji će se naprezanja prenijeti s građevine u tlo. Budući da temelji imaju funkciju prijenosa naprezanja u tlo, oni moraju zadovoljiti dva uvjeta, a to su nosivost tla, odnosno temelj ne smije biti predimenzioniran kako ne bi došlo do slom tla i drugi uvjet je slijeganje tla. Najčešće, ako je slijeganje tla zadovoljeno, tada je i nosivost tla zadovoljena, odnosno, temelj je pravilno dimenzioniran i ne dolazi do slijeganja tla.

Kroz rad će se prikazati osnovni pojmovi potrebni za razumijevanje kombiniranog temeljenja te sama primjena kombiniranog temelja s potrebnim proračunima na primjeru strojarnice Elektrane-Toplane Zagreb (ElTo Zagreb). Kombinirano temeljenje je bilo potrebno izvesti za kotao na ispušne plinove, plinsko-turbinski agregat i parno-turbinski agregat. Budući da se navedeni objekt nalazi gotovo u središtu glavnog grada Republike Hrvatske te ima iznimno važnu ulogu snabdijevanja grada toplinskom energijom, problem je bio specifičan zbog strojeva koji se postavljaju na temelje. Samo projektiranje i proračunavanje nosivosti temelja trebalo je zadovoljiti hrvatske norme te u proračunima koristiti odgovarajuće vrijednosti.

# 2. PLITKO TEMELJENJE

Plitki temelji se izvode na dubini koja zadovoljava zadane uvjete slijeganja i nosivosti, a temeljna se stopa nalazi odmah ispod najniže kote građevine. Plitki temelji prenose naprezanja neke građevine svojom dodirnom plohom koja je postavljena na podtemeljno tlo. Osnovni pojmovi plitkog temelja prikazani su na Slici 4.




Slika 4. Osnovni pojmovi plitkog temelja

Plitki temelj definiran je omjerom dvaju osnovnih pojmova, a to su: dubina temelja ($D_f$) i širinom temeljne stope ($B$). Prema Eurocodu 7 (2004) plitkim temeljem smatra se svaki temelj koji ima dubinu temeljenja manju od širine temelja ($D_f < B$). Za plitki temelj najčešće se uzima dubina temeljenja od 3 metara, ali ta dubina može varirati od temelja do temelja, stoga se za odabir dubine moraju razmotriti određeni uvjeti:

- dubina temelja mora dosezati odgovarajući nosivi sloj,
- dubina temelja mora se nalaziti iznad zone stezanja i bujanja gline,
- promjene vremena ili vegetacija ne smiju prouzročiti pomake temelja,
- dubina temelja mora biti ispod dubine smrzavanja tla kako ne bi došlo do oštećenja temelja,
- kod odabira dubine temelja mora se uzeti u obzir i utjecaj podzemne vode i ostali utjecaji koji mogu oštetiti temelj na određenoj dubini.

## 2.1. Podjela plitkih temelja

Plitki temelji opterećenja nastala građevinom iznad temelja prenose u podtemeljno tlo svojom dodirnom površinom, ovisno o obliku temelja. Oblik temelja može biti: oblik stope, trake, roštilja (kombinacija stope i trake) ili oblik ploče. Prema vrsti oblika temelja, plitke temelje dijelimo na: temelje samce, temeljne nosače, temeljne trake i na temeljne ploče.

Temelji samci u tlo prenose opterećenje jednoga stupa. Najčešće se primjenjuju kod tla dobrih kvaliteta ili kod građevina manjih težina. Oblik temelja samca može varirati, pa se tako koriste temelji samci kružnog, kvadratnog, pravokutnog ili višekutnog poprečnog presjeka. Pri armiranju temelj samac može biti izveden kao kruti ili fleksibilni. Najčešće su debljina i širina temelja samca u takvom odnosu da je progib temelja pod naprezanjem opterećenja iznad njega zanemariv u odnosu na slijeganje, odnosno ne dolazi do savijanja temelja te se takvi temelji samci smatraju krutima. Građeni su od armiranog ili ne armiranog betona, dok su se u prošlosti za izradu temelja samaca koristili kameni blokovi ili opeka. Najjednostavniji su i najjeftiniji model temeljenja plitkog temelja.

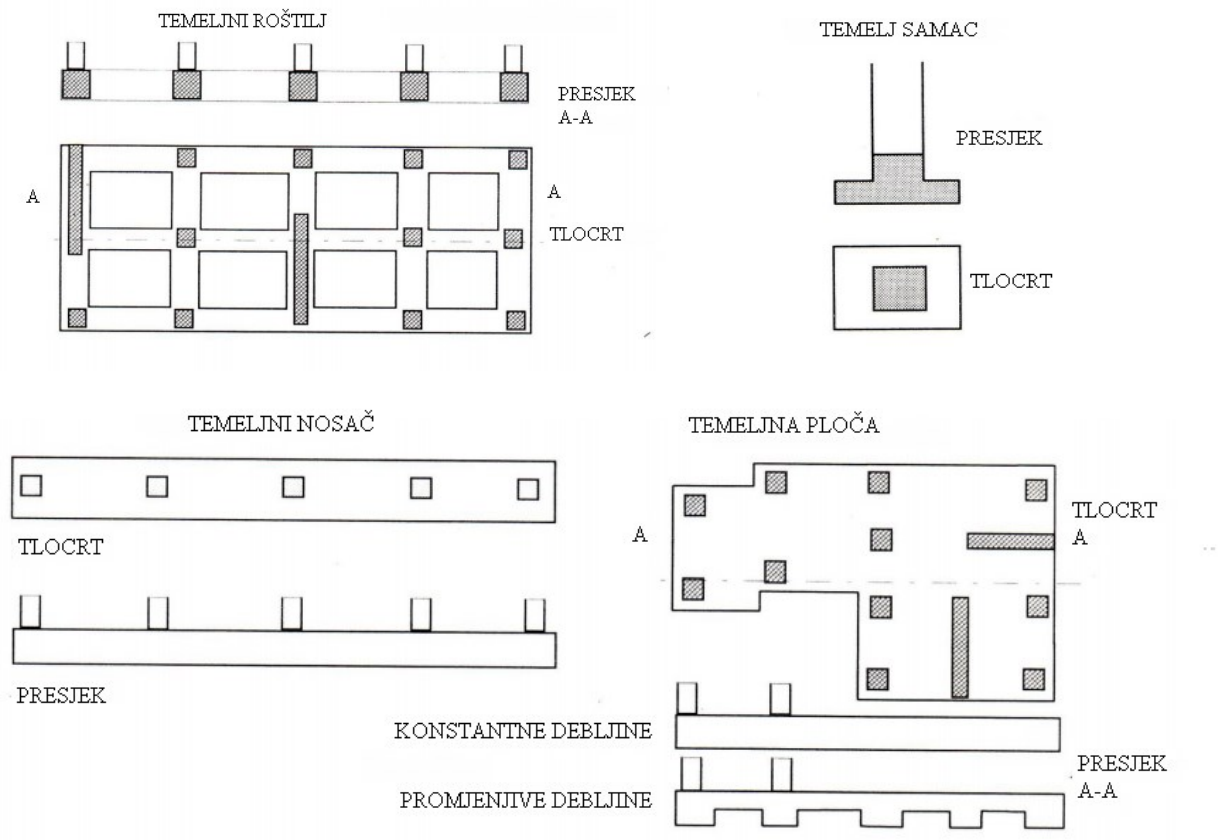
Temeljni nosači prenose opterećenje dva ili više temelja samca ili temeljne trake povezanih u jednu cjelinu. Najčešće podupiru nosive stupove koji su povezane gredom. Pošto nisu ograničeni nosivim zidom ili stupom, projektiraju se kako bi ujednačili neravnomjerna slijeganja uslijed različitih karakteristika tla. Mogu se projektirati i u slučaju kada je građevina koju nose temeljni nosači osjetljiva na neravnomjerna slijeganja, što je najčešći slučaj primjenjivanja ovakvog tipa temeljenja.

Za uporabu takozvanih temeljnih traka moraju se zadovoljavati određeni uvjeti. Naime, opterećenje koje djeluje na temelj mora biti linijsko, odnosno temelj bi trebao nositi zid. Duža strana temelja bi trebala biti dva puta veća od kraće strane ($L>2B$), a kraća strana mora biti savitljivija od duže, osobito ako se u temelj postavlja armatura. Najčešće se, kao i temelji samci, grade od kamena, opeke ili od armiranog ili nearmiranog betona. Temeljne trake prenose opterećenje nosivih zidova u tlo i mogu biti postavljene uzdužno ili poprečno, ovisno o smjeru pružanja zida.

Temeljne ploče prenose opterećenje cijele građevine u tlo, na način da opterećenje raspoređuju od zidova i stupova građevine na veliku površinu, čime smanjuju intenzitet opterećenja. Izvode se ispod cijele površine građevine, najčešće kada je tlo nestabilno, odnosno slabijih karakteristika ili kada je nivo podzemne vode relativno visok. Upravo zbog

neravnomjernih karakteristika tla na kojem je temeljna ploča izvedena, odnosno neravnomjernih slijeganja, temeljne ploče se smatraju savitljivim temeljnim konstrukcijama. Takav tip temeljenja primjenjuje se u slučajevima kada nosivost i krutost tla ne zadovoljavaju izbor nekog od jednostavnijih metoda temeljenja, ranije navedenih. Temeljne ploče su zbog većeg utroška materijala, za razliku od ostalih metoda temeljenja, cjenovno skuplja metoda, no zbog svoje površine temeljenja omogućava veću preraspodjelu naprezanja gornje konstrukcije.

Modernizacijom tehnologije i sve zahtjevnijim građevinskim pothvatima, češće se koriste različite kombinacije temeljenja građevina, po definiranim pravilima i normama. Na Slici 5. shematski su prikazi podjele plitkih temelja te njihovi tlocrti i nacrti.




Slika 5. Shematski prikaz podjele plitkih temelja, s tlocrtima i nacrtima

## 2.2. Temeljna ploča

Temeljna ploča definirana je kao kombinacija temelja koja prekriva čitavu površinu konstrukcije iznad temeljne ploče. Uobičajeno, temeljna ploča se postavlja na poboljšano tlo ili stijensku masu dobrih karakteristika, ali u slučajevima kada tlo nema prihvatljivu nosivost temeljna ploča može biti postavljena na pilote. Temeljna se ploča najčešće koristi u slijedećim slučajevima:

- kad je opterećenje konstrukcije iznad temelja veliko
- kad se u tlu nalaze uslojeni dijelovi koji su podložni slijeganju, a diferencijalno slijeganje se ne može procijeniti
- kad je konstrukcija ili oprema koja se nalazi iznad temeljne ploče osjetljiva na diferencijalna slijeganja
- kad konstrukcija svojim oblikom zahtjeva temeljnu ploču za temeljenje (primjerice, silosi, vodotornjevi, kotlovnice i slično)
- kad razina podzemne vode može naštetiti podrume u zgradama ili drugim građevinama
- u konstrukcijama kojima će pojedini temelj biti izložen velikim naprezanjima, što može dovesti do pretjeranog diferencijalnog slijeganja i ugrožavanja stabilnosti konstrukcije (Gupta, 1997).

## 2.3. Nosivost temeljne ploče prema Eurocodu 7

Prema Eurocodu 7 (2004) kod projektiranja temelja, u ovom slučaju temeljne ploče, potrebno je dokazati da je projektno djelovanje ($E_d$) manje od projektnog otpora ($R_d$), prikazano izrazom:

$$E_d \leq R_d$$

Ovakav pristup određivanju nosivosti temelja nije definiran zakonom, već on ovisi o normama koje su određene u projektnoj dokumentaciji, pa se za pristup određivanja nosivosti temelja mogu koristiti i drugi propisi (Pravilnik 15/90). Ovisno o projektnom pristupu koji se koristi pri izračunu, provodi se množenje ili dijeljenje pojedinih veličina s parcijalnim koeficijentima sigurnosti.

Definiran je izračun za nedrenirano i drenirano stanje. Drenirano stanje dato je izrazom:

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

R - projektni otpor

$c_u$ - nedrenirana posmična čvrstoća

q - minimalno naprezanje na razini stope temelja

$b_c$ - nagib temeljne stope

$s_c$ - oblik temelja

$i_c$ - nagib rezultante uslijed horizontalne sile H

A' - površina temelja

Nedrenirano stanje dato je izrazom:

$$\frac{R}{A'} = c' \times N_c \times b_c \times s_c \times i_c + q' \times N_q \times b_q \times s_q \times i_q + 0.5 \times \gamma' \times B' \times N_\gamma \times b_\gamma \times s_\gamma \times i_\gamma$$

c' - kohezija

q' - efektivno naprezanje na razini stope temelja

$N_\sigma$, $N_q$, $N_\gamma$ – faktori nosivosti

$b_c$, $b_q$, $b_\gamma$ – nagib temeljne stope

$s_c$, $s_q$, $s_\gamma$ – oblik temelja

$i_c$, $i_q$, $i_\gamma$ – nagib rezultante uslijed horizontalne sile H

Prilikom proračuna nosivosti temeljne ploče koriste se računalni programi, najčešće Excel koji nam pojednostavljuje izračun omjera projektnog djelovanja i projektnog otpora.

# 3. DUBOKO TEMELJENJE

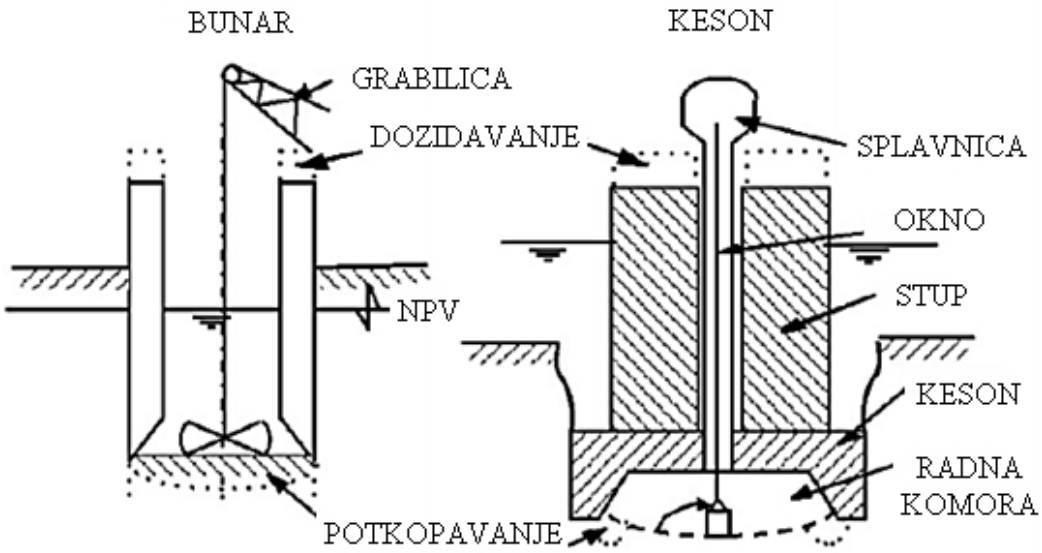
Za razliku od plitkog temeljenja, duboko temeljenje se koristi kada su karakteristike tla na dostupnoj dubini neprihvatljive, odnosno, kada je slaba nosivost i velika stišljivost tla te je u tim situacijama potrebno koristiti dublje slojeve tla s boljim karakteristikama. Dakle, koristi se prilikom složenijih građevinskih zahvata uz korištenje složenih geotehničkih zahvata (Ivandić, 2016). Duboko se temeljenje izvodi postavljanjem tijela, najčešće pilota, koji omogućuju prijenos opterećenja građevine na tlo preko dodirnog pritiska temeljne plohe na tlo i trenjem po plaštu tijela koje je ugrađeno u tlo. Odnosno, to je temeljenje u kojem je dubina temeljenja (*Df*) minimalno četiri puta veća od širine temeljne stope (*B*), ispod najniže kote građevine, a uspravno opterećenje na tlo se prenosi dodirnim pritiskom temeljne plohe te, barem dijelom, trenjem po plaštu tijela ugrađenog u tlo. Jedina su iznimka piloti koji izravno predaju opterećenje na čvrstu podlogu, pri čemu nema pomaka te masivni temelji izvedeni pomoću tehnologije bunara, jer kod njih nije ostvarivo trenje po plaštu. Dodatne razlike plitkih i dubokih temeljenja su i način izvođenja te oblik i dimenzije poprečnog presjeka. S obzirom na složenost potreba i različitih temeljenja, napredovala je i tehnologija za duboko temeljenje, ali su se pojavile i nove vrste dubokog temeljenja.

Prvi primjeri dubokog temeljenja su takozvani šipovi ili piloti, pomoću kojih su ljudi u povijest temeljili sojenice i nastambe, osobito u močvarama i plitkim vodama. Nakon pojave parnog stroja su se pojavili građevinski strojevi na parni pogon, što je omogućilo zabijanje dužih i debljih pilota. Osim toga, čelik i čelične cijevi su postali sastavni dio tehnologije dubokog temeljenja ili kao element temelja ili stroja za temeljenje ili pak kao čelični profili pri izradi dubokog temelja, a zbog pojave prvog kompresora omogućena je izvedba kesona kao tipa masivnog dubokog temelja na principu ronilačkog zvona (Roje-Bonacci, 2008).

## 3.1. Podjela dubokih temelja

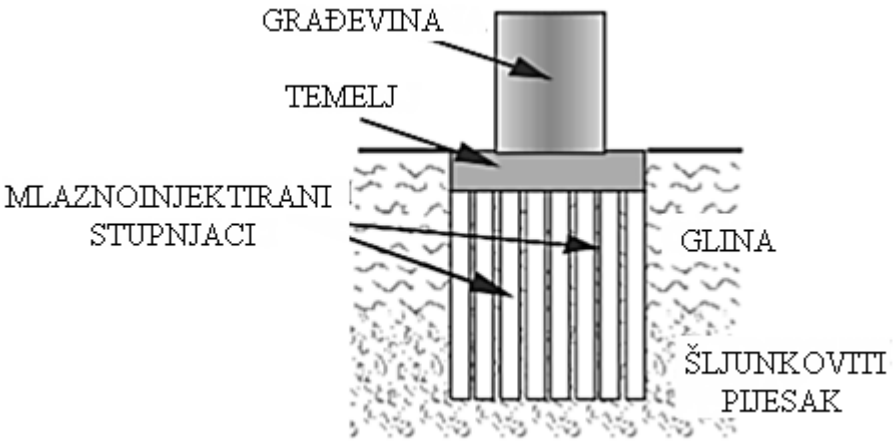
Danas postoji razne vrste dubokog temeljenja, a najznačajnije osnovne grupe dubokog temeljenja su masivni temelji, koji se dijele s obzirom na tehnologiju kojom se izvode na bunare, kesone i sanduke te raščlanjeni duboki temelji, odnosno piloti. Izbor vrste dubokog temeljenja ovisi o mnogo čimbenika, a ponajviše o obliku temelja, prijenosu sila u tlo i kvaliteti podtemeljnog tla.

Duboki masivni temelji su zapravo pojedinačni temelji koji imaju velike tlocrtne dimenzije, a s građevinama čine jedinstvenu cjelinu. Primjer takvih građevina su priobalne građevine, a Slikom 6. su prikazani primjeri bunara, kesona i sanduka, odnosno duboki masivni temelji izvedeni iskopom (Roje-Bonacci, 2008).



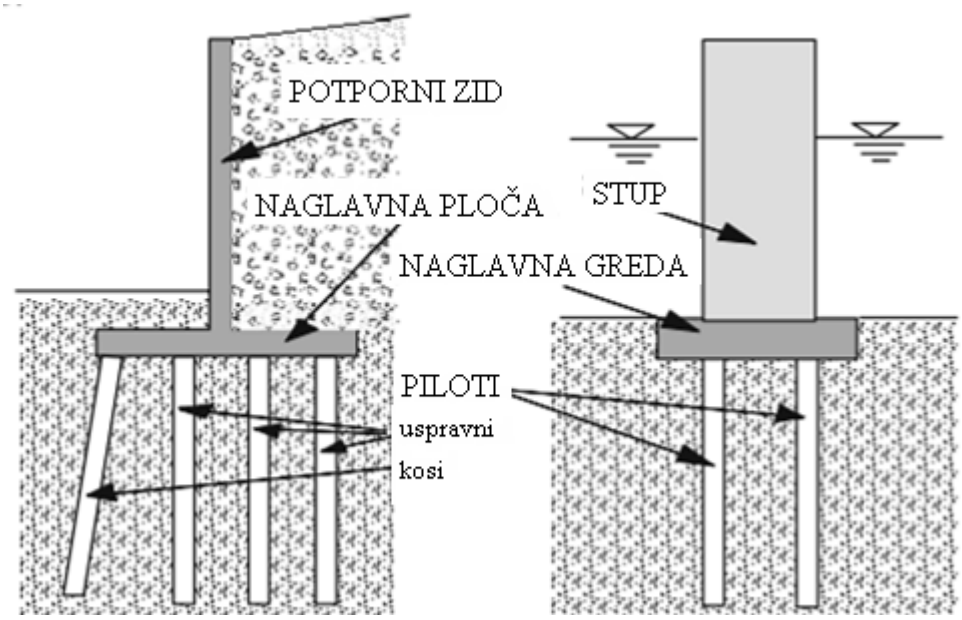

Slika 6. Duboki masivni temelji izvedeni iskopom

Duboki masovni temelji koji nastaju od mlazno injektiranih stupnjaka su prikazani Slikom 7. Ovom se metodom izvodi ojačani masivni blok ispod površine koju je potrebno temeljiti. Injektirani stupnjaci se pretvaraju ili u grupu pilota ili u niz pojedinačnih pilota, pa je nosivost ovakvog bloka zapravo nosivost dubokog masivnog temelja koji nosi na trenje i na dodirnu plohu temelja i tla.



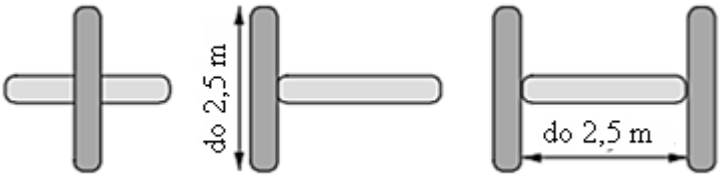

Slika 7. Duboki masivni temelj od mlazno injektiranih stupnjaka

Duboki raščlanjeni temelji ili takozvani piloti (Slika 8.) prenose opterećenje građevine prema principu: jedan pilot – jedan stup, ili se pak s naglavnom konstrukcijom spajaju preko grupe koje prenose opterećenje s građevine preko naglavne konstrukcije na pilote, koji prenose opterećenje u tlo. Piloti imaju najmanji poprečni presjek preko kojeg se prenosi dio tereta.




Slika 8. Piloti = duboki raščlanjeni temelji

Korištenjem nove tehnologije koja se naziva *mixed in place* (MIP tehnologija) stvara se mogućnost određenog tipa dubokog temeljenja, a sve ovisi o obliku podzemnog tijela. O tlocrtnom obliku i rasporedu panela ovise i duboki temelji koji se izvode od elemenata dijafragmi te se procjenjuje hoće li se tretirati kao piloti izduženog tlocrta ili kao duboki masivni temelj, što je prikazano na slijedećoj slici.




Slika 9. Tlocrt oblika dubokih temelja izvedenih tehnologijom dijafragmi i/ili MIP tehnologijom

Zbog već spomenutog napretka tehnologije, istu je tehnologiju moguće koristiti u svrhu temeljenja, ali i poboljšanja temeljnog tla, odnosno, moguće je istu tehnologiju izvedbe primijeniti za različite geotehničke zahvate te tako uštediti. Primjerice, mlazno injektiranje i mikropiloti mogu služiti u obje svrhe, a na stručnjaku koji provodi geotehničke zahvate je da procjeni koja je vrsta temeljenja najisplativija, najadekvatnija, sigurna i stabilna.

Duboka temeljenja je moguće dijeliti i prema stupnju poremećenja okolnog tla, prilikom čega se promatra red veličine poremećenja okolnog tla prilikom same izvedbe dubokog temeljenja te je podjelu moguće primijeniti prilikom izvedbe svih dubokih temelja. Proračune podjela je moguće izračunati s obzirom da je poznato da je trenje po plaštu ovisno o koeficijentu bočnog tlaka ($K_S$), koji varira od koeficijenta aktivnog pritiska ($K_A$), preko koeficijenta tlaka mirovanja ($K_0$), do koeficijenta pasivnog otpora ($K_P$), ovisno o poremećenosti tla prilikom izvedbe dubokog temelja. S obzirom na to, moguće je razlikovati tri vrste dubokog temelja, a to su: duboki temelji koji jako zbijaju okolno tlo, duboki temelji koji malo zbijaju okolno tlo te duboki temelji koji ne mijenjaju gustoću okolnog tla. Kod dubokih temelja koji jako zbijaju tlo, radi se o temeljima i pilotima koji sami imaju značajnu zapremninu, a zbijaju se ili nabijaju u tlo. To su ili drveni ili armiranobetonski prigotovljeni piloti koji imaju promjer između 250 i 450 milimetara, a dužine su do 20 metara ili prednapregnuti armiranobetonski piloti promjera između 400 i 600 milimetara te čelične i betonske cijevi koje su zatvorene na vrhu te nabijeni piloti betonirani na mjestu temeljenja u nabijenoj zatvorenoj cijevi promjera do 600 milimetara. Duboki temelji koji malo zbijaju okolno tlo su najčešće valjani čelični profili u obliku H-profila, cijevi s otvorenim vrhom ili drugi profili koji imaju malu zapremninu te zahtijevaju malo prostora u tlu. U navedenu skupinu spadaju tehnologija mlaznog injektiranja i *mixed in place* tehnologija. Duboki temelji koji ne mijenjaju gustoću okolnog tla su kopani i bušeni piloti te elementi dijafragme, ovisno o načinu prenošenja opterećenja te bunari i kesoni. Oni se izvode sa ili bez zaštite iskopa, nakon čega se ugrađuje neki drugi materijal u izvedeni iskop, najčešće beton.

Ng i drugi (2004, prema Roje-Bonacci, 2008), koji su i odredili već spomenutu podjelu, definirali su i prednosti i mane pojedinih pilota prema stupnju poremećaja okolnog tla. Primjerice, najviše mana imaju piloti kod kojih nema iskopa tla, a tlo je jako poremećeno. Na primjer, ne postoji mogućnost provjere podataka iz istražnih radova, pomaci tla mogu uzrokovati pomake ili oštetiti postojeće instalacije i druge građevine, a vibracije prilikom izvedbe mogu imati nepoželjne učinke na okolinu. Sama izvedba je jako bučna, a nemoguće ju je izvesti na visini, dok teški strojevi zahtijevaju opsežnu pripremu gradilišta na tlu koje je

ionako loše temeljeno. Njihova je prednost što su relativno jeftini te je njihova ugradnja moguća neovisno o razini podzemne vode, a nekoherentno tlo se zbija pri čemu se poboljšava nosivost i krutost. Kad se radi o pilotima bez iskopa tla, a tlo je manje poremećeno, tada je jedina razlika što se ne povećava nosivost zbijanjem nekoherentnog tla, već uzrokuju mnogo manje vibracije i poremećaje u tlu. Mane ovakvog temeljenja su da je moguće oštetiti pilote prilikom izvedbe, ne postoji mogućnost provjere podataka te je nemoguće izvoditi temeljenje na visinskim prostorima, a sama izvedba zahtjeva opsežnu pripremu terena. Kad je riječ o dubokim temeljima i pilotima strojnim iskopom tla, tada ne postoji opasnost poremećaja tla, a samu dužinu pilota je moguće regulirati i prilagoditi. Samim time se mogu postići velike dubine, a buka i trešnja su manje, uspoređujući sa zabijanjem i nabijanjem. Iako je nosivost neovisna o uvjetima izvedbe, moguće je da bude smanjena ili da se okolno tlo slijegne. Ova vrsta temelja je osjetljiva na onečišćenje, a kakvoća ugrađenog betona može se smanjiti s obzirom na količinu podzemnih voda, a moguće ju je provjeriti jedino jezgrovanjem. Uz to, velika mana ove vrste dubokog temeljenja je i povećani trošak, zbog potrebe odlagališta iskopanog materijala.

Kod dubokih temelja i pilota koji su izvedeni ručnim iskopom tla omogućen je neprekidan rad u smjenama, što je ekonomski isplativije. No, takav način rada je nezdrav i rizičan za ljudsku radnu snagu. Ne omogućuju izvedbu velikih dubina, a postoji velika mogućnost deformacije tla i susjednih zgrada nakon spuštanja razine podzemnih voda te mogućnost pojave hidrauličkog sloma (Roje-Bonacci, 2008).

## 3.2. Piloti

Piloti su najstarija vrsta dubokog temeljenja te im je dužina bitno veća od poprečnog presjeka. To su stupovi koji silu s građevine prenose u duboko tlo, odnosno, naglavna konstrukcija prenosi i preraspodjeljuje opterećenje s građevine na pilote, ako su temelji grupirani. Najčešće se izvode na područjima na kojima temeljno tlo nema dovoljnu otpornost ili krutost na manjim dubinama da preuzme prijenos sile, odnosno djelovanje gornje konstrukcije bez većih pomaka ili slomova. Sama dubina pilota određuje se pri ispunjenju zahtjeva prihvatljivih otpornosti i prihvatljivih pomaka.

Piloti se mogu koristiti u raznim uvjetima, a prema Kleiner (1981, prema Roje-Bonacci, 2008) preporuča se korištenje pilota kad je tlo sastavljeno od plastične gline i pijeska ili plastične gline i stijene. Kad je u pitanju rahlo tlo, potrebno je poboljšanje podtemeljnog tla, pa piloti i nisu kvalitetno rješenje, dok piloti nisu potrebni za tlo koje se sastoji od zbijenog pijeska

i gline. Uvjeti korištenja također mogu biti razni, primjerice piloti se mogu koristiti kroz loše tlo u čvrstu stijensku podlogu, bez sudjelovanja trenja po plaštu ili pak dijelom na vrh, a dijelom trenjem po plaštu u homogenom tlu.

Kao što je već navedeno, inženjer je taj koji odlučuje o vrsti temeljenja, a navedeno mora odlučiti temeljem procjene poremećenja na temelje, uvjeta u tlu i lokaciji. Kad procjeni da je korištenje pilota nužno, razmatraju se tehnički uvjeti (uvjeti u tlu, uvjeti opterećenja, uvjeti utjecaja na okoliš, ograničenje lokacije) za odabir vrste pilota, a nakon procjene financijske isplativosti i izvodljivosti, određuje se onaj najadekvatniji prema svim mjerilima.

Pilote je moguće dijeliti prema načinu izvođenja ili s obzirom na materijale. Kada je riječ o podijeli prema načinu izvođenja, tada se naglasak stavlja na tehnologiju i moguće ga je povezati s općenitom podjelom dubokog temeljenja. Piloti koji koriste klasičnu tehnologiju dijele se na zabijene, utisnute i kopane pilote, a kad su malog promjera izvode se kao zabijeni, nabijeni, utisnuti i svrdlani te prilikom izvedbe izazivaju zbijanje tla u prostoru. Kada se radi o većim promjerima koriste se kopani piloti, koji se kopaju bez ili pod zaštitom bentonitne isplake ili kolone. Pod zaštitom bentonitne isplake koriste se i piloti pravokutnog poprečnog presjeka koji spadaju u elemente dijafragmi, prilikom kojih se ne zbija okolno tlo (Roje-Bonacci, 2008).

Nova vrsta pilota su stupnjaci koji su se razvili zbog metode mlaznog injektiranja, a izvedeni su u prethodno razbijenom tlu u koje se ugrađuje vezivno sredstvo pod pritiskom, čime se dobiva čvrsto tijelo nepravilnog vanjskog ruba. Stupnjaci koji su izvedeni od autohtonog tla pomiješanog s veznim sredstvom stvaraju se metodom *mixed in place*, a piloti se često koriste i za temeljenje u vodi.

U podijeli pilota s obzirom na vrstu materijala, piloti se dijele na drvene, čelične, armirano-betonske, šljunčane, sastavljene od kombiniranih materijale i od mješavine tla i veziva (Roje-Bonacci, 2008).

Drveni piloti su najstarija vrsta pilota, no važno je postavljati ih ispod razine podzemne vode kako bi se spriječilo njihovo trunjenje. Velika mana čeličnih pilota je korozivnost, pa se ne preporučuju kao trajno rješenje temelja. Mogu biti različitih oblika i samim time imati različiti utjecaj na tlo, pa primjerice cijevi otvorenog tipa prilikom zabijanja vrše vrlo mali poremećaj okolnog tla, dok cijev zatvorenog vrha zbija tlo.

Armirano-betonski su zamjena za drvene pilote, a s razvojem tehnologije su promijenili oblik te im je danas poprečni presjek pravokutan. Mana ovih pilota je njihova dužina, no njihovim se korištenjem postiže standardizirana kakvoća. Armirano-betonskim pilotima koji su

izvedeni na licu mjesta moguće je prilagoditi dužinu ovisno o terenu. Nastaju različitom tehnologijom, o čemu i ovisi način ugradnje betona (kontraktor postupak ili ugradnja suhog betona u otvoru izvedenom u tlu). Sam prostor se izvodi nabijanjem, zabijanjem, bušenjem i kopanjem. Betonski piloti koji su izvedeni na licu mjesta nemaju armaturu te se najčešće koriste u grupi kao poboljšanje temeljnog tla (Roje-Bonacci, 2008).

Šljunčani piloti služe kao poboljšanje temeljnog tla, a izvode se nabijanjem šljunka u tlo na licu mjesta, a takva metoda poboljšanja naziva se vibrozamjena tla. Koriste se u koherentnim i u nekoherentnim materijalima s visokim udjelom čestica. Njihova glavna svrha je zbijanje okolnog tla, a uz to ubrzavaju proces konsolidacije i djeluju kao uspravni drenovi. Neadekvatna primjena ovih pilota može prouzročiti smanjenje efektivnog naprezanja i povećanje pornih pritisaka, što negativno utječe na poboljšanje uvjeta u tlu. Ugradnjom šljunčanih pilota nastaje kompozitni sustav koji je veće gustoće, čvrstoće i stišljivosti, a u materijalima niske vodopropusnosti dolazi do ubrzanog procesa konsolidacije (Dodigović, 2018).

Piloti od kombiniranih materijala, kako im i samo ime govori, nastaju kombinacijom različitih materijala, najčešće betona i čelika, ali i plastičnih cijevi, metalnih umetaka i betonske ispune. Kao takvi se najčešće koriste kod mikropilota, a kod malih profila se pune smjesom za injektiranje. Miješanjem tla i veziva nastaju piloti od mješavine, koji su zapravo mlazno injektirani stupnjaci i piloti izvedeni *mix in place* tehnologijom. Ovi piloti su vodonepropusni ako se ugrađuju u kontinuiranu stijenku i koriste se za izvedbu zaštite građevnih jama (Roje-Bonacci, 2008).

### 3.2.1. Proračun pilota

Vanjsko opterećenje koje djeluje na pilot sačinjeno je od vertikalne sila, horizontalne sila i sile momenta. Piloti u tlu mogu biti postavljeni kao slobodan pilot, koji je opterećen iznad razine terena ili koji je opterećen u visini terena te piloti koji su fiksirani krutom naglavnicom, a tada govorimo o grupi pilota. Najčešće se opterećenje pilota događa u razini površine terena i tada se primjenjuje odvojena analiza opterećenja pilota. Analiza uzdužnog opterećenja pilota provodi se na način da se analizira nosivost pilota bez deformacije tla. Analiza poprečno opterećenog pilota je složenija, budući da se određuje deformacijska linija pilota u interakciji s tlom (Ivandić, 2016).

### 3.2.1.1. Pilot opterećen vertikalnom silom

Kada se pilot optereti vertikalnom silom nužno je odrediti nosivost pilota. Nosivost pilota ($Q_u$) sastoji se od dvije komponente koje nastaju uslijed pružanja otpora vertikalnoj sili. Prva komponenta je nosivost pilota po plaštu ($Q_{pl}$) nastala aktivacijom trenja na plaštu pilota, a druga komponenta je nosivost pilota na stopi ($Q_s$) nastala slomom na stopi pilota. Izraz koji se koristi kod ukupne nosivosti pilota ($Q_u$) glasi:

$$Q_u = Q_{pl} + Q_s$$

Pošto svaki pilot ima vlastitu težinu, od ukupne nosivosti treba oduzeti vlastitu težinu pilota ($W$) kako bi se mogla odrediti sila kojom je dozvoljeno opteretiti glavu pilota te se time definira neto nosivost pilota ($Q_{nu}$). Izraz za dopuštenu nosivost pilota glasi:

$$Q_{nu} = Q_u - W$$

Kako su piloti postavljeni u tlo koje je različito uslojeno, potrebno je odrediti geotehnički profil tla s odgovarajućim parametrima tla. Temeljem toga se nosivost pilota po plaštu nekog sloja *i,* kroz koji je pilot postavljen, određuje preko površine plašta pilota ($A_{pl}$) i aktiviranog posmičnog naprezanja ($\tau_i$) na kontaktu pilota i okolnog tla. Poprečni presjek pilota najčešće je kružnog presjeka, pa izraz za nosivost pilota po plaštu kroz neki sloj *i* glasi:

$$Q_{pli} = d \times \pi \times \tau_i \times h_i$$

$h_i$ – definira debljinu sloja *i* na kojem djeluje konstantno posmično naprezanje ($\tau_i$)

Ukupna nosivost po plaštu jednaka je sumi nosivosti, prikazana slijedećim izrazom:

$$Q_{pl} = \sum_{i=1}^{n} Q_{pli}$$

Proračun specifične nosivosti pilota (po $m^2$ površine poprečnog presjeka pilota) dan je izrazom:

$$Q_s = c \times N_{cr} + q_0 \times K_0 \times N_{qr} + 0.5 \times d \times \gamma \times N_{\gamma r}$$

c - kohezija

$q_0$ - vertikalno naprezanje na razini stope pilota

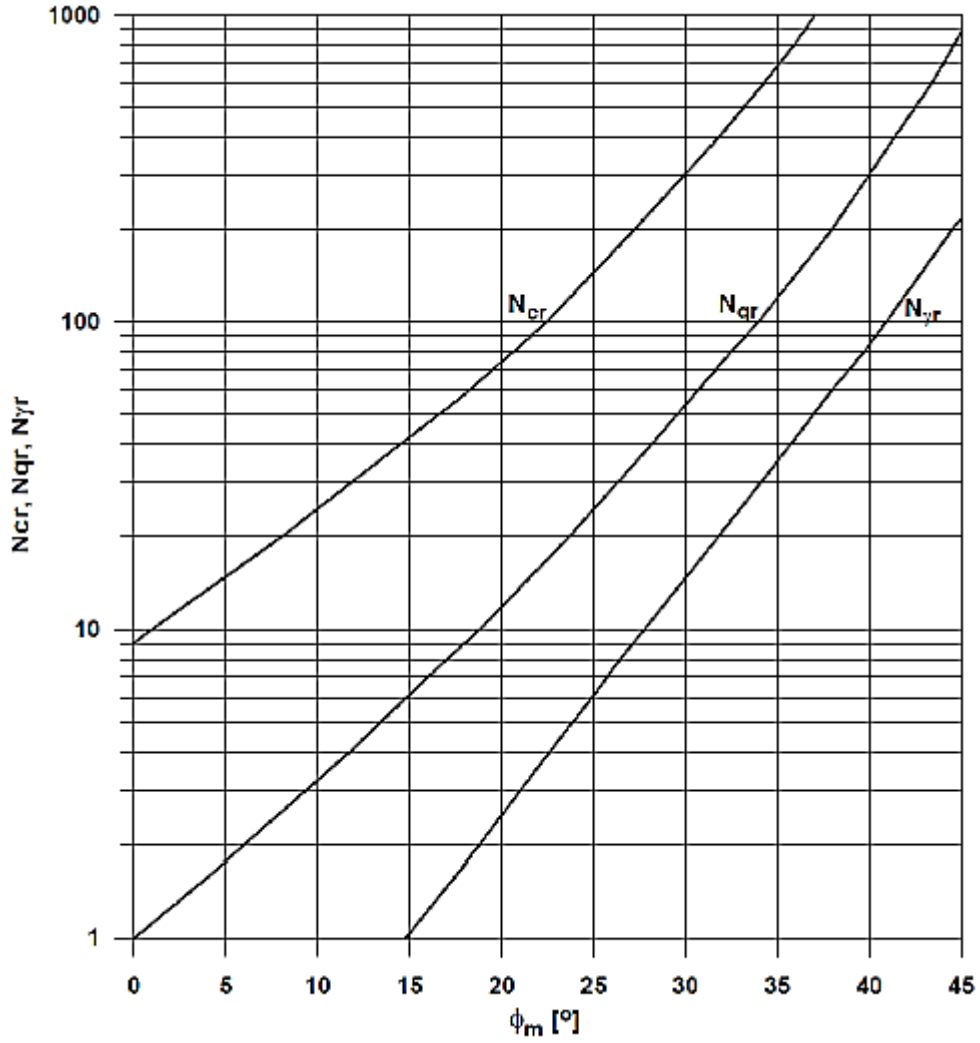
$N_{cr}$, $N_{qr}$, $N_{\gamma r}$ – koeficijenti nosivosti pilota

$K_0$ - koeficijent mirnog pritiska tla

d - promjer pilota

$\gamma$ - zapreminska težina tla

Slikom 10. je prikazan dijagram koeficijenata nosivosti pilota, $N_{cr}$, $N_{qr}$, $N_{\gamma r}$ , prema Meyerhofu, za normalno konsolidirano tlo u nivou stope pilota.



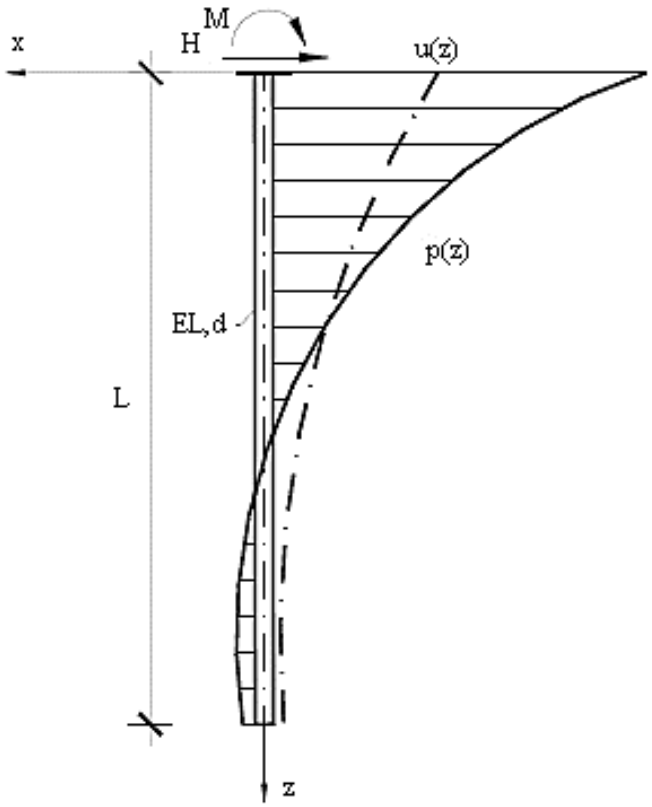

Slika 10. Faktori nosivosti prema Mayerhofu

Slika 10. prikazuje dijagram kojim je Mayerhofer prikazao faktore nosivosti pri proračunu nosivosti temelja u tlu preko mobiliziranog kuta unutrašnjeg trenja.

### 3.2.1.2. Pilot opterećen horizontalnom silom

Osim problema vertikalnog naprezanja, posebnu pažnju treba obratiti na horizontalno opterećen pilot. Takav pilot je opterećen na vrhu, odnosno glavi pilota te je zbog navedenog uvjeta analiza homogenog dijela diferencijalne jednadžbe pojednostavljena. Treba napomenuti da rubni uvjeti za nalaženje nepoznatih konstanti mogu biti kombinacija upetog i/ili slobodnog pilota na glavi i stopi. Rubni uvjeti koji će biti prikazani odnosit će se na upeti pilot, zbog problematike kombiniranog temeljenja (temeljna ploča-piloti). Slikom 11. je prikazan

shematski prikaz problematike horizontalno opterećenog vertikalnog pilota, gdje su *M* i *H* oznake momenata i vertikalne sile koje djeluju na glavu pilota, *EL* označava krutost pilota na savijanje (*E* označava modul elastičnosti pilota, a *I* moment inercije pilota) te je ono najčešće konstantno cijelom dužinom pilota, *d* označava promjer pilota, *L* duljinu pilota. Funkcija *u(z)* označava nepoznatu funkciju pomaka pilota u smjeru djelovanja horizontalnog naprezanja, a funkcija *p(z)* označava nepoznatu funkciju reaktivnog pritiska tla.




Slika 11. Horizontalno opterećen vertikalni pilot

Izraz diferencijalne jednadžbe problema za pilote konstantnog poprečnog presjeka gdje je krutost pilota na savijanje (*EL*) konstantno glasi:

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

Ako se analiza problema provodi na jednoparametarskom modelu tla (Winkler-ov model) tada vrijedi izraz:

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

Winkler-ov koeficijent ili koeficijent reakcije tla ($k$ [$kN/m^3$]), predstavlja krutost tla, to jest, definira se kao opterećenje površine tla po $m^2$ koje daje jediničan pomak.
Tada izraz za diferencijalnu jednadžbu jednoparametarskog modela tla glasi:

$$\mathrm{EL}\frac{\mathrm{d}^4\mathrm{u(z)}}{\mathrm{dz}^4} + \mathrm{k} \times \mathrm{u(z)} = 0$$

Opće rješenje diferencijalne jednadžbe jednoparametarskog modela tla glasi:

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

gdje je:

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{k \times d}{4 \times EL}}$$

Rješenje jednadžbe prikazuje linearnu superpoziciju umnoška eksponencijalnih i trigonometrijskih funkcija. Zaključuje se da numeričke vrijednosti članova uz nepoznate konstante $C_1$ i $C_2$ rastu s dubinom zbog eksponencijalnog dijela izraza. Za duge pilote (omjer duljine i promjera $L/d > 10$) nije fizikalno prihvatljivo da pomak raste što je veća dubina pilota, čime se dio općeg rješenja uz konstante $C_1$ i $C_2$ zanemaruje, a pilot tretira kao polubeskonačan dvama rubnim uvjetima na glavi pilota. Takvim uvjetom izraz za funkcije pomaka glasi (zbog jednostavnosti zapisa, $C_3$ i $C_4$ iz općeg rješenja pišemo $C_1$ i $C_2$):

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

Pripadne derivacije diferencijalne jednadžbe jednoparametarskog tla općeg rješenja dane su slijedećim izrazima:

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

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

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

Funkcija momenta savijanja:

$$M(z) = -ELu''(z) = 2EL\alpha^2 e^{-\alpha z}(C_2 cos\alpha z - C_1 sin\alpha z)$$

Funkcija poprečnih sila duž pilota:

$$T(z) = -ELu'''(z) = 2EL\alpha^3 e^{-\alpha z}[(C_1 - C_2)sin\alpha z - (C_1 + C_2)cos\alpha z]$$

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*):

Rubni uvjeti za upeti pilot:

1) $M(0)=M0 \rightarrow -C_1+C_2 = 0 \rightarrow C_1 = C_2$

2) $T(0)= H_0 \rightarrow C_1+C_2 = -H_0 / 2EL\alpha^3$

Rješenje sustava rubnih uvjeta za upeti pilot glasi:

$$C_1 = C_2 = -\frac{H_0}{4\alpha^3 EL}$$

Uvrštavanjem konstanti u pripadne derivacije dobije se izraz za funkciju pomaka, kuta zaokreta i moment savijanja. Izrazi su slijedeći:

Funkcija pomaka:

$$u(z) = -\frac{H_0}{4\alpha^3 EL} e^{-\alpha z}(cos\alpha z + sin\alpha z)$$

Kut zaokreta:

$$u'(z) = \frac{H_0}{2\alpha^2 EL} e^{-\alpha z} sin\alpha z$$

Moment savijanja:

$$M(z) = -ELu''(z) = \frac{H_0}{2\alpha} e^{-\alpha z}(cos\alpha z - sin\alpha z)$$

Kada je pilot upet u naglavnu konstrukciju javlja se moment upetosti pilota ($\dot{M}$) koji se može izvesti iz izraza za moment savijanja, a izraz je slijedeći:

$$M(0) = \dot{\mathrm{M}} = \frac{H_0}{2\alpha}$$

Korištenjem izraza za funkciju pomaka duž pilota moguće je dobiti krutost pilota na horizontalni pomak, slijedećim izrazom:
Za z = 0 vrijedi:

$$u(0) = u_0 = -\frac{H_0}{4\alpha^3 EL}$$

Krutost pilota ($K$) definirana je kao sila potrebna za jediničan pomak, a izraz glasi:

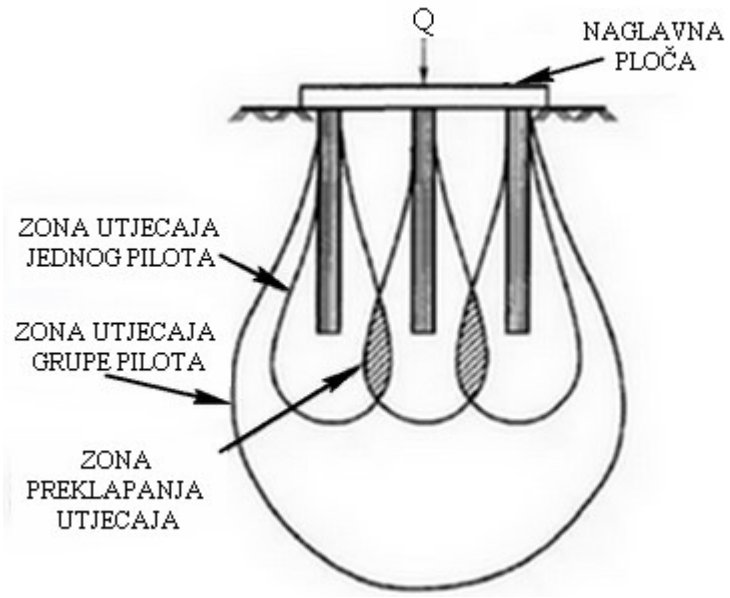
$$u_0 = 1 = \frac{K}{4\alpha^3 EL}$$

$$K = 4\alpha^3 EL$$

## 3.2.2. Proračun nosivosti grupe pilota

U praksi se rijetko pojavljuje temeljenje samo jednim pilotom. Najčešće se temeljenje događa na grupi pilota koji su povezani naglavnom pločom, a tada je riječ o kombiniranom ili hibridnom temeljenju.

U takvom sustavu pilota i naglavne konstrukcije koja ih povezuje, svaki pilot ima zonu prijenosa opterećenja u tlo. U slučajevima kada je osni razmak između pilota koji su povezani naglavnom konstrukcijom mali, dolazi do preklapanja zona nosivosti pojedinih pilota te je time nosivost grupe pilota manja od zbroja nosivosti pojedinačnog pilota. Slika 12. prikazuje zone prijenosa naprezanja kod grupe pilota s naglavnom konstrukcijom.




Slika 12. Zone utjecaja grupe pilota

Osni razmak grupe pilota ($s$) najčešće se izražava preko promjera ili duljine pilota. U svrhu zadovoljenja ekonomičnosti i funkcionalnosti grupe pilota u idealnoj situaciji, piloti bi trebali biti postavljeni na takvom razmaku da omogućavaju potpunu nosivost svakog pojedinog pilota. Idealna situacija ne postoji, pa je nemoguće odrediti jedan optimalan razmak koji bi vrijedio za sve slučajeve.

Nosivost grupe pilota ($Q_g$) može se iskazati preko izraza:

$$Q_g = Q_u n \eta$$

$Q_s$ - nosivost pojedinačnog pilota

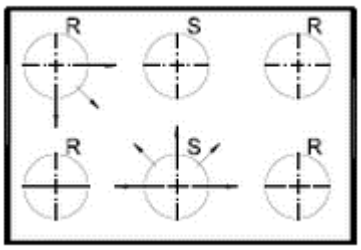
n - broj pilota u grupi

η - koeficijent redukcije za nosivost grupe, dan je izrazom:

$$\eta = \frac{nosivost\ pojedinačnog\ pilota\ u\ grupi}{nosivost\ pojedinačnog, izoliranog\ pilota}$$

Ovaj omjer naziva se još i efikasnost grupe pilota.

Najprimjenjivije pravilo u literaturi je takozvano Feldovo pravilo za proračun nosivosti grupe pilota. Prema Feldu (1943, prema Ivandiću, 2016), nosivost pojedinog pilota u grupi smanjuje se za 1/16 za svaki susjedni pilot. Slikom 13. prikazana je grupa od šest pilota od kojih su četiri rubna (*R*) i dva središnja pilota (*S*).




Slika 13. Nosivost grupe pilota

Koeficijent redukcije nosivosti za slučaj prikazan na slici prema Feldovom pravilu glasi:

$$\eta = \frac{suma\ koeficijenata\ redukcije\ nosivosti}{m \times n}$$

m,n - broj redova, stupaca grupe pilota

$$\eta = \left(\frac{13}{16} \times 4 + \frac{11}{16} \times 2\right) \times \frac{1}{6}$$

Istraživanja nosivosti grupe pilota ovise o različitim parametrima kao što su: način izvedbe pilota, raspored i broj pilota, duljina pilota, osni razmak, prisustvo naglavne ploče, vrsta

i uslojenost tla, način opterećivanja i ostalo. Stoga brojni autori na različite načine rješavaju problem nosivosti grupe pilota, uz napomenu da je pri projektiranju u obzir potrebno uzeti empirijske vrijednosti, rezultate istraživanja te iskustvo projektanta.

# 4. GEOTEHNIČKI MODELI TLA

Određivanjem geotehničkog modela tla na temelju osnovnih parametara temeljnog tla omogućuje se prikaz približnog stanja tla koje se nalazi u prirodi. Definiranjem stvarnog stanja naprezanja u tlu omogućeno je sigurnije dimenzioniranje temelja buduće konstrukcije. Kod projektiranja temelja jedna od važnijih karakteristika je određivanje raspodjela naprezanja na kontaktu temeljne plohe i tla. Dimenzioniranjem temelja u inženjerskoj praksi najčešće se pretpostavlja ravnomjerna raspodjela naprezanja na kontaktu temelja i tla, ali u stvarnosti je preraspodjela drugačija. Odnosno, na rubovima i u središtu temelja naprezanja su veća. Povećanjem plohe temeljenja, odnosno temeljenjem na temeljnoj ploči, preraspodjela naprezanja na kontaktu temeljne ploče i tla može biti ravnomjerna, pri čemu se dimenzionira temeljna ploča konstantne debljine ili može biti ojačana i drugačije debljine na području koncentriranog naprezanja. Kako bi se temeljna ploča proračunala zadovoljavajućom točnošću, potrebno je poznavati stvarna naprezanja na kontaktu temeljne ploče i tla. Takav proračun je moguć ako se pravilno odredi geotehnički model tla na kojemu se temelji. Važno je napomenuti kako geotehnički model tla ovisi o velikom broju parametara koji su određeni *in situ* ispitivanjima, numeričkim proračunima, laboratorijskim ispitivanjima i slično. Najstariji način opisivanja ponašanja tla je modeliranje tla nezavisnim oprugama konstantne krutosti ili takozvani Winkler-ov model. Ovaj model je do sada najprimjenjivaniji u praksi zbog svoje jednostavnosti te velikog iskustva u primjeni modela na različitim inženjerskim problemima. Drugi način modeliranja tla u proračunima poprečno opterećenih pilota je model tla kao elastičnog kontinuuma. Rješenja takvog tipa bazirana su na Mindlin-ovom rješenju djelovanja koncentrirane sile u elastičnom poluprostoru. Zadnji način modeliranja tla je analiza metodom konačnih elemenata, gdje se diskretizacijom pilota omogućuje točnije modeliranje problema interakcije pilota i tla (Ivandić, 2016).

## 4.1. Winkler-ov model tla

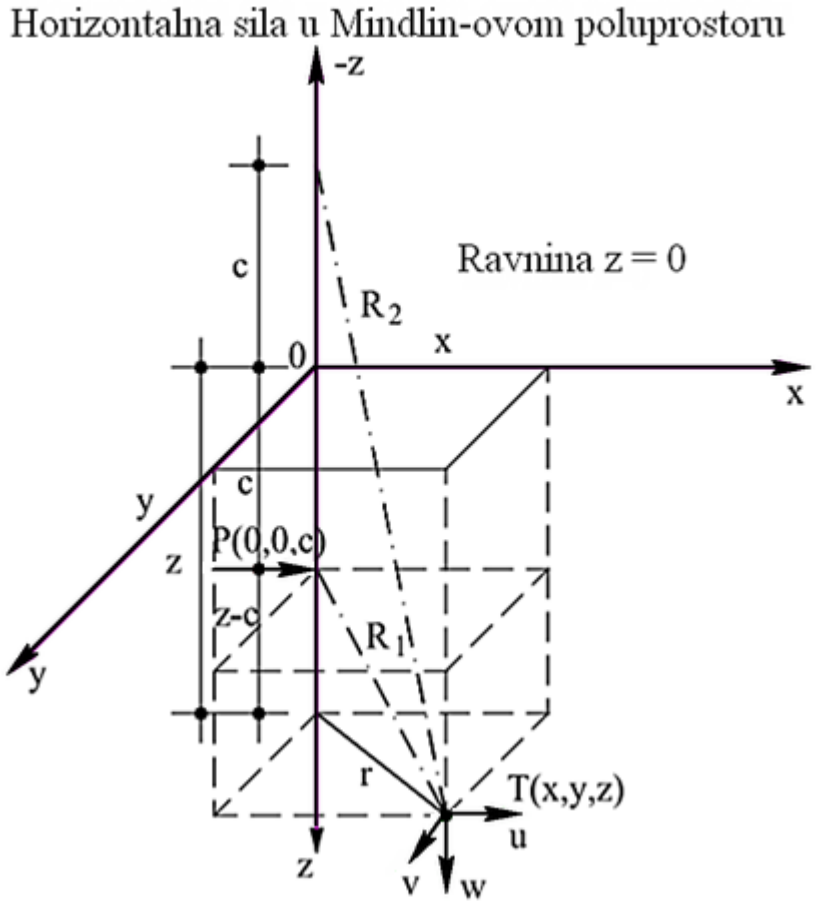
Winkler-ov model tla prikazuje dodatnu vezu u jednostavnoj vezi između nepoznatih funkcija pomaka $u(z)$ i reaktivnih pritisaka $p(z)$, u svrhu rješavanja rubnih problema, u zatvorenom obliku. Radi se zapravo o Winkler-ovom jednoparametarskom modelu, koji ima konstantan koeficijent reakcije tla po dubini (Ivandić, 2016).

## 4.2. Model tla kao elastičan kontinuum

Kod modela tla kao elastičnog poluprostora, proračune je nemoguće izraziti u zatvorenom obliku, zbog složenosti veze nepoznatih funkcija pomaka i reaktivnih pritisaka. Navedeno je prikazano slijedećom jednadžbom:

$$u = \frac{P}{16\pi G(1-v)}\left\{\frac{3-4}{R_1}+\frac{1}{R_2}+\frac{x^2}{R_1^3}+\frac{(3-4v)x^2}{R_2^3}+\frac{2cz}{R_2^3}\left(1-\frac{3x^2}{R_2^2}\right)\right.$$
$$\left.+\frac{4(1-v)(1-2v)}{R_2+z+c}\left[1-\frac{x^2}{R_2(R_2+z+c)}\right]\right\}$$

Slikom 14. je prikazano djelovanje horizontalne sile u Mindlino-vom poluprostoru. Proračuni koji što stvarnije prikazuju ponašanja tla su iznimno složeni, a upravo je Mindlin-ov model poluprostora jedan od najsloženijih i najčešće korištenih modela (Ivandić, 2016).



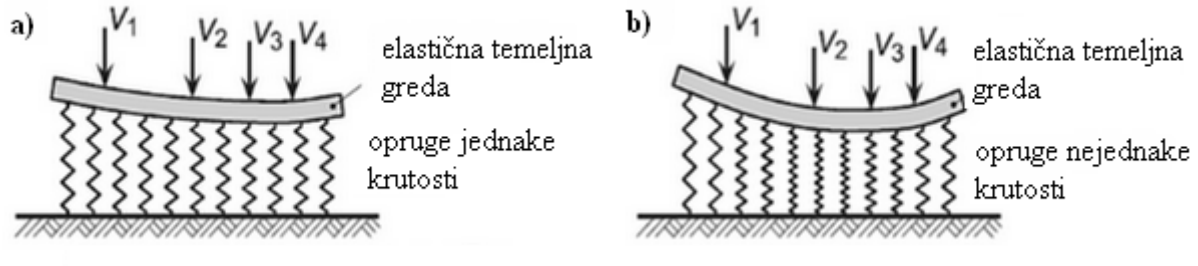

Slika 14. Prikaz tla kao elastičnog poluprostora

## 4.3. Model tla analiziran metodom konačnih elemenata

Model tla s ravnomjernom preraspodjelom naprezanja na kontaktnoj plohi je najčešće korišten model u inženjerskoj praksi i daje relativno praktična rješenja za većinu problema, osim kad su u pitanju manje krute, odnosno mekane ploče. Naime, linearna preraspodjela napona pretpostavlja nepromjenjivu geometriju poprečnog presjeka i krutosti te je zbog toga moguće primijeniti tehničke teorije savijanja. Uz to se zanemaruju utjecaji promjene oblika tla i temelja, kao i njihova interakcija (Hofer, Perić, 2017).

Budući da se tlo najčešće modelira oprugama koje imaju jednaka elastična svojstva, moguće je izračunati proporcionalnost pomaka i sile, uz poznavanje geotehničkih podataka ili se slijeganje može pretpostaviti temeljem iskustva. Tako se stvara model tla koji se definira kao serija međusobno nepovezanih elastičnih opruga jednakih svojstava, a budući da opruge međusobno djeluju jedna na drugu, nemaju ista elastična svojstva (Slika 15). Ako su poznati naponi na temeljnoj spojnici sam modul reakcije tla koji predstavlja krutost elastične opruge izračunava se:

$$\sigma_0 = k_s \times z$$




Slika 15. Model tla opisan elastičnim oprugama

Model tla koji uzima u obzir različitu krutost slojeva tla u poluprostoru ispod temelja baziran je na linearno elastičnom modelu i u obzir uzima utjecaj napona susjednih ploha na stanje napona i slijeganja promatrane lokacije. Dakle, ovaj model u obzir uzima činjenicu da se svojstva tla mijenjaju s dubinom, a slijeganja ovise i o težini objekta i stupnju konsolidacije, a pri računanju glavni parametri su Young-ov modul elastičnosti ($E_{oed}$) i Poisson-ov koeficijent ($v$) (Hofer, Perić, 2017).

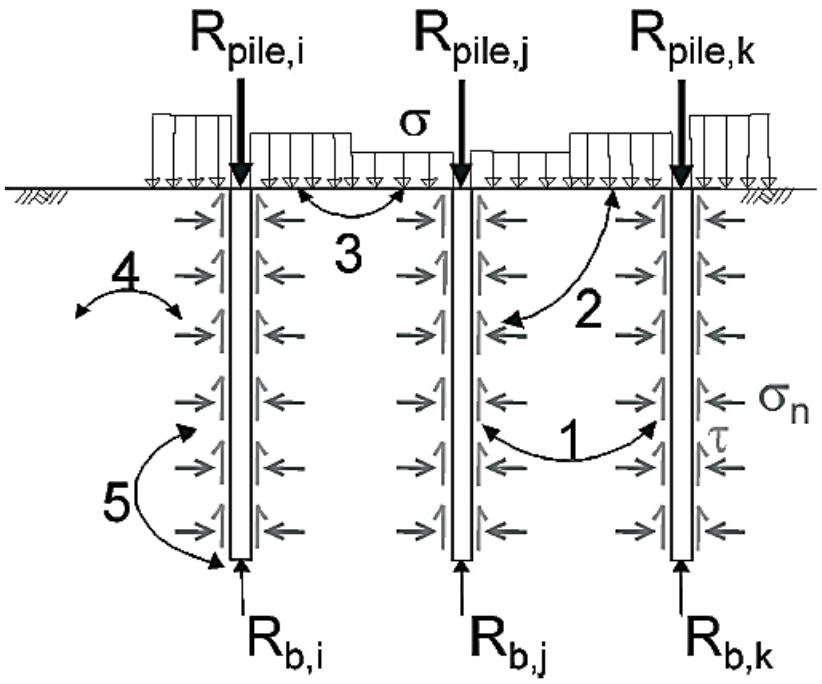
Napredni modeli tla u obzir uzimaju konsolidacijsko stanje, sadržaj vode, intenzitet opterećenja, razinu nanošenja naprezanja i slično. S obzirom na to da u obzir uzimaju veći broj parametara, moguće je razviti modele koji kvalitetno opisuju interakciju temeljnog tla i građevine, a definirani su u programima koji su razvijeni specifično za rješavanje geotehničkih zahvata (primjerice PLAXIS) (Hofer, Perić, 2017).

# 5. KOMBINIRANO TEMELJENJE

Kombinirano temeljenje je kombinacija plitkog i dubokog temeljenja, kako bi se postigla tehnička i financijska optimizacija, kada lokalni geotehnički uvjeti tla nisu pogodi za korištenje samo plitkog ili samo dubokog temeljenja. Kombinirani temelj se definira kao kompozitna geotehnička konstrukcija sastavljena od temeljne ploče, pilota i temeljnog tla, čija je nosivost definirana međusobnom interakcijom svake pojedinačne sastavnice. Glavni cilj ove konstrukcije je povećati kapacitet nosivosti temelja, smanjiti duljine i broj pilota te smanjiti ukupne deformacije i slijeganja, odnosno utjecaje savijanja na temeljnu konstrukciju (Hofer, Perić, 2017).

Velika prednost kombiniranih temelja je da temeljna ploča osigurava dodatni kapacitet pri krajnjem opterećenju te je, osim smanjenja broja pilota, osigurana i moguća potrebna preraspodjela opterećenja, ako neki od pilota izgubi svojstvo, odnosno bude neispravan ili slabije nosivosti zbog nekvalitetnih uvjeta ispod zemlje. Najučinkovitija primjena kombiniranog temelja je kad temeljna ploča sama po sebi osigurava potrebni kapacitet opterećenja, ali i sami dijelovi prekoračuju dopuštene vrijednosti. Što se tiče vrste tla, autor Poulos (2001, prema Poulos i dr., 2011) nakon ispitivanja raznih profila tla navodi da su za kombinirano temeljenje najadekvatniji profili tla koji se sastoje od relativno krute gline ili relativno krutog pijeska, budući da temelji u takvim profilima tla omogućuju potrebnu nosivost i krutost te djeluju na pojačavanje performansi temelja.

Mana ovakvog modela temeljenja je što osim pojedinačnih elemenata, dakle temeljne ploče i svakog pilota za sebe, i sama interakcija elemenata stvara dodatno opterećenje i pritisak, koje je potrebno predvidjeti u konačnim proračunima (Poulos i dr., 2011). Na Slici 16. prikazana je shematska interakcija kombiniranog temelja.




Slika 16. Shematski prikaz međudjelovanja kod kombiniranog temeljenje temeljna ploča – pilot

Na Slici 16. prikazana su sva međudjelovanja koja se javljaju kod kombiniranog temeljenja, a to su:

1 – međudjelovanje pilota i pilota,

2 – međudjelovanje pilota i ploče,

3 – međudjelovanje ploče i ploče,

4 - međudjelovanje pilota i tla,

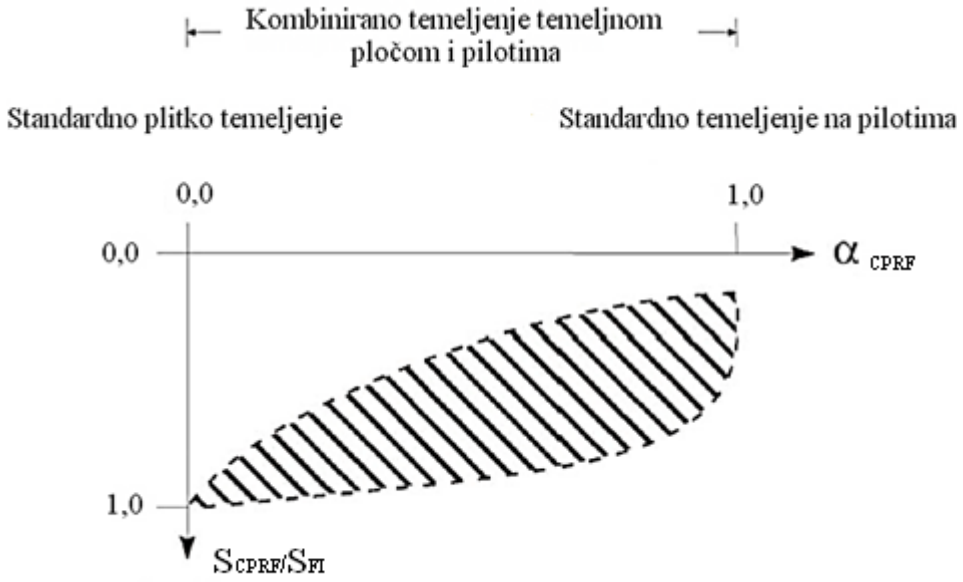
5 – međudjelovanje baze pilota i plašta pilota.

Prijenos vertikalnog opterećenja građevine, odnosno vrijednost kapaciteta ukupne nosivosti $R_{tot}$ u podtemeljno tlo, je suma kapaciteta nosivosti temeljne ploče ($R_{raft}$) i sume kapaciteta nosivosti svih pilota ($R_{pile,i}$), što je vidljivo iz slijedeće jednadžbe:

$$R_{tot} = \sum R_{pile,i} + R_{raft}$$

Sama učinkovitost kombiniranog temeljenja, odnosno takve konstrukcije, se izražava koeficijentom $\alpha_{CPRF}$ (*CPRF-combine pile-raft foundation*), koji ovisi o razini opterećenja i slijeganja, a leži između granica plitkog (0) i dubokog (1) temeljenja na pilotima, što je prikazano Slikom 17. Samim koeficijentom se označuje udio djelovanja pilota u ukupnom kapacitetu nosivosti same konstrukcije, a izražava se slijedećom jednadžbom (Katzenbach, 2013, prema Hofner, Perić, 2017):

$$\alpha_{CPRF} = \frac{\sum R_{pile,i}}{R_{tot}}$$




Slika 17. Prikaz mogućeg smanjenja slijeganja u ovisnosti o $\alpha_{KPP}$

## 5.1. Dimenzioniranje kombiniranog temeljenja

Kao što je već navedeno, kombinirano temeljenje se izvodi u svrhu smanjenja diferencijalnih slijeganja i deformacija uz povećanje nosivosti temeljne konstrukcije te je pri dimenzioniranju važno proučiti interakciju samog tla, temeljne ploče i pilota.

Prilikom izgradnje visokogradnje potrebno se osvrnuti na nekoliko važnih pitanja. Prvo pitanje je pitanje ukupnog kapaciteta temelja u kombinaciji vertikalnog i bočnog opterećenja i opterećenja u momentu. Uz to, važno je obratiti pozornost na djelovanje prirode, odnosno,

opterećenja koja sa sobom nosi djelovanje vjetra, potresa ili valova, uključujući njihovo djelovanje na temelje i tlo koje okružuje temelje te mogućnost dinamičkog odgovora sustava kombiniranih temelja na navedene sile.

Važno je obratiti pažnju na cjelokupna slijeganja, ali i na diferencijalna slijeganja područja, a proračunate vrijednosti napona i slijeganja ne smiju prekoračiti propisane i dopuštene vrijednosti totalnih i diferencijalnih slijeganja. Potrebno je i razmotriti snagu strukture elemenata temelja te dijeljenje opterećenja između elemenata sustava kombiniranog temeljenja te vijek trajanja samih temelja (Katzenbach i dr.,2005).

Za utvrđivanje graničnog stanja nosivosti (*ULS – Ultimate limit state*) je potrebno dokazati vanjsku i unutarnju nosivost temeljne konstrukcije, pri čemu se unutarnja nosivost odnosi na pojedinačne elemente, a vanjska na nosivost čitavog sustava. Proračunima graničnog stanja nosivosti predviđaju se pogreške i kvarovi, odnosno radi se procjena rizika čime se prevenira dodatan ekonomski trošak. Karakteristična vrijednost ukupnog kapaciteta nosivosti ($R_{c,tot}$) jednaka je kapacitetu nosivosti podne ploče i pilota te se izražava jednadžbom:

$$R_{c,tot}(s) = \sum_{j=1}^{m} R_{pile,i}\,(s) + R_{raft}(s)$$

$R_{pile,\,i}$ - karakteristična nosivost *i* pilota

$R_{raft}$ - karakteristična nosivost temeljne ploče

S - slijeganje temeljne konstrukcije

Smatra se da je dokaz vanjske nosivosti ispunjen, ako sustav kombiniranog temeljenja zadovoljava uvjet:

$$\eta = \sum_{i=1}^{n} S_{k,i} \leq R_{l,tot,k}$$

$\eta=2$ - parcijalni koeficijent sigurnosti temelja

$S_{k,i}$ - karakteristična vrijednost utjecaja *i*

$R_{l,tot,k}$ - ukupna vrijednost kapaciteta nosivosti temelja

Granično stanje uporabljivosti (*Serviceability Limit State – SLS*) korespondira uvjetima kod kojih nema jasno propisanih zahtjeva, a navedeno se odnosi na deformacije, slijeganja i vibracije prilikom redovne uporabe i opterećenja, takve da ispravnost građevine nije zajamčena. Uvjet graničnog stanja uporabljivosti zahtjeva da je vrijednost utjecaja $E$ manja od granične vrijednosti deformacije strukture, a $C$ je vrijednost otpora. Dokaz da je sustav kombiniranog temelja zadovoljio uvjete glasi:

$$E\left(\sum_{i=1}^{n} S_{k,i}\right) \leq C$$

Osim kvalitetnih proračuna, važno je unaprijed odrediti i takozvani monitoring sustava temeljenja, a same mjerne instrumente ugraditi u temelje. Tako je moguće pratiti slijeganja, raspoređivanje prijenosa opterećenja između temeljne ploče i pilota, ali i nove utjecaje od strane prirode ili razinu vode. Tako se prati stabilnost građevine i korisnost samih temelja (Katzenbach i dr.,2005).

## 5.2. Određivanje dužine i promjera pilota i temeljne ploče

Dužina i promjer pilota ovisi o samoj predmetnoj lokaciji, odnosno, ovisi o geološkim karakteristikama tla na kojem je potrebno izvest temeljenje te o samoj konstrukciji za koju je potrebno izvesti temeljenje. Istraživanja tla prije samog temeljenja odredit će kvalitetu nosivosti pojedinih slojeva tla i time će se utvrditi stupanj i vrsta poboljšanja tla, odnosno temeljenja. Ako se radi o kombiniranom temeljenju, potrebno je predvidjeti i debljinu same temeljne ploče te raspored pilota ispod temeljne ploče. Potrebno je imati na umu proračune nosivosti grupe pilota, odnosno kvalitetno planirati razmještaj grupe pilota.

Nakon što je određena duljina i promjer samog pojedinačnog pilota, numeričkim analizama nosivosti se procjenjuje potrebna širina temeljne ploče, uz zadani vertikalni pomak i opterećenje građevine na razini kontaktne plohe. Pri proračunima je važno uvrstiti koeficijent reakcije tla $k$ ($kN/m^3$) za svaki element temeljenja zasebno te odrediti koeficijent kombiniranog sustava temeljenja, $\alpha_{CPRF}$, a nakon usporedbe dobivenih rezultata donijeti finalni zaključak o najadekvatnijim pilotima i temeljnoj ploči (Hofer, Perić, 2017).

# 6. KOMBINIRANO TEMELJENJE TEMELJNA PLOČA - PILOTI NA ELEKTRANA - TOPLANA ZAGREB

Elektrana - Toplana Zagreb, skraćeno ElTo Zagreb, je kogeneracijsko postrojenje u vlasništvu tvrtke HEP Proizvodnja d.o.o., koje proizvodi električnu energiju u sklopu elektroenergetskog sustava Republike Hrvatske te industrijskom parom i toplom vodom snabdijeva zapadni dio grada Zagreba. Njena prvenstvena funkcija je proizvodnja toplinske energije, dok je proizvodnja električne energije rezultat spojnog procesa kogeneracije. Pogon ElTo Zagreb se nalazi u užem području grada Zagreba, u gradskoj četvrti Trešnjevka, na adresi Zagorska 1. Uža lokacija projekta je uz južnu stranu križanja Zagorske ulice i Magazinske ulice, u Zagrebu.

U ovom će poglavlju biti prikazana problematika i primjena kombiniranog temeljenja temeljna ploča - piloti, koja se odnosi na strojarnicu ElTo Zagreb. Strojarnica obuhvaća postrojenje plinsko-turbinskog agregata, postrojenje kotla na ispušne plinove te postrojenje parno-turbinskog agregata, a za navedeno je bilo izvedeno kombinirano temeljenje.

## 6.2. Sastav i karakteristike temeljnog tla te dubine podzemne vode

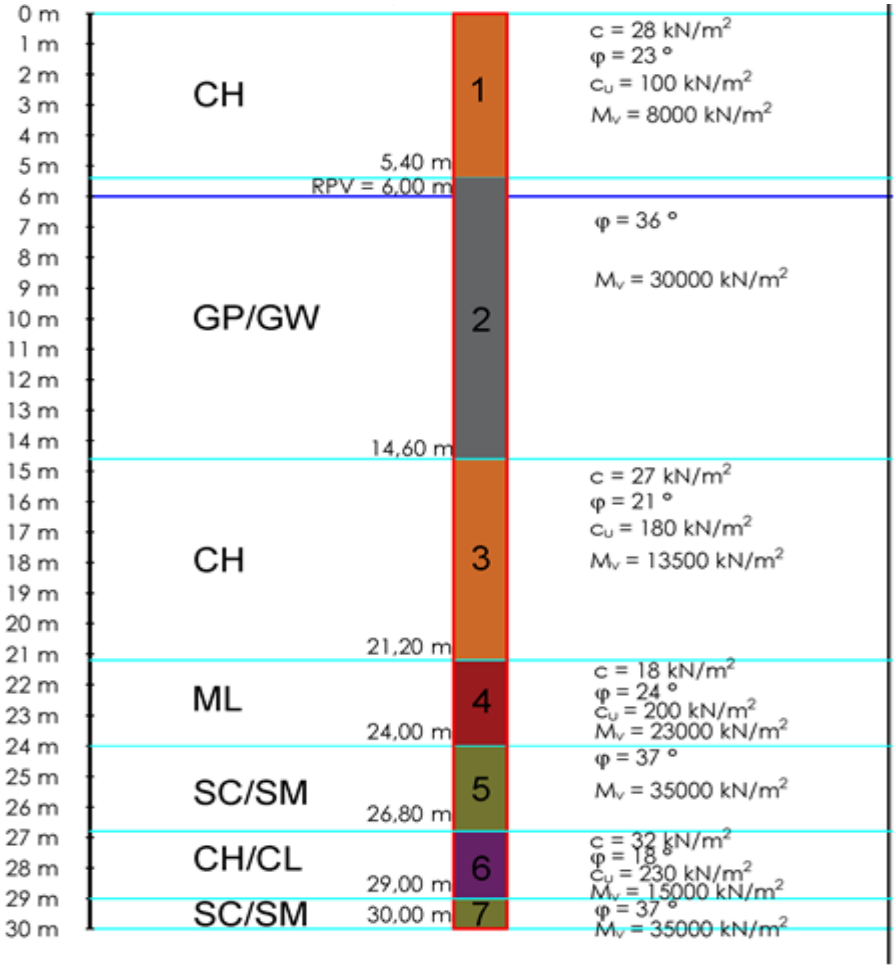
Temeljem rezultata dobivenih nakon provedenih geotehničkih terenskih i laboratorijskih istražnih radova na predmetnoj lokaciji do dubine bušenja, izdvaja se sedam karakterističnih geotehničkih sredina, prikazanih u Tablici 1.

Tablica 1. Geotehničke sredine predmetne lokacije

| | |
|---|---|
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 1**: | Glina visoke plastičnosti CH 0 – 5,4 m |
| | Parametri tla:<br>- kohezija: c = 28 kN/m2,<br>- kut unutarnjeg trenja: φ = 23°,<br>- nedrenirana čvrstoća: $c_u$ = 100 kN/m$^2$. |
| | Modul stišljivosti tla: $M_v$ = 8 000 kN/m$^2$ |
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 2**: | Šljunak slabo do dobro graduiran GP/GW 5,4 – 14,6 m |
| | Parametri tla: |

| | |
|---|---|
| | - kut unutarnjeg trenja: $\varphi = 23°$ |
| | Modul stišljivosti tla: $M_v = 30000$ kN/m$^2$ |
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 3**: | Glina visoke plastičnosti CH 14,6 – 21,2 m |
| | Parametri tla:<br>- kohezija: c = 27 kN/m$^2$,<br>- kut unutarnjeg trenja: $\varphi = 21°$,<br>- nedrenirana čvrstoća: $c_u = 180$ kN/m$^2$ |
| | Modul stišljivosti tla: $M_v = 13\ 500$ kN/m$^2$ |
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 4**: | Prah niske plastičnosti ML 21,2 – 24,0 m |
| | Parametri tla:<br>- kohezija: c = 18 kN/m$^2$,<br>- kut unutarnjeg trenja: $\varphi = 24°$,<br>- nedrenirana čvrstoća: $c_u = 200$ kN/m$^2$ |
| | Modul stišljivosti tla: $M_v = 23\ 000$ kN/m$^2$ |
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 5**: | Prahovito-glinoviti pijesak SC/SM 24,0 – 26,8 m |
| | Parametri tla:<br>- kut unutarnjeg trenja: $\varphi = 37°$ |
| | Modul stišljivosti tla $M_v = 35000$ kN/m$^2$ |
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 6**: | Glina niske do visoke plastičnosti CH/CL 26,8 – 29,0 m |
| | Parametri tla:<br>- kohezija: c = 32 kN/m$^2$,<br>- kut unutarnjeg trenja: $\varphi = 18°$,<br>- nedrenirana čvrstoća: $c_u = 230$ kN/m$^2$ |
| | Modul stišljivosti tla: $M_v = 15\ 000$ kN/m$^2$ |
| **GEOTEHNIČKA SREDINA 7**: | Prahovito-glinoviti pijesak SC/SM 29,0 – 30,0 m |
| | Parametri tla:<br>- kut unutarnjeg trenja: $\varphi = 37°$ |
| | Modul stišljivosti tla: $M_v = 35000$ kN/m$^2$ |

Razina podzemne vode (*RPV*) nalazi se na 6,00 m. Slika 18. je grafički prikaz proračunskog geotehničkog profila tla sa pripadajućim parametrima tla, koji su navedeni u Tablici 1.




Slika 18. Geotehnički profil tla

## 6.3. Kombinirani temelji temeljnih ploča i pilota za ElTo Zagreb

Temelj kotlova na ispušne plinove je armiranobetonska ploča tlocrtnih dimenzija 26 x 28 metara i debljine 1.5 metra, koja je ujedno i naglavnica grupe bušenih pilota. Temeljenje ploče, uz njezino oslanjanje na podlogu, je također ostvareno preko grupe od 42 armiranobetonska bušena pilota duljine ($L$) 10 metara i promjera ($D$) 1 metar, na osnom razmaku ($s$) od 4 metra u oba smjera. Svijetli razmak između pilota iznosi 3 metra. Osni razmak krajnjeg pilot od ruba temeljne ploče je 2 metra (u smjeru ploče širine 26 metara) i 3 metra (u smjeru ploče duljine 28 metara).

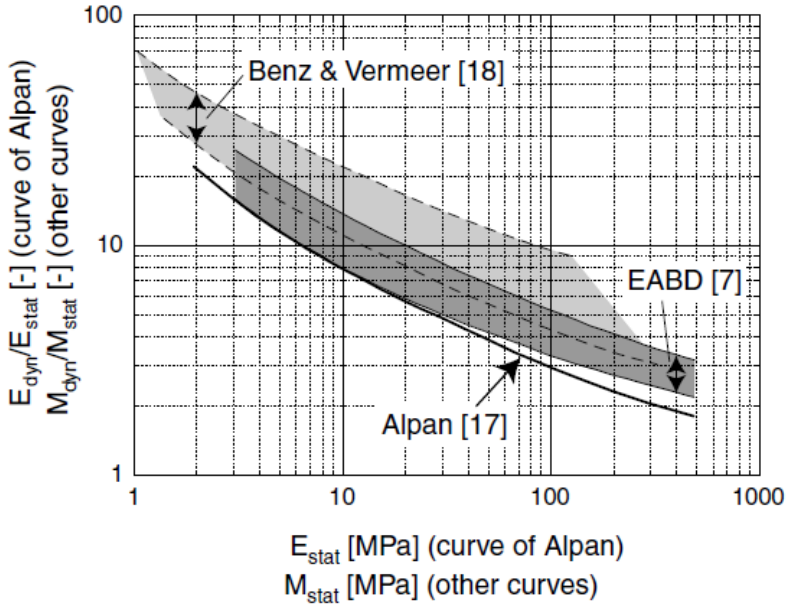
Plinsko-turbinski agregat se nalazi u dvije akustične kućice koje se oslanjaju jedna na drugu i stoje na zajedničkom temelju plinsko-turbinskog agregata. Temeljna ploča plinsko-turbinskog agregata je dilatacijom odijeljena od ostalih dijelova objekta strojarnice. Ploča je duljine 31,37 metra, širine 7,5 metara i debljine 2,25 metra te se oslanja na 21 pilot promjera

0,8 metara i duljine 10 metara, na rasteru u uzdužnom smjeru 3,2 metra, a u poprečnom smjeru 2,8 metara.

Nosiva konstrukcija parno-turbinskog agregata je samostalan armiranobetonski objekt koji je dilatacijom odijeljen od ostalih dijelova objekta strojarnice. Konstrukcija se sastoji od gornje ploče, stupova i donje ploče. Gornja ploča je svojim gornjim rubom poravnata sa prvom etažom i nalazi se na koti +7.84 metra. Tlocrtne dimenzije su 16,6 metara dužine i 8 metara širine. Debljina ploče je promjenjiva i kreće se od 2 metra do 2,7 metara. Gornja ploča se oslanja na ukupno 6 armiranobetonska stupa. Četiri stupa su dimenzija 120 x 50 centimetara, ostali su dimenzija 140 x 150 centimetara. Donja ploča je ukupne dužine 17 metara, širine 10 metara i debljina 2 metra. Ploča se oslanja na 15 pilota promjera 1 metar i duljine 10 metara.

## 6.4. Proračun kombiniranog temelja kotla na ispušne plinove

Parametri tla koji su se koristili za geostatitičke analize u proračunima, prikazani su Slikom 18. Slikom 19. je prikazan dijagram prema kojem su u proračunima odabrana dinamička opterećenja $E_{din}$.




Slika 19. Prikaz dijagrama vrijednosti dinamičkih opterećenja

Za analizu kombiniranog temelja kotla na ispušne plinove koristi se izraz:

$$E_{din} = 5 \times E_{st}$$

Za određivanje dinamičkog koeficijenta reakcije podloge u horizontalnom i vertikalnom smjeru, dani su izrazi:

$$K_{vdin} = 5 \times K_v$$
$$K_{hdin} = 5 \times K_h$$

Programom Plaxis 3D, vršilo se proračunavanje slijeganja temeljne ploče, pilota, uzdužne sile pilota na bazi ($N$) te se dobivenim rezultatima određivao koeficijent reakcije podloge. Slijedećim tablicama prikazani su ulazni podaci korišteni kod proračuna. Tako Tablica 2. prikazuje parametre tla, Tablicom 3. su prikazani parametri za temeljnu ploču, Tablicom 4. ulazni parametri za pilote i Tablicom 5. su prikazana opterećenja koja djeluju na kombinirani temelj.

Tablica 2. Parametri tla

| Br. tla | Oznaka tla | Tip tla | $\gamma_{unsat}$ (kN/m$^3$) | $\gamma_{sat}$ (kN/m$^3$) | $E_{50}ref$ ($10^3$ kN/m$^2$) | $E_{oed}ref$ ($10^3$ kN/m$^2$) | $E_{ur}ref$ ($10^3$ kN/m$^2$) | $E_{ref}$ (kN/m$^2$) | φ (◦) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | CH_1 | Drenirano | 18,000 | 18,000 | 8,000 | 8,000 | 24,000 | 28,000 | 23,000 |
| 2 | GP/GW | Drenirano | 19,000 | 19,000 | 30,000 | 30,000 | 90,000 | 1,000 | 36,000 |
| 3 | CH_2 | Drenirano | 19,000 | 19,000 | 13,500 | 13,500 | 40,500 | 27,000 | 21,000 |
| 4 | ML | Drenirano | 20,000 | 20,000 | 23,000 | 23,000 | 69,000 | 18,000 | 24,000 |
| 5 | SC/SM | Drenirano | 20,000 | 20,000 | 35,000 | 35,000 | 105,000 | 1,000 | 37,000 |
| 6 | CH/CL | Drenirano | 20,000 | 20,000 | 15,000 | 15,000 | 45,000 | 32,000 | 18,000 |

Tablica 3. Ulazni parametri za temeljnu ploču kotla na ispušne plinove

| Tem.ploča | γ (kN/m$^3$) | $E_1$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $E_2$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $G_{12}$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $G_{13}$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $G_{23}$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $v_{12}$ ($10^{-3}$ ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d=1,5m | 25,000 | 30,000 | 30,000 | 12,000 | 12,000 | 12,000 | 250,000 |

Tablica 4. Ulazni parametri za pilote za temelj kotla na ispušne plinove

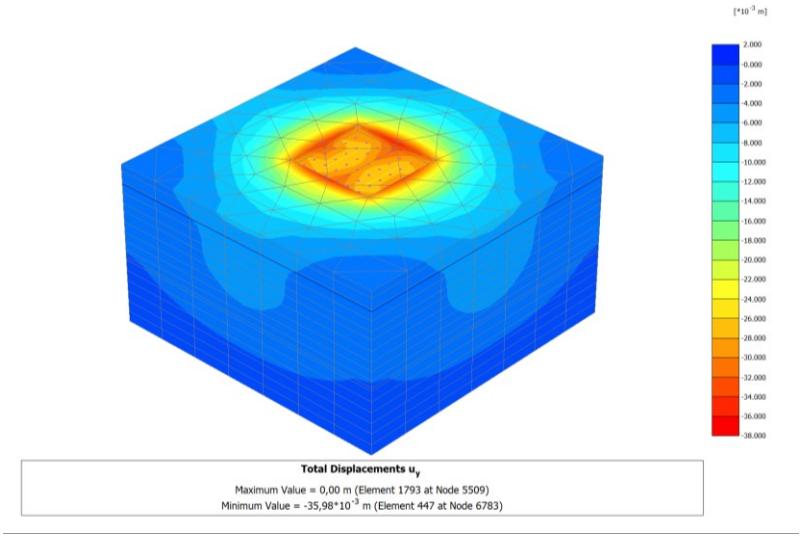
| Pilot | E ($10^6$ kN/m$^2$) | γ (kN/m$^3$) | A ($10^{-3}$ m$^2$) | $I_3$ ($10^{-3}$ m$^4$) | $I_2$ ($10^{-3}$ m$^4$) |
|---|---|---|---|---|---|
| D=1,0m | 30,000 | 25,000 | 785,000 | 49,000 | 49,000 |

Tablica 5. Opterećenja u y smjeru koja djeluju na temelj kotla na ispušne plinove

| Čvor | Radna površina | X (m) | Y (m) | Z (m) | $q_x$ (kN/m$^2$) | $q_y$ (kN/m$^2$) | $q_z$ (kN/m$^2$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 459 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 450 | -2,100 | 52,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 452 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 453 | -2,100 | 52,000 | -2,100 | 38,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 489 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 460 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 38,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 489 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 486 | -2,100 | 52,000 | -2,100 | 51,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 505 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 506 | -2,100 | 52,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 517 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 491 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 51,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 474 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 475 | -2,100 | 38,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 505 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 457 | -2,100 | 38,000 | -2,100 | 51,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 455 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 456 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 51,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 455 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 451 | -2,100 | 38,000 | -2,100 | 38,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 452 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 412 | -2,100 | 38,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 411 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 413 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 38,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 452 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 454 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 505 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 486 | -2,100 | 52,000 | -2,100 | 51,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 489 | -2,100 | 59,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 453 | -2,100 | 52,000 | -2,100 | 38,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 505 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 58,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 454 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 452 | -2,100 | 45,000 | -2,100 | 32,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 451 | -2,100 | 38,000 | -2,100 | 38,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 455 | -2,100 | 31,000 | -2,100 | 45,000 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |
| 457 | -2,100 | 38,000 | -2,100 | 51,500 | 0,000 | -75,000 | 0,000 |

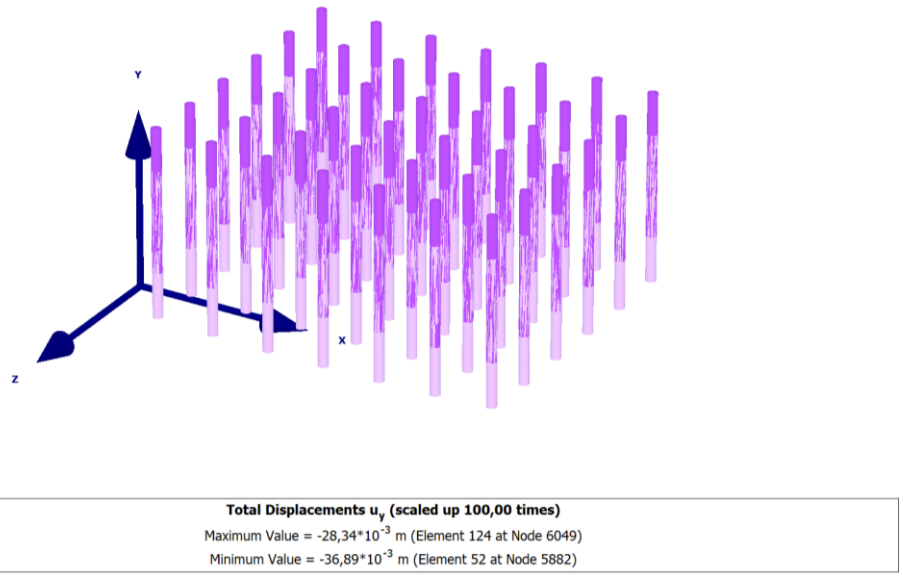
Programom Plaxis definiran je proračunski model (od elemenata: temeljna ploča, piloti i opterećenje) te je proveden proračun koji daje vrijednosti ukupnog slijeganja u smjeru *y* ($u_y$).

Slikom 20. prikazan je rezultat slijeganja proračunskog modela kombiniranog temelja kotla na ispušne plinove.



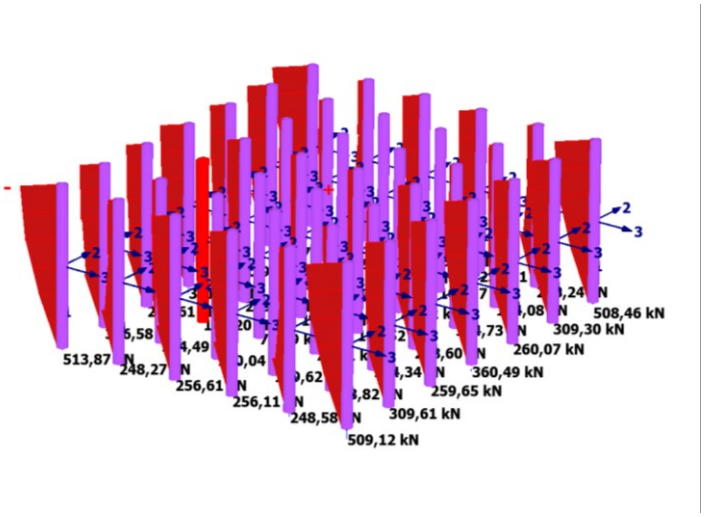

Slika 20. Konture ukupnog slijeganja u smjeru y ($u_y$) temelja kotla na ispušne plinove

Prema izračunu, maksimalna vrijednost ukupnog slijeganja ($u_{y,maks}$) je 3,6 centimetara, dok je srednja vrijednost slijeganja ispod temeljne ploče ($u_{y,av,ploča}$) 2,9 centimetara. Piloti se također sliježu u *y* smjeru, a prema dijagramu pomaka pilota, što je prikazano Slikom 21., maksimalna vrijednost slijeganja pilota je 2,9 centimetara.




Slika 21. Dijagram ukupnih pomaka pilota temelja kotla na ispušne plinove u smjeru y ($u_y$).

Slikom 22. prikazana je maksimalna uzdužna sila ($N_{max}$) u pilotu na njegovoj bazi i iznosi 514 kN.




Slika 22. Maksimalna uzdužna sila u pilotima za temelj kotla na ispušne plinove.

Dijagramom je vidljivo da su sile koje djeluju u rubnim pilotima većeg iznosa od onih u središtu, što je i očekivano s obzirom na to da na njih osim vertikalnog djeluje i momentno naprezanje.

Kada se odrede slijeganja temeljene ploče i pilota u programu Plaxis, na red dolazi određivanje koeficijenta reakcije podloge, prema jednadžbi:

$$k_{y,ploče} = \frac{q}{u_{y,av,ploče}}$$

$q$ – kontaktno naprezanje ispod ploče

Koeficijent reakcije podloge na bazu pilota se određuje preko izraza:

$$k_{y,pilot} = \frac{N_{max}}{u_{y,pilota,max}}$$

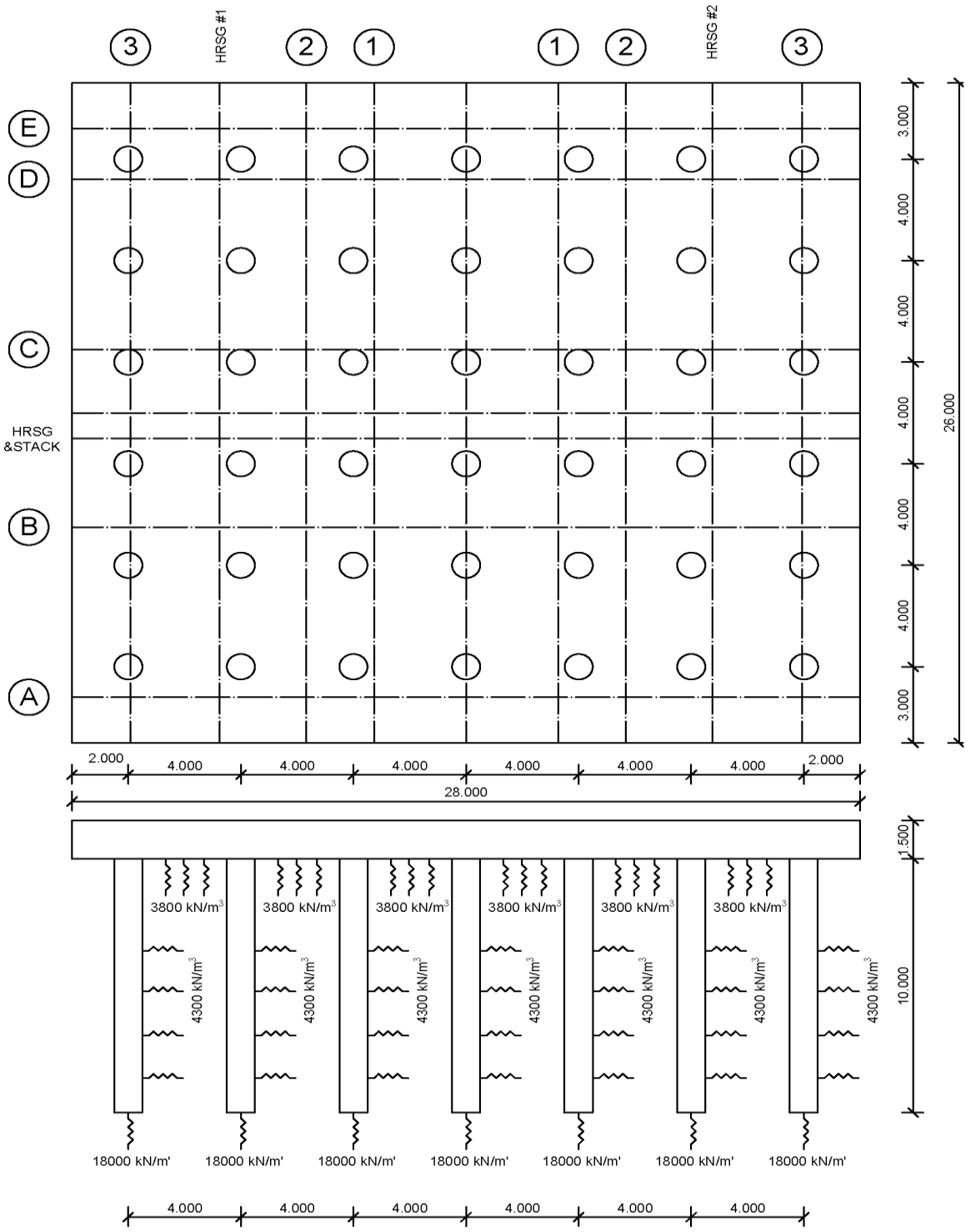
$N_{max}$ – maksimalna vertikalna sila u pilotu

$u_{y,pilota,max}$ – maksimalno slijeganje pilota u $y$ smjeru

Koeficijent reakcije podloge po plaštu pilota zadan je preko Mindlin-ovog rješenja za djelovanje koncentrirane sile unutar linearno elastičnog uslojenog poluprostora (Mindlin, 1936, prema Ivandić, 2016). Postupak proračuna koeficijenta određuje se na način da se odredi vrijednosti modula elastičnosti u horizontalnom smjeru, zatim se za jediničnu horizontalnu silu odredi pripadni horizontalni pomak glave upetog pilota te se iz uvjeta horizontalnog pomaka glave pilota određuje ekvivalentna vrijednost horizontalnog koeficijenta reakcije tla, prema izrazu:

$$k_{x,plašt} = \frac{\lambda^4 4EL}{d}$$

Slikom 23. je prikazan tlocrtni prikaz temeljne ploče i tlocrtni raspored pilota, a nakon tlocrta shematski je prikazan koeficijent reakcije podloge na odgovarajućem mjestu i proračunatih vrijednosti. Iznos koeficijenta reakcije podloge ispod ploče iznosi 3800 kN/m$^3$, koeficijent reakcije podloge ispod baze pilota iznosi 18000 kN/m', a koeficijent reakcije podloge u horizontalnom smjeru, odnosno na kontaktu plašta pilota iznosi 4500 kN/m$^3$.




Slika 23. Tlocrtni prikaz kombiniranog temelja temeljne ploče i pilota, te shematski prikaz reakcije podloge za temelj kotla na ispušne plinove

Osim proračuna koeficijenta reakcije tla potrebno je odrediti proračun graničnog stanja nosivosti grupe pilota, što se prema projektnoj dokumentaciji određivalo prema Eurocodu 7

proračunskim pristupom tri. Parametri tla koji su se koristili kod proračuna prikazani su Slikom 18. Temeljnu ploču podupire 42 pilota, promjera 1 metar i duljine 10 metara. Opterećenja koja djeluju na pilote su: stalno opterećenje iznosa 66401 kN i povremeno opterećenje iznosa 14384 kN. Iznos vlastite težine pilota je 196,35 kN, a proračunski koeficijenti na djelovanje su 1,35 za stalno djelovanje, a 1,5 za povremeno. Iznos proračunskog vertikalnog djelovanja za grupu od 42 pilota iznosi 122350,37 kN, dok iznos vertikalnog opterećenja pojedinog pilota iznosi 2913,1 kN. Prema proračunskom pristupu tri, proračunski koeficijenti za materijal su koeficijent za kut trenja iznosi 1,25, koeficijent za nedreniranu čvrstoću iznosi 1,4, a koeficijenti za otpornost iznose 1.

Karakterističnu otpornost baze pilota možemo izračunati po izrazu:

$$R_{bk} = \frac{\left(N_q + 1\right) \times \sigma_{vk,b} + u_b \times A_b}{\gamma_{Rd}}$$

$N_q$ – faktor nosivosti
$\sigma_{vk,b}$ – vertikalno totalno naprezanje
$u_b$ – porni pritisak
$A_b$ – površina baze pilota
$\gamma_{Rd}$ – parcijalni faktor otpornosti

Faktor nosivosti $N_q$ određuje se prema Berezantzevu i dr. (1961) gdje se faktor nosivosti određuje prema izrazu:

$$N_q = B_k \times \alpha_T$$

$B_k$ – faktor nosivosti (Berezantzev)

$$B_k = 0.7 \times e^{6.58tg\varphi}$$

$\alpha_T$ – koeficijent vitkosti pilota

Iznos faktora nosivosti je 22,71, vertikalnog totalnog naprezanja je 184,6 kN/m$^2$, pornoga pritiska 40 kN/m$^2$, površina baze pilota je 0,79 m$^2$ i iznos parcijalnog faktora otpornosti je 1. Temeljem izraza za karakterističnu otpornost baze pilota i vrijednosti koje su dobivene, iznos karakteristične otpornosti baze pilota je 3469 kN.

Otpornost na plaštu pilota proračunava se kao zbroj otpornosti plašta za svaki pojedini sloj. U prvom sloju (*CH*) otpornost na plaštu pilota se proračunava kao umnožak površine plašta ($A_{s1}$) i faktora nedrenirane adhezije ($\alpha$). Karakteristična otpornost na plaštu pilota ($R_{sk}$) za prvi sloj iznosi 666 kN, a za drugi sloj (*GP/GW*) iznosi 461 kN. Zbrojem dviju otpornosti na plaštu pilota kroz dva sloja, dobije se ukupna proračunska otpornosti po plaštu pilota ($R_{sd}$) od 1128 kN. Ukupna proračunska otpornost pilota (*Rd*) iznosi 4597 kN, a računa se kao zbroj proračunske otpornosti po bazi i proračunske otpornosti po plaštu pilota.

Temeljem takvog proračuna dobiveno je da proračunsko vertikalno djelovanje jednog pilota iznosi 2913,1 kN, a ukupna proračunska otpornost pojedinog pilota iznosi 4597 kN. Omjerom tih dviju vrijednost, dobiveno je da je nosivost pilota zadovoljena, jer je stupanj iskorištenosti 63,37% odnosno manji je od 100% (Arežina, 2019).

## 6.5. Proračun kombiniranog temelja za plinsko-turbinski agregat

Problematika proračuna temelja plinske turbine je ta da temelj preuzima sva naprezanja koji se događaju tijekom normalnih radnih uvjeta, tijekom izvanrednih ili u slučaju potresa, odnosno seizmičkih naprezanja. Temelj zbog svoje težine i krutosti prigušuje dinamička uzbuđenja nastala rotacijom dijelova jedinica plinske turbine. Kao što je već navedeno u poglavlju 6.3., temeljna ploča dimenzija duljine 31,37 metar, širine 7,5 metara i debljine 2,25 metara se oslanja na 21 pilot promjera 0,8 metara i duljine 10 metra.

Korišteni parametri tla prikazani su u Tablici 2., dok su parametri za temeljnu ploču i pilote prikazani u Tablici 6. i 7. Tablicom 8. dana su opterećenja koja djeluju u y smjeru.

Tablica 6. Ulazni parametri za temeljnu ploču plinsko-turbinskog agregata

| Temeljna ploča | $\gamma$ (kN/m$^3$) | $E_1$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $E_2$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $G_{12}$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $G_{13}$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $G_{23}$ ($10^6$ kN/m$^2$) | $v_{12}$ ($10^{-3}$) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d(m)=2,250 | 25,000 | 30,000 | 30,000 | 12,000 | 12,000 | 12,000 | 250,000 |

Tablica 7. Ulazni parametri za pilote plinsko-turbinskog agregata

| Piloti | E ($10^6$ kN/m$^2$) | γ (kN/m$^3$) | A ($10^{-3}$ m$^2$) | $I_3$ ($10^{-3}$ m$^4$) | $I_2$ ($10^{-3}$ m$^4$) |
|---|---|---|---|---|---|
| D=0,8m L=10m | 30,000 | 25,000 | 503,000 | 20,000 | 20,000 |

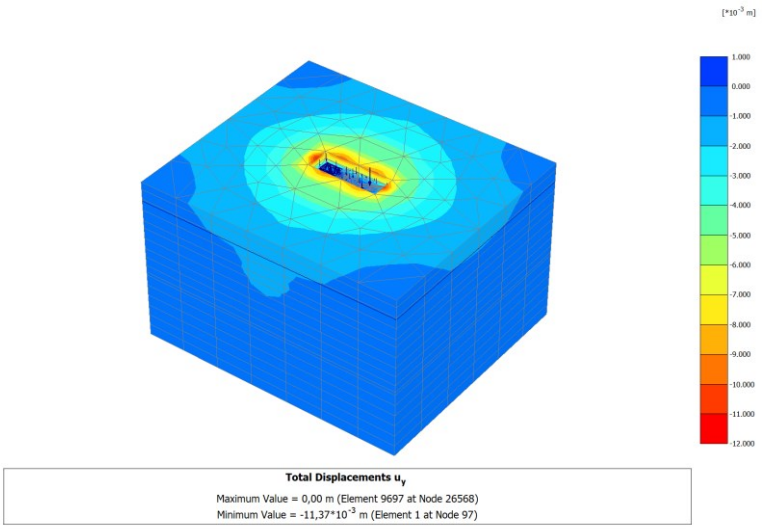
Tablica 8. Ulazni parametri za opterećenje u y smjeru za plinsko-turbinski agregat

| Čvor | Radna ploča | X (m) | Y (m) | Z (m) | $F_x$ (kN) | $F_y$ (kN) | $F_z$ (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2289 | -2,250 | 38,400 | -2,250 | 34,200 | 0,000 | -104,000 | 0,000 |
| 2122 | -2,250 | 40,400 | -2,250 | 34,200 | 0,000 | -116,000 | 0,000 |
| 2192 | -2,250 | 42,700 | -2,250 | 34,900 | 0,000 | -53,000 | 0,000 |
| 2333 | -2,250 | 45,900 | -2,250 | 34,400 | 0,000 | -212,000 | 0,000 |
| 2406 | -2,250 | 38,400 | -2,250 | 37,900 | 0,000 | -25,000 | 0,000 |
| 2414 | -2,250 | 40,400 | -2,250 | 37,900 | 0,000 | -55,000 | 0,000 |
| 2583 | -2,250 | 42,700 | -2,250 | 37,200 | 0,000 | -52,000 | 0,000 |
| 2633 | -2,250 | 45,900 | -2,250 | 37,700 | 0,000 | -210,000 | 0,000 |
| 2402 | -2,250 | 38,400 | -2,250 | 36,100 | 0,000 | -81,000 | 0,000 |
| 2618 | -2,250 | 49,300 | -2,250 | 34,200 | 0,000 | -23,000 | 0,000 |
| 2638 | -2,250 | 49,300 | -2,250 | 37,900 | 0,000 | -26,000 | 0,000 |
| 2410 | -2,250 | 39,700 | -2,250 | 36,100 | 0,000 | -71,000 | 0,000 |
| 1686 | -2,250 | 37,800 | -2,250 | 31,800 | 0,000 | -32,000 | 0,000 |
| 2233 | -2,250 | 41,400 | -2,250 | 31,800 | 0,000 | -32,900 | 0,000 |
| 2338 | -2,250 | 45,400 | -2,250 | 31,800 | 0,000 | -34,000 | 0,000 |
| 2252 | -2,250 | 37,800 | -2,250 | 33,800 | 0,000 | -26,600 | 0,000 |
| 2172 | -2,250 | 41,400 | -2,250 | 33,800 | 0,000 | -27,500 | 0,000 |
| 2321 | -2,250 | 45,400 | -2,250 | 33,800 | 0,000 | -28,500 | 0,000 |
| 27692 | -2,250 | 30,400 | -2,250 | 32,200 | 0,000 | -91,200 | 0,000 |
| 27699 | -2,250 | 33,600 | -2,250 | 32,200 | 0,000 | -56,900 | 0,000 |
| 27706 | -2,250 | 36,800 | -2,250 | 32,200 | 0,000 | -53,800 | 0,000 |
| 27713 | -2,250 | 40,000 | -2,250 | 32,200 | 0,000 | -80,400 | 0,000 |

| | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 27720 | -2,250 | 43,200 | -2,250 | 32,200 | 0,000 | -91,200 | 0,000 |
| 27727 | -2,250 | 46,400 | -2,250 | 32,200 | 0,000 | -56,900 | 0,000 |
| 27734 | -2,250 | 49,600 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -53,800 | 0,000 |
| 27741 | -2,250 | 30,400 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -80,400 | 0,000 |
| 27748 | -2,250 | 33,600 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -74,500 | 0,000 |
| 27755 | -2,250 | 36,800 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -74,500 | 0,000 |
| 27762 | -2,250 | 40,000 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -72,500 | 0,000 |
| 27769 | -2,250 | 43,200 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -72,500 | 0,000 |
| 27776 | -2,250 | 46,400 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -4,500 | 0,000 |
| 27783 | -2,250 | 49,600 | -2,250 | 35,000 | 0,000 | -4,500 | 0,000 |
| 27790 | -2,250 | 30,400 | -2,250 | 37,800 | 0,000 | -11,700 | 0,000 |

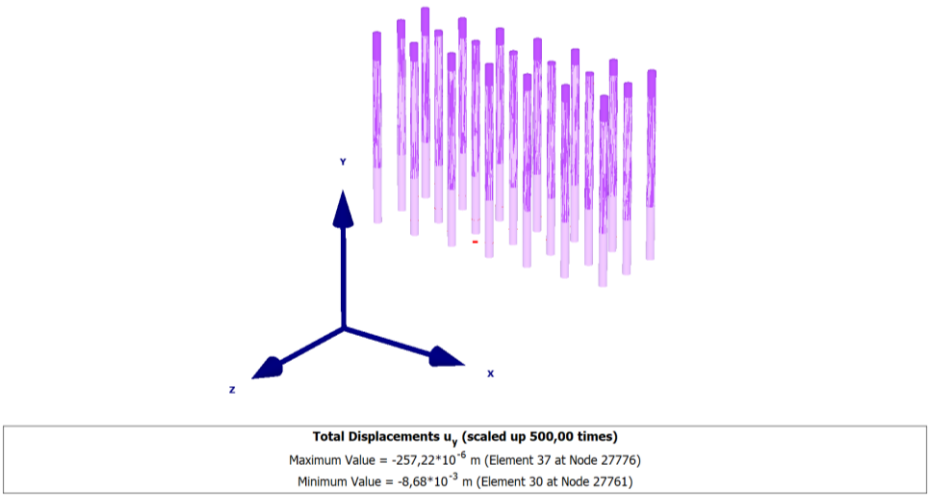
Programom Plaxis definiran je proračunski model (od elemenata: temeljna ploča, piloti i opterećenje) te je proveden proračun koji daje vrijednosti ukupnog slijeganja u smjeru $y$ ($u_y$).

Slikom 24. prikazan je rezultat slijeganja proračunskog modela kombiniranog temelja plinsko-turbinskog agregata.



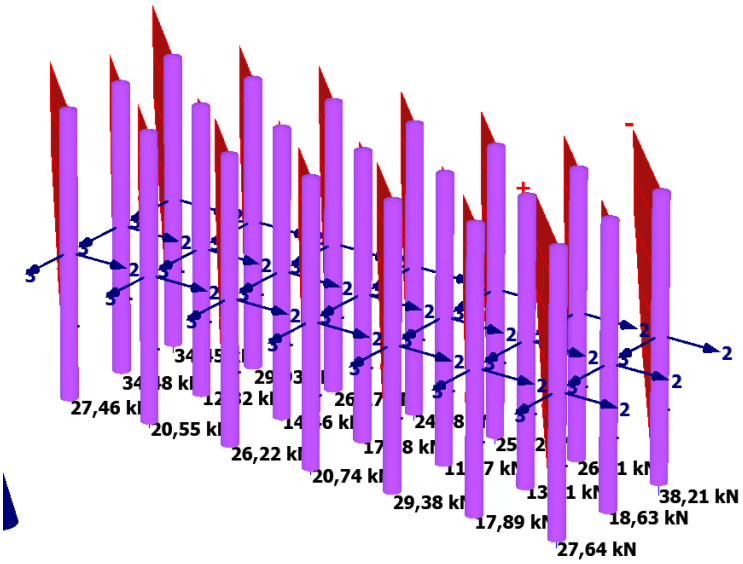

Slikom 24. Konture ukupnog slijeganja u smjeru y ($u_y$) temelja plinsko-turbinskog agregata.

Prema izračunu, maksimalna vrijednost ukupnog slijeganja ($u_{y,maks}$) je 1,1 centimetar. Piloti se također sliježu u $y$ smjeru te je prema dijagramu ukupnog pomaka pilota, prikazano Slikom 25., maksimalna vrijednost slijeganja pilota 1,1 centimetar.




Slika 25. Dijagram ukupnih pomaka pilota temelja plinsko–turbinskog agregata u smjeru y ($u_y$).

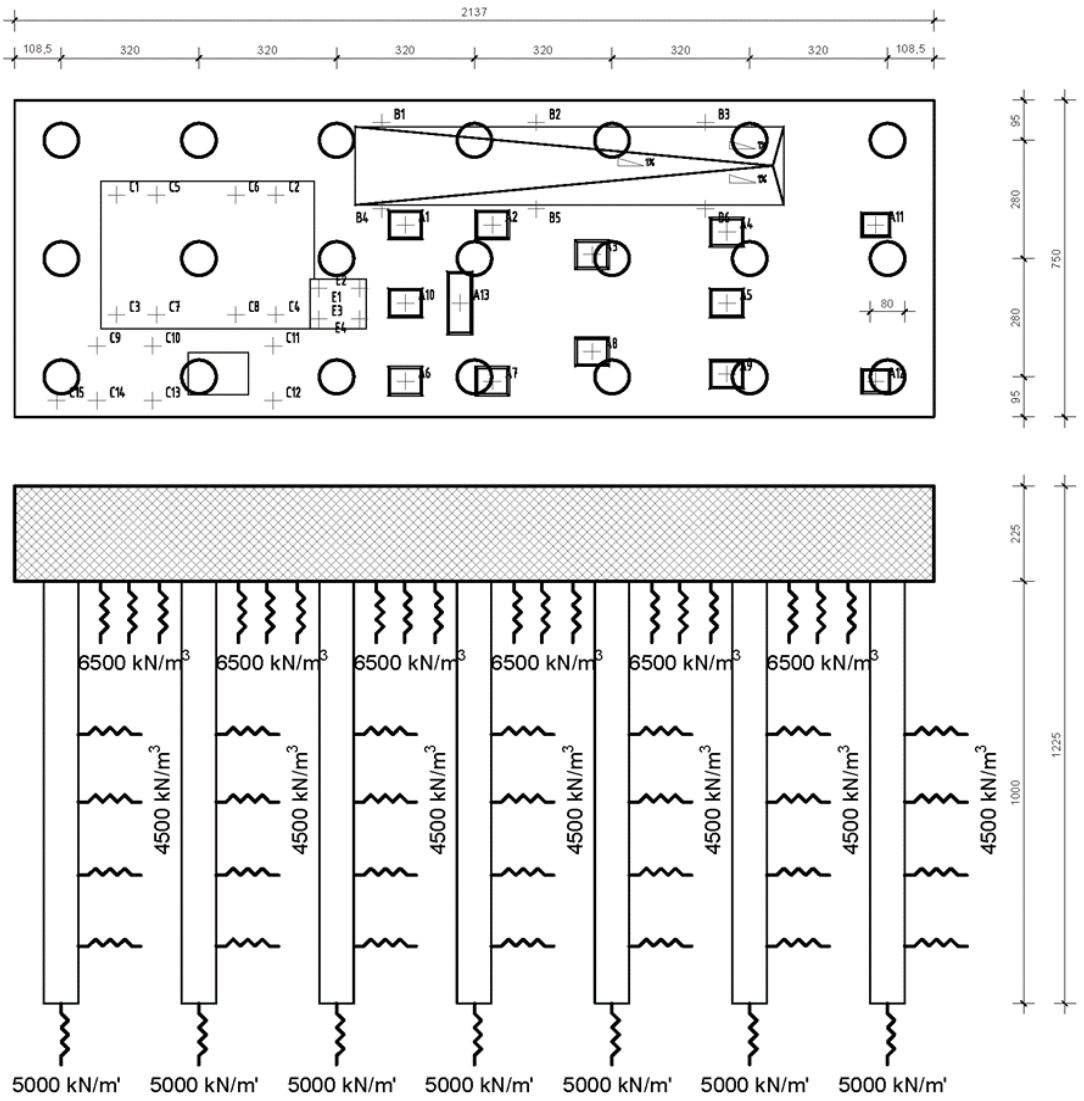
Slikom 26. prikazana je maksimalna uzdužna sila ($N_{max}$) u pilotu na njegovoj bazi i iznosi 55 kN.




Slika 26. Maksimalna uzdužna sila u pilotima za temelj plinsko-turbinskog agregata.

Određivanje koeficijenta reakcije podloge za temeljnu ploču plinsko-turbinskog agregata određuje se po izrazima iz prethodnog poglavlja, odnosno na isti način, samo se u izraze uvrštavaju drugačije vrijednosti slijeganja, maksimalne sile i kontaktno naprezanje ispod ploče. Tako koeficijent reakcije podloge ispod ploče iznosi 6500 kN/m$^3$, koeficijent reakcije podloge na bazi pilota je 5000 kN/m', dok je koeficijent reakcije podloge na plaštu pilota 4300 kN/m$^3$.

Slikom 27. prikazan je tlocrtni prikaz temeljne ploče i tlocrtni raspored pilota za kombinirani temelj plinsko-turbinskog agregata, a ispod tlocrta shematski je prikazan koeficijent reakcije podloge na odgovarajućem mjestu i proračunatih vrijednosti.




Slika 27. Tlocrtni prikaz kombiniranog temelja temeljne ploče i pilota, te shematski prikaz reakcije podloge za temelj plinsko-turbinskog agregata

Proračun nosivosti grupe pilota za temelj plinsko – turbinskog agregata odredio se prema Eurocodu 7, proračunskim pristupom tri. Princip proračuna je isti kao i u podnaslovu 6.4.

Parametri tla koji su se koristili kod proračuna prikazani su Slikom 18. Temeljnu ploču podupire 21 pilota, promjera 0,8 metar i duljine 10 metara. Opterećenja koja djeluju na pilote su: stalno opterećenje iznosa 16618,4 kN i povremeno opterećenje iznosa 5188 kN. Iznos vlastite težine pilota je 125,66 kN, a proračunski koeficijenti na djelovanje su 1,35 za stalno djelovanje, a 1,5 za povremeno. Iznos proračunskog vertikalnog djelovanja za grupu od 21 pilota iznosi 33779,41 kN, dok iznos vertikalnog opterećenja pojedinog pilota iznosi 1608,54 kN. Prema proračunskom pristupu tri, proračunski koeficijenti za materijal su koeficijent za kut trenja iznosi 1,25, koeficijent za nedreniranu čvrstoću iznosi 1,4, a koeficijenti za otpornost iznose 1.

Iznos faktora nosivosti je 22,03, vertikalnog totalnog naprezanja je 184,6 kN/m$^2$, pornoga pritiska 40 kN/m$^2$, površina baze pilota je 0,50 m$^2$. Temeljem izraza za karakterističnu otpornost baze pilota (prikazano u podnaslovu 6.4.) i vrijednosti koje su dobivene, iznos karakteristične otpornosti baze pilota je 2158 kN.

Otpornost na plaštu pilota proračunava se kao zbroj otpornosti plašta za svaki pojedini sloj. U prvom sloju (*CH*) otpornost na plaštu pilota se proračunava kao umnožak površine plašta ($A_{s1}$) i faktora nedrenirane adhezije ($\alpha$). Karakteristična otpornost na plaštu pilota ($R_{sk}$) za prvi sloj iznosi 533 kN, a za drugi sloj (*GP/GW*) iznosi 358 kN. Zbrojem dviju otpornosti na plaštu pilota kroz dva sloja, dobije se ukupna proračunska otpornosti po plaštu pilota ($R_{sd}$) od 891 kN. Ukupna proračunska otpornost pilota (*Rd*) iznosi 3049 kN, a računa se kao zbroj proračunske otpornosti po bazi i proračunske otpornosti po plaštu pilota.

Temeljem takvog proračuna dobiveno je da proračunsko vertikalno djelovanje jednog pilota iznosi 1608,54 kN, a ukupna proračunska otpornost pojedinog pilota iznosi 3049 kN. Omjerom tih dviju vrijednost, dobiveno je da nosivost pilota zadovoljena, jer je stupanj iskorištenosti 52,76% odnosno manji je od 100% (Arežina, 2019).

## 6.6. Proračun kombiniranog temelja za parno-turbinski agregat

Parno-turbinski agregat je objekt koji se sastoji od dvije ploče koje su odijeljene stupovima. Tako temeljna ploča prenosi opterećenje u tlo i pilote od naglavne konstrukcije preko šest stupova. Donja ploča je ukupne dužine 17 metara, širine 10 metara i debljine 2 metra. Ploča se oslanja na 15 pilota promjera 1 metar i duljine 10 metara. Za proračun kombiniranog temelja korišten je program Plaxis.

Ulazni parametri za tlo definirani su Tablicom 2. Ulazni parametri za temeljnu ploču i pilote prikazani su Tablicom 9. i 10., a Tablicom 11. prikazano je opterećenje.

Tablica 9. Ulazni parametri za temeljnu ploču parno-turbinskog agregata

| Temeljna ploča | $\gamma$ ($kN/m^3$) | $E_1$ ($10^6$ $kN/m^2$) | $E_2$ ($10^6$ $kN/m^2$) | $G_{12}$ ($10^6$ $kN/m^2$) | $G_{13}$ ($10^6$ $kN/m^2$) | $G_{23}$ ($10^6$ $kN/m^2$) | $v_{12}$ ($10^{-3}$ ) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| d=2 m | 25,000 | 30,000 | 30,000 | 12,000 | 12,000 | 12,000 | 250,000 |

Tablica 10. Ulazni parametri za pilote parno-turbinskog agregata

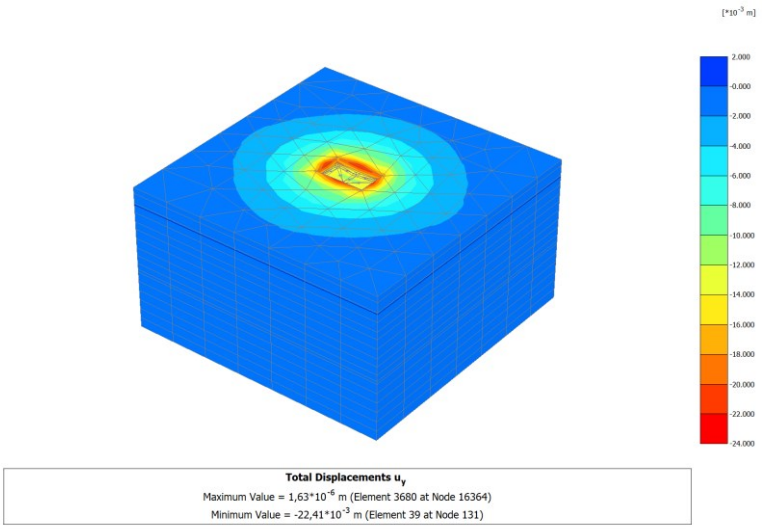
| Piloti | E ($10^6$ $kN/m^2$) | $\gamma$ ($kN/m^3$ ) | A ($10^{-3}$ $m^2$) | $I_3$ ($10^{-3}$ $m^4$) | $I_2$ ($10^{-3}$ $m^4$) |
|---|---|---|---|---|---|
| D=0,8m L=10m | 30,000 | 25,000 | 503,000 | 20,000 | 20,000 |

Tablica 11. Opterećenje koje djeluje na temeljnu ploču parno-turbinskog agregata

| Čvor | Radna površina | X (m) | Y (m) | Z (m) | $F_x$ (kN) | $F_y$ (kN) | $F_z$ (kN) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 819 | -2,000 | 38,000 | -2,000 | 48,300 | 0,000 | -1216,000 | 0,000 |
| 851 | -2,000 | 45,000 | -2,000 | 48,300 | 0,000 | -2461,000 | 0,000 |
| 876 | -2,000 | 52,000 | -2,000 | 48,300 | 0,000 | -1291,000 | 0,000 |
| 778 | -2,000 | 38,000 | -2,000 | 41,800 | 0,000 | -1182,000 | 0,000 |
| 771 | -2,000 | 45,000 | -2,000 | 41,800 | 0,000 | -2378,000 | 0,000 |
| 868 | -2,000 | 52,000 | -2,000 | 41,800 | 0,000 | -1274,000 | 0,000 |

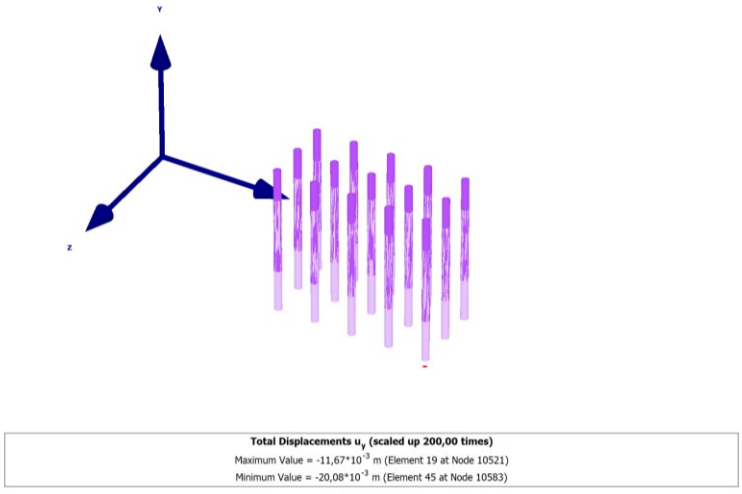
Programom Plaxis definiran je proračunski model (od elemenata: temeljna ploča, piloti i opterećenje) te je proveden proračun koji daje vrijednosti ukupnog slijeganja u smjeru *y* ($u_y$).

Slikom 28. prikazan je rezultat slijeganja proračunskog modela kombiniranog temelja parno-turbinskog agregata.



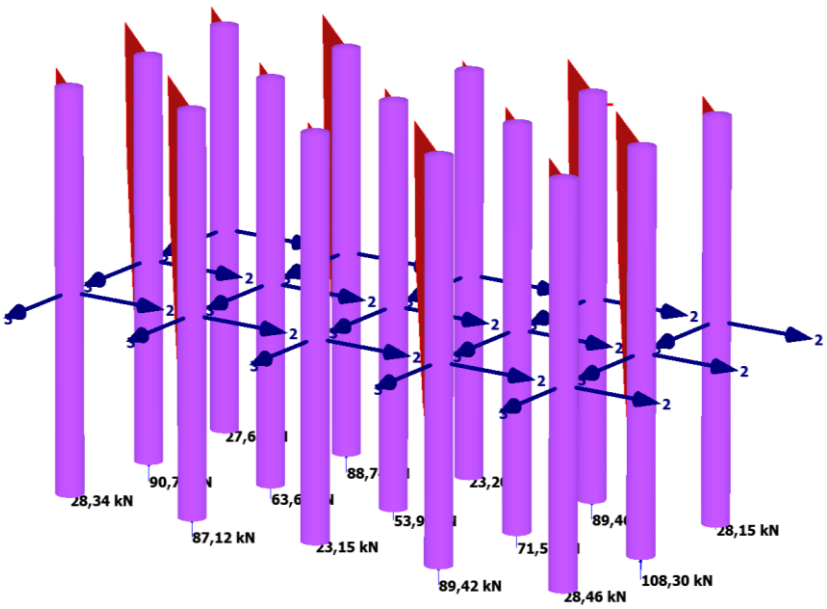

Slika 28. Konture ukupnog slijeganja u smjeru y ($u_y$) temelja parno-turbinskog agregata.

Prema izračunu, maksimalna vrijednost ukupnog slijeganja ($u_{y,maks}$) je 2,2 centimetra, dok je srednja vrijednost slijeganja ispod temeljne ploče ($u_{y,av,ploča}$) 1,2 centimetara. Piloti se također sliježu u *y* smjeru te je prema dijagramu pomaka pilota, prikazano Slikom 29., maksimalna vrijednost slijeganja pilota 1,2 centimetara.




Slika 29. Dijagram ukupnih pomaka pilota temelja plinsko–turbinskog agregata u smjeru y ($u_y$).

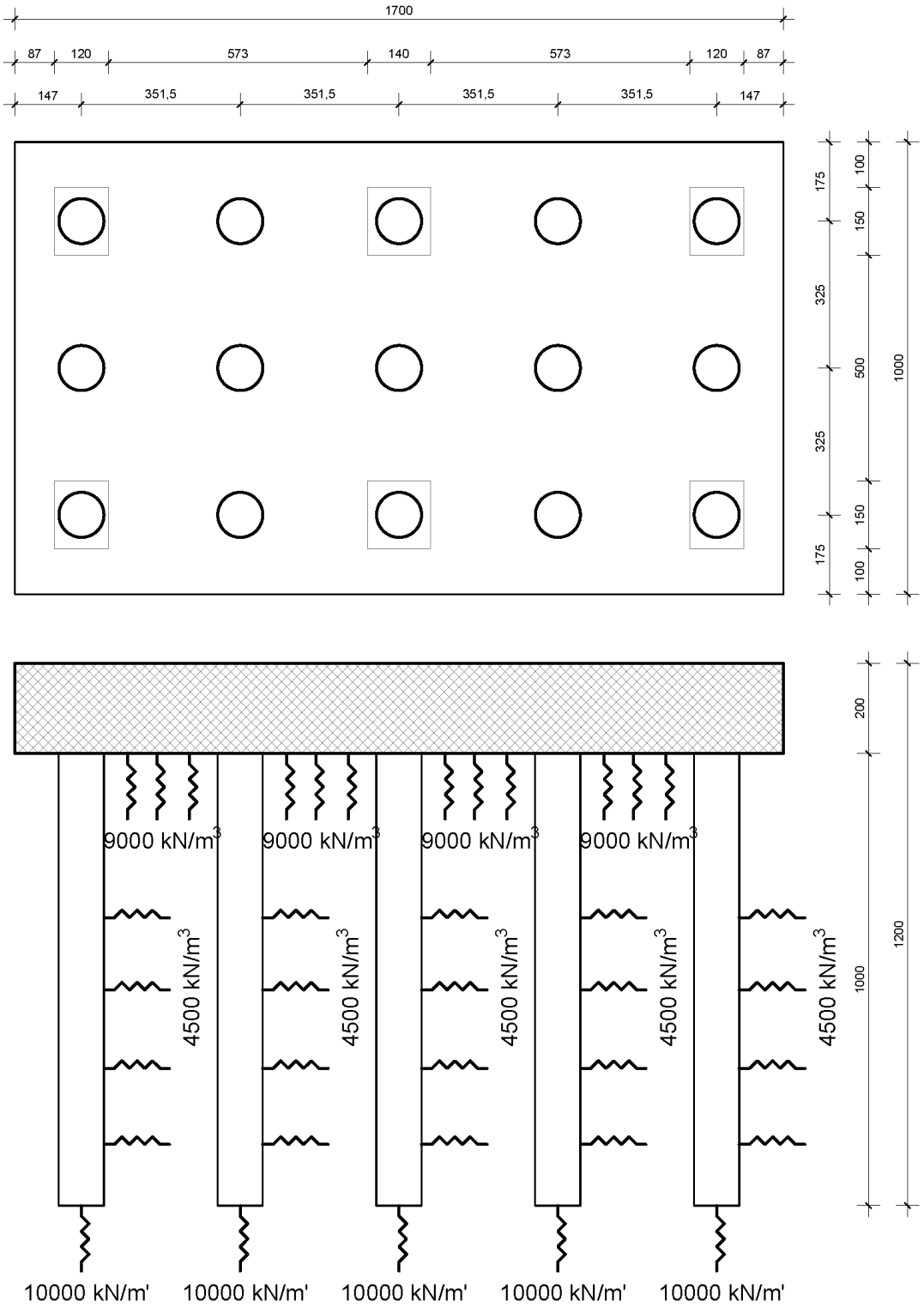
Slikom 30. prikazana je maksimalna uzdužna sila ($N_{max}$) u pilotu na njegovoj bazi i iznosi 120 kN.




Slika 30. Maksimalna uzdužna sila u pilotima za temelj parno-turbinskog agregata.

Određivanje koeficijenta reakcije podloge za temeljnu ploču plinsko-turbinskog agregata određuje se prema izrazima iz prethodnih poglavlja, odnosno na isti način, samo se u izraze uvrštavaju drugačije vrijednosti, slijeganja, maksimalne sile i kontaktno naprezanje ispod ploče. Tako koeficijent reakcije podloge ispod ploče iznosi 9000 kN/m$^3$, koeficijent reakcije podloge na bazi pilota je 10000 kN/m', dok je koeficijent reakcije podloge na plaštu pilota 4500 kN/m$^3$.

Slikom 31. prikazan je tlocrtni prikaz temeljne ploče i tlocrtni raspored pilota za kombinirani temelj parno-turbinskog agregata, a ispod tlocrta shematski je prikazan koeficijent reakcije podloge na odgovarajućem mjestu i proračunatih vrijednosti.




Slika 31. Tlocrtni prikaz kombiniranog temelja temeljne ploče i pilota, te shematski prikaz reakcije podloge za temelj parno-turbinskog agregata.

Proračun nosivosti grupe pilota za temelj parno – turbinskog agregata odredio se prema Eurocodu 7 proračunskim pristupom tri. Princip proračuna je isti kao i u podnaslovu 6.4.

Parametri tla koji su se koristili prilikom proračuna prikazani su Slikom 18. Temeljnu ploču podupire 15 pilota, promjera 1 metar i duljine 10 metara. Opterećenja koja djeluju na pilote su: stalno opterećenje iznosa 17645,4 kN i povremeno opterećenje iznosa 685 kN. Iznos vlastite težine pilota je 196,35 kN, a proračunski koeficijenti na djelovanje su 1,35 za stalno djelovanje, a 1,5 za povremeno. Iznos proračunskog vertikalnog djelovanja za grupu od 21 pilota iznosi 28784,37 kN, dok iznos vertikalnog opterećenja pojedinog pilota iznosi 1918,96 kN. Prema proračunskom pristupu tri, proračunski koeficijenti za materijal su koeficijent za kut trenja iznosi 1,25, koeficijent za nedreniranu čvrstoću iznosi 1,4, a koeficijenti za otpornost iznose 1.

Iznos faktora nosivosti je 22,71, vertikalnog totalnog naprezanja je 184,6 kN/m$^2$, pornoga pritiska 40 kN/m$^2$, površina baze pilota je 0,79 m$^2$. Temeljem izraza za karakterističnu otpornost baze pilota (prikazan u podnaslovu 6.4.) i vrijednosti koje su dobivene, iznos karakteristične otpornosti baze pilota je 3469 kN.

Otpornost na plaštu pilota proračunava se kao zbroj otpornosti plašta za svaki pojedini sloj. U prvom sloju (*CH*) otpornost na plaštu pilota se proračunava kao umnožak površine plašta ($A_{s1}$) i faktora nedrenirane adhezije ($\alpha$). Karakteristična otpornost na plaštu pilota ($R_{sk}$) za prvi sloj iznosi 666 kN, a za drugi sloj (*GP/GW*) iznosi 461 kN. Zbrojem dviju otpornosti na plaštu pilota kroz dva sloja, dobije se ukupna proračunska otpornosti po plaštu pilota ($R_{sd}$) od 1128 kN. Ukupna proračunska otpornost pilota (*Rd*) iznosi 4597 kN, a računa se kao zbroj proračunske otpornosti po bazi i proračunske otpornosti po plaštu pilota.

Temeljem takvog proračuna dobiveno je da proračunsko vertikalno djelovanje jednog pilota iznosi 1918,96 kN, a ukupna proračunska otpornost pojedinog pilota iznosi 4597 kN. Omjerom tih dviju vrijednost, dobiveno je da nosivost pilota zadovoljena, jer je stupanj iskorištenosti 41,74% odnosno manji je od 100% (Arežina, 2019).

# 7. ZAKLJUČAK

Temelj, kao fundamentalan element nosivog sklopa konstrukcije, preuzima funkciju prijenosa vanjskog djelovanja s objekta na tlo. Osnova za donošenje odluke o vrsti i načinu temeljenja je procjena geotehničkih karakteristika temeljnog tla, načina prijenosa sila s građevina na tlo i okolne građevine te vrsta konstrukcije. Zadatak projektanta jest iznaći optimalno rješenje temeljenja. Ono nužno uključuje zadovoljenje kriterija graničnih stanja sloma i uporabivosti te trajnosti projektiranih konstrukcija (HRN EN 1990: 2011, 2011).

Ako podtemeljno tlo na dubini neposredno ispod najniže kote građevine zadovoljava svojstva nosivosti i slijeganja, primjenjivati će se plitko temeljenje. U suprotnom slučaju moguća je primjena neke od metoda poboljšanja tla, ili korištenje dubokog temeljenja, primjerice pilota. Kombinirano temeljenje se koristi u situacijama kada lokalni geotehnički uvjeti tla nisu pogodi za korištenje samo jedne vrste temeljenja, a sastoji se od temeljne ploče, pilota i temeljnog tla, čija je nosivost definirana međusobnom interakcijom svake pojedinačne sastavnice. Primjenom kombiniranog temeljenja želi se povećati kapacitet nosivosti temelja, smanjiti duljine i broj pilota te smanjiti ukupne deformacije i slijeganja, odnosno utjecaje savijanja na temeljnu konstrukciju.

Projekt ElTo Zagreb, odnosno izgradnja strojarnice, je jedna od zahtjevnijih građevina zbog smještaja same strojarnice, geotehničkog sastava tla koje se nalazi ispod građevine te specifičnosti opterećenja temeljnog tla. Razlog specifičnog opterećenja temeljnog tla jest dinamičko djelovanje strojeva koje se nalaze u strojarnici, odnosno na temeljnim pločama, budući da mase strojeva, rotacije i vibracije od strane turbina stvaraju dodatno opterećenje na tlo. Nakon provedenih istražnih bušenja dobivene su vrijednosti parametara temeljnog za tla, neophodnih za provedbu odgovarajućih proračuna. Provedbom proračuna za kombinirano temeljenje temeljna ploča - piloti može se zaključiti da je granična nosivost pilota zadovoljena, kao i nosivost temeljne ploče te samog sustava kombiniranog temeljenja u cjelini. Navedeno temeljenje može podnijeti teret odnosno opterećenje koje sama građevina i rad strojeva prenose na tlo.

Zaključno, u proračune je potrebno uključiti sve relevantne parametre kako bi rezultati proračuna bili što korektniji, odnosno, kako bi planirani i izvedeni temelji doista prenosili sva djelovanja u tlo, poštujući zadane kriterije. Primjerice, neuključivanjem dinamičkih opterećenje koje stvaraju strojevi, temelji ne bi bili dostatni, a osim oštećenja na zgradi i strojevima, poremećenja okolnog tla i okolnih građevina bilo bi preveliko.

# LITERATURA


1. Arežina, M. (2019). Proračuni. Prilog 004. elektroprojekt d.d. zagreb.
2. Berezantzev, V.G., Khristoforov, V.S., Golubakov, V.N. (1961). Load Bearing Capacity and Deformation of Piled Foundations. Paris: 5. International Conference on Soil Mechanic and Foundation Engineering, *2*, 11-15.
3. Dodigović, F., Grabar, K., Ivanić, K., Strelec, S. (2018). Procjena faktora poboljšanja tla primjenom MASW-a. Inženjerstvo okoliša, *5 (1-2)*, 83-92.
4. Eurocode 7 (2004).
5. Gupta, Sh. Ch. (1997). Raft Foundations. New Delhi: New Age International (P) Limited.
6. Hofer, T., Perić, Lj. (2017). Kombinirano temeljenje temeljnim pločama i pilotima. E-Zbornik, *7 (14)*, 47-75.
7. Ivandić, K. (2016). Temeljenje. Nastavni materijal. Geotehnički fakultet.
8. Katzenbach, R., Bachmann, G., Boled-Mekasha, G.,Ramm, H. (2005). Combined Pile Raft Foundations (CPRF): an appropriate solution for the foundations of the high rise buildings. Slovak Journal of Civil Engineering, 19–29.
9. Poulos, H.g., Small, J.C., Chow, H. (2011). Piled Raft Foundations for Tall Buildings. Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA, *42 (2)*, 78-83.
10. Roje-Bonacci, T. (2008). Duboko temeljenje i poboljšanje temeljnog tla. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet.

# POPIS SLIKA I TABLICA

## POPIS SLIKA

Slika 1. Shematski prikaz temelja ..... 1
Slika 2. Shematska podjela temelja ..... 2
Slika 3. Shematski prikaz redoslijeda odabira vrste temeljenja ..... 2
Slika 4. Osnovni pojmovi plitkog temelja ..... 4
Slika 5. Shematski prikaz podjele plitkih temelja, s tlocrtima i nacrtima ..... 6
Slika 6. Duboki masivni temelji izvedeni iskopom ..... 10
Slika 7. Duboki masivni temelj od mlazno injektiranih stupnjaka ..... 10
Slika 8. Piloti = duboki raščlanjeni temelji ..... 11
Slika 9. Tlocrt oblika dubokih temelja izvedenih tehnologijom dijafragmi i/ili MIP tehnologijom ..... 11
Slika 10. Faktori nosivosti prema Mayerhofu ..... 18
Slika 11. Horizontalno opterećen vertikalni pilot ..... 19
Slika 12. Zone utjecaja grupe pilota ..... 23
Slika 13. Nosivost grupe pilota ..... 24
Slika 14. Prikaz tla kao elastičnog poluprostora ..... 27
Slika 15. Model tla opisan elastičnim oprugama ..... 28
Slika 16. Shematski prikaz međudjelovanja kod kombiniranog temeljenje temeljna ploča – pilot ..... 31
Slika 17. Prikaz mogućeg smanjenja slijeganja u ovisnosti o $\alpha_{KPP}$ ..... 32
Slika 18. Geotehnički profil tla ..... 37
Slika 19. Prikaz dijagrama vrijednosti dinamičkih opterećenja ..... 38
Slika 20. Konture ukupnog slijeganja u smjeru y ($u_y$) temelja kotla na ispušne plinove ..... 41
Slika 21. Dijagram ukupnih pomaka pilota temelja kotla na ispušne plinove u smjeru y ($u_y$). 41
Slika 22. Maksimalna uzdužna sila u pilotima za temelj kotla na ispušne plinove. ..... 42
Slika 23. Tlocrtni prikaz kombiniranog temelja temeljne ploče i pilota, te shematski prikaz reakcije podloge za temelj kotla na ispušne plinove ..... 44
Slikom 24. prikazan je rezultat slijeganja proračunskog modela kombiniranog temelja plinsko-turbinskog agregata. ..... 48
Slikom 24. Konture ukupnog slijeganja u smjeru y ($u_y$) temelja plinsko-turbinskog agregata. ..... 48
Slika 25. Dijagram ukupnih pomaka pilota temelja plinsko–turbinskog agregata u smjeru y ($u_y$). ..... 49
Slika 26. Maksimalna uzdužna sila u pilotima za temelj plinsko-turbinskog agregata. ..... 49
Slika 27. Tlocrtni prikaz kombiniranog temelja temeljne ploče i pilota, te shematski prikaz reakcije podloge za temelj plinsko-turbinskog agregata ..... 50

Slika 28. Konture ukupnog slijeganja u smjeru y ($u_y$) temelja parno-turbinskog agregata. ..... 53
Slika 29. Dijagram ukupnih pomaka pilota temelja plinsko–turbinskog agregata u smjeru y ($u_y$). ..... 53
Slika 30. Maksimalna uzdužna sila u pilotima za temelj parno-turbinskog agregata. ..... 54
Slika 31. Tlocrtni prikaz kombiniranog temelja temeljne ploče i pilota, te shematski prikaz reakcije podloge za temelj parno-turbinskog agregata. ..... 55

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Geotehničke sredine predmetne lokacije ..... 35
Tablica 2. Parametri tla ..... 39
Tablica 3. Ulazni parametri za temeljnu ploču kotla na ispušne plinove ..... 39
Tablica 4. Ulazni parametri za pilote za temelj kotla na ispušne plinove ..... 39
Tablica 5. Opterećenja u y smjeru koja djeluju na temelj kotla na ispušne plinove ..... 40
Tablica 6. Ulazni parametri za temeljnu ploču plinsko-turbinskog agregata ..... 46
Tablica 7. Ulazni parametri za pilote plinsko-turbinskog agregata ..... 47
Tablica 8. Ulazni parametri za opterećenje u y smjeru za plinsko-turbinski agregat ..... 47
Tablica 9. Ulazni parametri za temeljnu ploču parno-turbinskog agregata ..... 52
Tablica 10. Ulazni parametri za pilote parno-turbinskog agregata ..... 52
Tablica 11. Opterećenje koje djeluje na temeljnu ploču parno-turbinskog agregata ..... 52