

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

*Janova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si*



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Jurij Grdešič

Temeljenje objektov na ploščah, podprtih s piloti

Diplomska naloga št.: 3047

Mentor:

izr. prof. dr. Janko Logar

Somentor:

asist. dr. Jure Klopčič

Ljubljana, 27. 1. 2009

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **JURIJ GRDEŠIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»OBJEKTI TEMELJENI NA PLOŠČAH, PODPRIH S PILOTI«

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatorke FGG.

Ljubljana, 16.01.2009

IZJAVE O PREGLEDU NALOGE

Nalogo so si ogledali učitelji konstrukcijske smeri:

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK: 624.15(043.2)
Avtor: Jurij Grdešič
Mentor: doc. dr. Janko Logar (mentor) **Somentor:** Jure Klopčič
Naslov: Objekti temeljeni na ploščah, podprtih s piloti
Obseg in oprema: 152 str., 33 pregl., 32 sl., 30 gra., 236 en.
Ključne besede: temeljenje, plošče podprte s piloti, plošče, piloti, posedki, nosilnost pilotov

Izvleček:

Diplomska naloga povzame smernice za projektiranje globokega temeljenja po standardu Evrokod 7. Sledi pregled primerov že zgrajenih objektov, ki so temeljeni na ploščah, podprtih s piloti. Objekti so opremljeni z diagrami dejanskega obnašanja objekta ter diagrami delitve obtežbe med ploščo in piloti. Navedeni so uporabni nasveti, ki jih uporabimo pri projektiranju plošče podprte s piloti. V nadaljevanju je opisana metoda projektiranja. Z njo se analitično določi posedke, diferenčne posedke in notranje sile v pilotih. Znotraj metode je potrebno določiti lastnosti temeljenja kot so: vertikalna, momentna, horizontalna nosilnost temeljenja, togost temeljne plošče, pilotov in celotnega temeljenja. Izračuna se delež obtežbe, ki ga nosijo piloti in v diagramu in se prikaže obnašanje obtežba – posedek. Opisane so metode za analitično določitev nosilnosti pod konico in po plašču pilota. Sledi izračun posedkov, diferenčnih posedkov in notranjih sil v pilotih za dejanski primer rezervoarja za skladiščenje goriva. V zadnjem delu diplomske naloge je izvedena parametrična študija. V pomoč je program MPile. Preveri se kakšen vpliv ima premer pilota, manjšanje števila pilotov pri konstantni površini plošče in obtežbi, večja razdalja med piloti pri konstantnem številu pilotov na posedke in osne sile v pilotih. Preveri se kako oblika plošče vpliva na obnašanje temeljenja. Določena je najprimernejša razporeditev pilotov s primernim premerom za primer skladišča, za katerega so izračunani posedki.

BIBLIOGRAPHIC – DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 624.15(043.2)
Author: Jurij Grdešič
Supervisor: Dr. Janko Logar Assist. Prof. **Cosupervisor:** Jure Klopčič
Title: Piled raft foundations
Notes: 152 p., 33 tab., 32 fig., 30 char., 236 eq.
Key Words: foundation, piled raft, raft, piles, settlement,
pile bearing capacity

Abstarct

The present work summarizes the guidelines required to design deep foundation by the standard Eurocode 7. The following is a review of examples of already built structures on piled rafts. The buildings are equipped with the diagrams of their actual behaviour and the diagrams of shared load between a raft and piles. The stated is a useful advice, on how to apply them when designing piled rafts. Furthermore, the method of designing is described, with which settlements, differential settlements and internal forces in the piles can be analytically defined. Within the mentioned method properties of foundation like: vertical, momentary, horizontal bearing of foundation, stiffness of a raft, piles and piled raft, have to be determined. Also the proportion of the load carried by the piles is calculated. In the diagram is shown the behaviour of a load-settlement. Described are the methods for an analytical determination of the base and skin resistance of the pile. The calculation of a settlement, differential settlement and internal forces in the pile for the actual example for a fuel reservoir follows. A parametric study is carried out in the final part of the present work. The program MPile is shown as helpful. Naturally, the influence of the diameter of pile, the reduction in the number of piles at constant surface of raft and constant load is checked. Also the impact of a larger distance between piles at constant number of them on the settlements and the axial forces within the piles is examined. It is looked into how the shape of the raft affects the behaviour of foundation. The most appropriate distribution of the piles with a suitable diameter for the purpose of storage is determined, for which the settlements are calculated.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju doc. dr. Jankotu Logarju.

Zahvalil bi se tudi svojim staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija nudila pomoč in mi stala ob strani.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	STANDARD EC7	3
2.1	Osnove geotehničnega projektiranja	3
2.1.1	Projektne zahteve	3
2.1.2	Projektna stanja.....	5
2.1.3	Trajnost	6
2.1.4	Geotehnično projektiranje na podlagi računskih analiz	6
2.1.4.1	Splošno.....	6
2.1.4.2	Vplivi.....	7
2.1.4.3	Lastnosti tal.....	9
2.1.4.4	Geometrijski podatki.....	10
2.1.4.5	Karakteristične vrednosti	10
2.1.4.5.1	Karakteristične in reprezentativne vrednosti vplivov.....	10
2.1.4.5.2	Karakteristične vrednosti geotehničnih parametrov	10
2.1.4.5.3	Karakteristične vrednosti geometrijskih podatkov.....	11
2.1.4.6	Projektne vrednosti	11
2.1.4.6.1	Projektne vrednosti vplivov	11
2.1.4.6.2	Projektne vrednosti geotehničnih parametrov	12
2.1.4.6.3	Projektne vrednosti geometrijskih podatkov.....	12
2.1.4.6.4	Projektne vrednosti lastnosti konstrukcij	13
2.1.4.7	Mejna stanja nosilnosti	13
2.1.4.7.1	Splošno.....	13
2.1.4.7.2	Kontrola statičnega ravnovesja.....	14
2.1.4.7.3	Preverjanje odpornosti za mejna stanja konstrukcije in tal pri trajnih in spremenljivih stanjih.....	15
2.1.4.7.3.1	Splošno.....	15
2.1.4.7.3.2	Projektne učinki vplivov.....	15
2.1.4.7.3.3	Projektne odpornosti.....	16

2.1.4.7.3.4	Projektne pristopi	18
2.1.4.7.4	Preverjanje in delni faktorji za dvig tal ali konstrukcije	19
2.1.4.7.5	Preverjanje odpornosti proti porušitvi zaradi hidravličnega loma tal, ki je posledica strujanja vode v tleh.....	20
2.1.4.8	Mejno stanje uporabnosti.....	21
2.1.4.9	Mejne vrednosti pomikov temeljev	21
2.1.5	Obremenilni preskusi in preskusi na eksperimentalnih modelih.....	22
2.1.6	Opazovalna metoda.....	22
2.1.7	Poročilo o geotehničnem projektu	23
2.2	Temeljenje na pilotih	24
2.2.1	Splošno	24
2.2.2	Mejna stanja	24
2.2.3	Vplivi in projektne situacije	24
2.2.3.1	Splošno	24
2.2.3.2	Vplivi zaradi pomikov tal.....	24
2.2.3.2.1	Splošno	24
2.2.3.2.2	Negativno trenje	25
2.2.3.2.3	Dvižki tal	25
2.2.3.2.4	Obtežbe prečno na os pilota	25
2.2.4	Projektne metode in konstrukcijske zahteve.....	26
2.2.4.1	Projektne metode	26
2.2.4.2	Projektne zahteve	26
2.2.5	Obremenilni preskusi pilotov.....	27
2.2.5.1	Splošno	27
2.2.5.2	Statični obremenilni preskusi	28
2.2.5.2.1	Postopek obremenitve.....	28
2.2.5.2.2	Preskusni piloti.....	28
2.2.5.2.3	Delovni piloti.....	28
2.2.5.3	Dinamični obremenilni preskusi.....	29
2.2.5.4	Poročilo o obremenilnem preskusu	29
2.2.6	Osno obremenjeni piloti	30
2.2.6.1	Splošno	30

2.2.6.1.1	Projektiranje po metodi mejnih stanj.....	30
2.2.6.2	Tlačna odpornost tal.....	30
2.2.6.2.1	Splošno.....	30
2.2.6.2.2	Mejna tlačna odpornost iz statičnih obremenilnih preskusov	31
2.2.6.2.3	Mejna tlačna odpornost, določena iz rezultatov terenskih preiskav	33
2.2.6.2.4	Mejna tlačna odp., ugotovljena z dinamičnimi obremenilnimi preskusi ..	34
2.2.6.2.5	Mejna tlačna odpornost, določena z uporabo zabijalnih obrazcev	35
2.2.6.2.6	Mejna tlačna odpornost, ugotovljena z valovno analizo	36
2.2.6.2.7	Ponovno zabijanje	36
2.2.6.3	Natezna odpornost tal	36
2.2.6.3.1	Splošno.....	36
2.2.6.3.2	Mejna natezna odpornost, ugotovljena z obremenilnimi preskusi	37
2.2.6.3.3	Mejna natezna odpornost, določena iz rezultatov terenskih preiskav	38
2.2.6.4	Navpični premiki temeljev na pilotih (uporabnost zgornje konstrukcije)	39
2.2.6.4.1	Splošno.....	39
2.2.6.4.2	Tlačno obremenjeni piloti.....	39
2.2.6.4.3	Natezno obremenjeni piloti.....	39
2.2.7	Prečno obremenjeni piloti.....	40
2.2.7.1	Splošno.....	40
2.2.7.2	Odpornost proti prečni obtežbi, ugotovljeni z obremenilnimi preskusi ...	40
2.2.7.3	Prečna odpornost pilota, določena iz rezultatov temeljnih tal in trdnostnih karakteristik pilota	41
2.2.7.4	Premiki prečno na os pilota	41
2.2.8	Dimenzioniranje pilotov	41
2.2.9	Nadzor vgradnje	42
3	PRIMERI OBJEKTOV TEMELJENIH NA PILOTIH.....	43
3.1	Stavba Messe-Torhaus, Frankfurt, 1983 – 85.....	43
3.2	Stavba Messeturm, Frankfurt, 1988 – 91	45
3.3	Stavba DG-Bank, Frankfurt, 1990 – 93.....	50
3.4	Stavba American Express, Frankfurt, 1991 – 92.....	52

3.5	Stavba Taunustor-Japan-Centre, Frankfurt, 1994 – 96.....	53
3.6	Stavba Main Tower, Frankfurt, 1996 – 99	55
3.7	Stavba Commerzbank, Frankfurt, 1994 – 97	57
3.8	Stavba v kateri je hotel, pisarne in trgovine, Niigata, Japonska, 1994	58
3.9	Biblioteka Alexandrina, Alexandria, Egipt, 1995 – 1999	60
4	PROJEKTIRANJE PLOŠČ, PODPRTIH S PILOTI	64
4.1	Uvod.....	64
4.2	Praktično projektiranje	64
4.2.1	Na kaj je treba paziti pri projektiranju	64
4.2.2	Alternativne filozofije projektiranja	65
4.2.3	Ugodne in neugodne razmere za plošče podprte z piloti	66
4.2.4	Projektiranje.....	67
4.3	Primarna faza projektiranja.....	67
4.3.1	Ocena mejne geotehnične nosilnosti.....	67
4.3.1.1	Navpična obtežba	67
4.3.1.2	Vodoravna obtežba	67
4.3.1.3	Momentna obtežba.....	68
4.3.2	Ocena odvisnosti posedkov od obtežbe	69
4.3.2.1	Takojšnji in končni posedki	72
4.3.2.2	Diferenčni posedki.....	73
4.3.3	Ocena obremenitve pilotov.....	73
4.4	Podrobnejše projektiranje	74
4.4.1	Približne metode računalniške analize.....	74
4.4.1.1	Metode, ki obravnavajo temeljenje kot trak na vzmeteh.....	74
4.4.1.2	Metode, ki obravnavajo temeljenje kot ploščo na vzmeteh	74
4.4.2	Bolj stroge numerične metode analize	75
4.4.2.1	Metoda robnih elementov.....	75
4.4.2.2	Metode, ki združujejo robne in končne elemente	75
4.4.2.3	Poenostavljena metoda končnih elementov	75
4.4.2.4	Trodimenzionalna metoda končnih elementov	76

4.5	Karakteristično obnašanje temeljenja.....	76
4.5.1	Vpliv števila pilotov in tipa obtežbe.....	76
4.5.2	Vpliv debeline plošče.....	77
4.5.3	Vpliv velikosti obtežbe.....	77
4.5.4	Priporočila za ekonomično projektiranje.....	79
5	TEORIJA.....	80
5.1	Bočna nosilnost pilotov po Bromsu.....	80
5.1.1	Piloti v homogenih koherentnih tleh.....	80
5.1.1.1	Piloti brez vpete glave.....	81
5.1.1.2	Togo vpeta glava pilota.....	83
5.1.2	Piloti v nekoherentnih tleh.....	85
5.1.2.1	Piloti brez vpete glave.....	86
5.1.2.2	Togo vpeta glava pilota.....	88
5.2	Ocena povprečne osne togosti plošče.....	90
5.3	Togost skupine pilotov.....	91
5.4	Ocena diferenčnih posedkov.....	94
5.5	Nosilnost pilota.....	97
5.5.1	Nosilnost v koherentnih tleh.....	97
5.5.1.1	Nosilnost pod konico.....	97
5.5.1.1.1	Nedrenirano stanje.....	97
5.5.1.1.2	Drenirano stanje.....	97
5.5.1.1.2.1	Kulhawy in Goodman (metoda velja za pilote zabite v kamnino).....	97
5.5.1.1.2.2	Meyerhof.....	98
5.5.1.1.2.3	Vesič.....	100
5.5.1.2	Nosilnost po plašču.....	101
5.5.1.2.1	Nedrenirano stanje.....	101
5.5.1.2.2	Drenirano stanje.....	102
5.5.2	Nosilnost v nekoherentnih tleh.....	103
5.5.2.1	Nosilnost pod konico.....	103
5.5.2.1.1	Berezantzev.....	103

5.5.2.2	Nosilnost po plašču.....	103
6	PRIMER ANALITIČNEGA RAČUNA.....	105
6.1	Klasičen pristop k projektiranju	105
6.1.1	Ocena vertikalne nosilnosti	106
6.1.2	Momentna nosilnost.....	106
6.1.3	Mejna bočna nosilnost	106
6.1.4	Posedki	107
6.2	Primer računa plošče, podprte s piloti.....	107
6.2.1	Ocena vertikalne nosilnosti	107
6.2.2	Momentna nosilnost.....	108
6.2.3	Mejna bočna nosilnost	109
6.2.4	Obnašanje obtežba – posedki.....	110
6.2.5	Diferenčni posedki.....	117
6.2.6	Sile v pilotih	118
6.3	Račun s programom MPILE	118
6.4	Primerjava rezultatov	118
7	REZERVOAR TEMELJEN NA PLOŠČI PODPRTI S PILOTI	120
7.1	Ocena vertikalne nosilnosti	120
7.1.1	Ocena vertikalne nosilnosti pilotov	120
7.1.2	Mejna nosilnost plošče	122
7.1.3	Vertikalna nosilnost temeljenja	123
7.1.4	Vertikalna nosilnost »kocke«	123
7.1.5	Mejna nosilnost temeljenja	123
7.2	Obnašanje obtežba – posedki.....	124
7.2.1	Togost plošče.....	124
7.2.2	Togost pilotov	125
7.2.3	Izračun togosti temeljenja	126
7.2.4	Izračun deleža obtežbe, ki ga nosijo piloti	126
7.2.5	Tabela in diagram obtežba – posedek.....	127

7.3	Končni in konsolidacijski posedki.....	129
7.4	Sile v pilotih.....	129
8	DELOVANJE PROGRAMA MPILE	130
8.1	Vzmeti kot nadomestilo za zemljino	130
8.2	Modeli interakcije zemljine	130
8.2.1	Model Poulosa	130
8.2.2	Model Plasti – Poulos	131
8.2.3	Model z interakcijo plošče in zemljine (Cap soil interaction)	131
8.2.4	Model z inter. plošče ter slojevitih tal (Cap layered soil interaction)	131
8.3	Računski modeli in njihove prednosti	131
8.3.1	Model Poulosa	131
8.3.2	Model Plasti – Poulos	131
8.3.3	Model Cap	131
8.3.4	Model z interakcijo plošče in zemljine (Cap soil interaction)	132
8.3.5	Model z interakcijo plošče ter slojevitih tal	132
8.3.6	Dinamični model (Dynamic).....	132
8.4	Opcije v različnih modelih	132
8.5	Kdaj uporabiti posamezen model	132
8.6	Metode analize v MPilu.....	133
8.6.1	Model Cap	133
8.6.2	Model Poulosa	133
8.6.3	Model Plasti – Poulos	134
8.6.3.1	Predstavitev	134
8.6.3.2	Plastifikacija in obnašanje pilota	134
8.6.3.3	Implementacija v MPilu.....	135
8.6.4	Model z interakcijo plošče in zemljine (Cap soil interaction)	135
8.7	Primerjava rezultatov metod.....	136
9	RAČUNSKI PRIMER – PARAMETRIČNA ŠTUDIJA	139
9.1	Posedki v odvisnosti od prereza pilota.....	140

9.2	Vpliv števila pilotov pri enaki površini in obtežbi	142
9.3	Vpliv razdalje med piloti ob konstantnem številu pilotov.....	144
9.4	Razlika med kvadratno in pravokotno ploščo.....	147
9.5	Plošča v realnem razmerju.....	149
10	ZAKLJUČEK.....	151
VIRI.....		153

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Delni faktorji za vplive (γ_F).....	14
Preglednica 2: Delni faktorji za parametre zemljin (γ_M).....	15
Preglednica 3: Delni faktorji za vplive (γ_F) ali učinke vplivov (γ_E).....	16
Preglednica 4: Delni faktorji za parametre zemljin (γ_M).....	16
Preglednica 5: Delni faktorji za odpornosti (γ_R) za plitvo temeljenje.....	17
Preglednica 6: Delni faktorji za odpornosti (γ_R) za zabite pilote.....	17
Preglednica 7: Delni faktorji za odpornosti (γ_R) za uvertane pilote.....	17
Preglednica 8: Delni faktorji za vplive (γ_F).....	19
Preglednica 9: Delni faktorji za parametre zemljin in odpornosti.....	20
Preglednica 10: Delni faktorji za vplive (γ_F).....	21
Preglednica 11: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakteristične vrednosti na podlagi statičnih obremenilnih preskusov pilotov (n – število preskušanih pilotov).....	32
Preglednica 12: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakteristične vrednosti na podlagi rezultatov terenskih preiskav (n – število profilov terenskih preiskav).....	34
Preglednica 13: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakteristične vrednosti na podlagi dinamičnih terenskih preiskav ^{a, b, c, d, e} (n – število preskušanih pilotov).....	35
Preglednica 14: Faktorji N_c^* za Vesičevo metodo izračuna nosilnosti.....	101
Preglednica 15: Faktorji N_q^* za Vesičevo metodo izračuna nosilnosti.....	101
Preglednica 16: Izračun krivulje obtežba-posedek za zgornji primer (nedrenirano stanje)...	114
Preglednica 17: Posedki izračunani s programom MPile.....	118
Preglednica 18: Primerjava rezultatov.....	118
Preglednica 19: Izračun nosilnosti pod konico pilota pod ploščo rezervoarja.....	120
Preglednica 20: Nosilnost po plašču za nedrenirano stanje.....	121
Preglednica 21: Nosilnost po plašču za drenirano stanje.....	122
Preglednica 22: Togost skupine pilotov v nedreniranih pogojih.....	125
Preglednica 23: Togost skupine pilotov v dreniranih pogojih.....	125
Preglednica 24: Izračun krivulje obtežba-posedek za primer rezervoarja za gorivo (nedrenirano stanje).....	127
Preglednica 25: Lastnosti računskih modelov v MPilu.....	132

Preglednica 26: Lastnosti sestave tal na lokaciji Rezervoarja za gorivo in skladišča avto pločevine (navedene so karakteristike slojev, ki jih potrebujemo v MPilu).....	136
Preglednica 27: Računski posedki in osne sile v pilotih za poljuben primer plošče podprte z devetimi piloti.....	137
Preglednica 28: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih v odvisnosti od premera pilota.....	140
Preglednica 29: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih v odvisnosti števila pilotov (večja razdalja med piloti) pri konstantni površini plošče.....	142
Preglednica 30: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih v odvisnosti od površine plošče (večja razdalja med piloti) pri konstantnem številu pilotov.....	144
Preglednica 31: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih pri kvadratnih ploščah različnih velikosti.....	147
Preglednica 32: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih pri pravokotnih ploščah različnih velikosti.....	147
Preglednica 33: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih pri plošči s stranicami v dejanskem razmerju.....	148

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Mejna bočna odpornost pilotov v koherentnih tleh: (a) kratki piloti; (b) dolgi piloti.....	80
Grafikon 2: Mejna bočna odpornost pilotov v nekoherentnih tleh: (a) kratki piloti; (b) dolgi piloti.....	85
Grafikon 3: Vplivni faktorji za vertikalne premike okrogle plošče.....	90
Grafikon 4: Faktorji ω iz enačbe (93).....	93
Grafikon 5: Normirani diferenčni posedki v odvisnosti od relativne togosti plošče.....	95
Grafikon 6: Normirani diferenčni posedki za skupine pilotov, kot funkcija vrednosti R	96
Grafikon 7: Faktorji nosilnosti za temeljenje na skali.....	97
Grafikon 8: Faktorji nosilnosti za globoko temeljenje.....	98
Grafikon 9: Sprememba faktorja kritične globine s kotom notranjega trenja.....	99
Grafikon 10: Faktor nosilnosti N_q po Berezantzevu.....	103
Grafikon 11: Krivulja obtežba-posedek za zgornji primer (nedrenirano stanje).....	115
Grafikon 12: Graf prikazuje, kako se spreminja vrednost obtežbe, ki jo prevzame plošča in piloti pri različnih posedkih.....	116
Grafikon 13: Grafikon prikazuje spreminjanje togosti plošče in pilotov pri povečevanju obtežbe.....	116
Grafikon 14: Raster pilotov.....	120
Grafikon 15: Krivulja obtežba-posedek za primer rezervoarja za gorivo (nedrenirano stanje).....	128
Grafikon 16: Krivulja obtežba-posedek za primer rezervoarja za gorivo (nedrenirano stanje) izračunana analitično in s programom MPile.....	128
Grafikon 17: Prikaz položaja pilotov za poljuben primer v koordinatnem sistemu x, y	137
Grafikon 18: Naraščanje posedka z večanjem obtežbe pri različnih modelih analize.....	138
Grafikon 19: Računski posedki v odvisnosti od premera pilota.....	141
Grafikon 20: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od premera pilota.....	141
Grafikon 21: Računski posedki v pilotih v odvisnosti števila pilotov (večja razdalja med piloti) pri konstantni površini plošče.....	142
Grafikon 22: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od števila pilotov (večja razdalja med piloti) pri konstantni površini plošče.....	143

Grafikon 23: Računski posedki v odvisnosti od površine plošče (večja razdalja med piloti) pri konstantnem številu pilotov.....	143
Grafikon 24: Računski posedki v odvisnosti od razdalje med piloti pri konstantnem številu pilotov.....	145
Grafikon 25: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od površine plošče (večja razdalja med piloti) pri konstantnem številu pilotov.....	146
Grafikon 26: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od razdalje med piloti pri konstantnem številu pilotov.....	146
Grafikon 27: Računski posedki v odvisnosti od števila pilotov pri kvadratni in pravokotni plošči.....	148
Grafikon 28: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od števila pilotov pri kvadratni in pravokotni plošči.....	148
Grafikon 29: Računski posedki v odvisnosti od površine plošče z dolžinami stranic v dejanskem razmerju. Trendu posedkov je dodana trendna črta z enačbo.....	149
Grafikon 30: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od površine ploče z dolžinami stranic v dejanskem razmerju.....	150

KAZALO SLIK

Slika 1: Stavba Messe-Torhaus, Frankfurt: (a) izometričen pogled; (b) lega; (c) lokacija instrumentov v temeljenju	43
Slika 2: Izmerjene krivulje obtežba-posedek za stavbo Messe-Torhaus, Frankfurt (severna plošča).....	44
Slika 3: Izmerjene krivulje obtežba-posedek temeljenja stavbe Messeturm v Frankfurtu.....	45
Slika 4: Časovna odvisnost krivulje obtežba-posedek in razdelitev obtežbe znotraj temeljenja stavbe Messeturm.....	46
Slika 5: Stavba Messeturm na plošči podprti s piloti, Frankfurt: (a) načrt in prečni prerez; (b) lokacija merilnih instrumentov.....	47
Slika 6: Rezultati opazovanja obnašanja stavbe Messeturm temelječe na plošči podprti z piloti, Frankfurt: (a) porazdelitev obtežbe in trenja po plašču po pilotih; (b) spreminjanje posedkov z globino.....	48
Slika 7: Prikaz časovno odvisnega obnašanja stavbe Messeturm temeljene na plošči podprti z piloti, Frankfurt: (a) povprečen efektiven kontakten pritisk med ploščo in tlemi; (b) sile v pilotih.....	49
Slika 8: Stavba DG-Bank, Frankfurt: (a) načrt temeljenja; (b) prečni prerez.....	50
Slika 9: Izmerjeni posedki temeljenja stavbe DG-Bank, Frankfurt.....	51
Slika 10: Opazovano obnašanje časovne odvisnosti obtežba-posedek ter porazdelitev obtežbe znotraj temeljenja stavbe DG-Bank, Frankfurt.....	51
Slika 11: Stavba American Express, Frankfurt: (a) načrt temeljenja; (b) prerez A-A.....	52
Slika 12: Stavba Japan-Centre, Frankfurt: (a) načrt temeljenja; (b) prečni prerez.....	53
Slika 13: Opazovano obnašanje temeljenja stavne Japan-Centre, Frankfurt: (a) profili posedkov; (b) krivulje obtežba-posedek.....	54
Slika 14: Prečni prerez stavbe Main Tower, Frankfurt.....	55
Slika 15: Načrt temeljenja stavbe Main Tower, Frankfurt.....	56
Slika 16: Izračunane krivulje obtežba-posedek za temeljenje stavbe Main Tower, Frankfurt.....	56
Slika 17: Uporaba globljih zemljin in talne vode za sezonsko termalno skladiščenje pri stavbi Main Tower, Frankfurt.....	57

Slika 18: Stavbni kompleks v mestu Niigata, Japonska: (a) prečni prerez; (b) načrt temeljenja.....	58
Slika 19: Prečna prereza z knjižnico Alexandrina, Egipt: (a) arhitekturni detajli; (b) detajli temeljenja.....	60
Slika 20: Krivulje temeljenja obtežba-posedek pri različnih filozofijah projektiranja.....	66
Slika 21: Vpliv števila pilotov na obnašanje temeljenja na hipotetičnem primeru (skupna obtežba 12 MN): (a) maksimalni posedki; (b) diferenčni posedki; (c) maksimalni upogibni momenti; (d) proporcija obtežbe, ki jo nosijo piloti.....	77
Slika 22: Vpliv debeline plošče na obnašanje temeljenja na hipotetičnem primeru (skupna obtežba znaša 12 MN): (a) maksimalni posedki; (b) diferenčni posedki; (c) maksimalni upogibni moment; (d) delež obtežbe, ki jo nosijo piloti.....	78
Slika 23: Krivulje obtežba-posedek za različne sisteme plošč podprtih s piloti (koncentrirana obtežba).....	79
Slika 24: Odklon, reakcija tal in upogibni moment za bočno obremenjene kratke pilote v koherentnih tleh.....	81
Slika 25: Porušni mehanizem bočno obremenjenega dolgega pilota v koherentnih tleh.....	82
Slika 26: Porušni mehanizem bočno obremenjenega vpetega pilota v koherentnih tleh: (a) kratek pilot; (b) srednje dolg pilot; (c) dolg pilot.....	83
Slika 27: Porušni mehanizem bočno obremenjenega kratkega pilota v nekoherentnih tleh....	86
Slika 28: Porušni mehanizem bočno obremenjenega dolgega pilota v nekoherentnih tleh....	87
Slika 29: Porušni mehanizem vpetega pilota v nekoherentnih tleh: (a) kratki piloti; (b) srednje dolgi piloti; (c) dolgi piloti.....	88
Slika 30: Posamezen osno obremenjen pilot: (a) trenjski pilot; (b) pilot, ki nosi pod konico..	91
Slika 31: Primer temeljenja.....	105
Slika 32: Primer skupine pilotov iz programa MPile.....	139

1 UVOD

Za globoko temeljenje se odločimo, kadar s plitvim temeljenjem ne zadostimo kriteriju mejnega stana nosilnosti ali so absolutni in/ali diferenčni posedki temeljev oziroma zasuki temeljev take velikosti, da jih objekt ne more prenesti. Če je horizontalna obtežba za plitev temelj prevelika ali obstaja nevarnost erozije pod dnom plitvega temelja, uporabimo globoko temeljenje. V diplomski nalogi se posvetim temeljnim ploščam, podprtim s piloti kot vrsti temeljenja. V primeru, ko celotno projektno obtežbo prevzamejo piloti, pravimo, da gre za popolnoma s piloti podprto konstrukcijo. Ker pa je plošča prav tako sestavni del temeljenja, prispeva k nosilnosti. Takšen sistem temeljenja je bolj ekonomičen, saj k nosilnosti prispeva tako plošča kot piloti. Uporablja pa se tudi taka raba pilotov, pri kateri so piloti le na določenih mestih, da zmanjšajo diferenčne posedke.

Začetek diplomske naloge namenimo spoznavanju standarda SIST EN 1997-1. V njem najdemo splošne enačbe in smernice za projektiranje temeljne konstrukcije. V dodatku standarda najdemo delne faktorje odpornosti, korelacijske faktorje, opisani pa so tudi nekateri računski postopki. Podana so projektna stanja, katera je potrebno upoštevati pri projektiranju geotehničnih konstrukcij. Evrokod 7 je zelo dober vodnik, prepušča veliko svobode izkušnjam.

V drugem delu navedemo nekaj primerov že obstoječih objektov, ki so temeljeni na plošči podprti s piloti. Na njih je vidno, kako so si projektanti konstruktivno zamislili temeljenje in pa obnašanje le tega. Na več primerih je prikazana delitev obtežbe med ploščo in piloti v različnih časovnih obdobjih. Za več objektov je prikazana odvisnost obtežba – posedek.

Tretji del namenimo nasvetom pri projektiranju plošče podprte s piloti. Tukaj navedemo ugodne pogoje za uporabo plošče podprte s piloti. Opisana je preliminarna faza projektiranja s pomembnejšimi enačbami za določitev posedkov, diferenčnih posedkov in osnih sil v pilotih.

V četrtem poglavju se posvetimo teoretičnemu opisu metod za določitev horizontalne nosilnosti pilotov, osne togosti plošče in skupine pilotov ter diferenčnih posedkov. Sledijo analitični postopki za določitev nosilnosti pilota pod konico in po plašču.

V petem delu obravnavamo preprost primer plošče podprte s piloti. Na primeru je detajlno opisan postopek izračuna posedkov in diferenčnih posedkov ter notanjih sil v pilotih. Opisani

so izračuni nosilnosti pilotov in plošče. Izračunan je delež obtežbe, ki ga prevzamejo piloti. Ko poznamo vrednost za togost temeljenja, določimo še posedke.

V šestem poglavju prikazujemo izračun posedkov in diferenčnih posedkov ter notranjih sil v pilotih na realnem primeru rezervoarja za gorivo.

V zadnjem delu diplomske naloge prikažemo, kako določene lastnosti temeljev vplivajo na obnašanje temeljenja. V pomoč je program MPile, katerega delovanje opišemo v posebnem poglavju. S pomočjo programa preverimo, kako prerez pilota vpliva na posedke in osne sile v pilotih. Zanima nas tudi vpliv manjšanja števila pilotov pri konstantni površini plošče in obtežbi ter vpliv razdalje med piloti pri konstantnem številu pilotov. Odziv temeljenja prikažemo na diagramih in v tabelah. Primerjamo razliko v obnašanju pravokotne in kvadratne plošče. Iz teh spoznanj določimo najprimernejšo razporeditev pilotov s primernim premerom za primer skladišča. Za to skladišče določimo posedek.

2 STANDARD EC7

2.1 Osnove geotehničnega projektiranja

2.1.1 Projektne zahteve

Pri vsakem geotehničnem projektnem stanju je treba preveriti, da ne presega nobenega pomembnega mejnega stanja, opredeljenega v EN 1990:2002.

Pri določanju geotehničnih projektnih stanj in mejnih stanj je potrebno upoštevati naslednje dejavnike:

- lokalne pogoje glede na globalno stabilnost in premike v tleh,
- naravo in velikost objekta ter njegovih elementov vključno z vsemi posebnimi zahtevami, kot je projektna življenjska doba,
- pogoje glede okolice (npr. sosednje konstrukcije, promet, infrastruktura, vegetacija, nevarne kemikalije),
- sestavo in lastnosti tal,
- pogoje glede podtalnice,
- regionalno potresno ogroženost,
- vplive okolja (hidrologija, površinske vode, pogrezanje, sezonske spremembe temperature in vlage).

Da bi se določile minimalne zahteve glede obsega in vsebine geotehničnih preiskav, izračunov in nadzora gradnje, je treba ugotoviti zahtevnost vsakega geotehničnega projekta in z njim povezanega tveganja. Še zlasti je treba razlikovati med:

- lahкими in preprostimi konstrukcijami ter manjšimi zemeljskimi deli, za katere je z zanemarljivim tveganjem mogoče zagotoviti, da bo že na podlagi izkušenj in kvalitativnih geotehničnih preiskav zadoščeno minimalnim zahtevam,
- drugimi geotehničnimi konstrukcijami.

Za določitev zahtev geotehničnega projektiranja se lahko vpeljejo tri geotehnične kategorije: 1, 2 in 3.

Predhodno uvrstitev konstrukcije v geotehnično kategorijo se ponavadi izvede pred geotehničnimi preiskavami. Kategorija se preveri in po potrebi spremeni v fazi projektiranja in gradnje.

Različni vidiki projekta lahko zahtevajo obravnavo v različnih geotehničnih kategorijah. Ni treba, da se celoten objekt obravnava glede na najvišjo od teh kategorij.

Geotehnična kategorija 1 vključuje majhne in relativno preproste konstrukcije:

- pri katerih je mogoče zagotoviti, da bodo osnovne zahteve izpolnjene na podlagi izkušenj in kvalitativnih geotehničnih preiskav,
- z zanemarljivim tveganjem.

Geotehnična kategorija 2 vključuje običajne vrste konstrukcij in temeljenja brez izjemnega tveganja ali zahtevnih tal ter obremenitev.

Projekti za konstrukcije v geotehnični kategoriji 2 morajo vsebovati kvantitativne geotehnične podatke in analize, da se zagotovi izpolnjevanje bistvenih projektnih zahtev.

Za projektiranje in izvedbo geotehnične kategorije 2 se lahko uporabijo rutinski postopki za terensko in laboratorijsko preizkušanje.

OPOMBA: Spodaj so navedeni primeri običajnih konstrukcij ali delov konstrukcij, ki ustrezajo geotehnični kategoriji 2:

- plitvi temelji,
- temeljne plošče,
- **temelji na pilotih,**
- stene ali druge konstrukcije, ki opirajo ali podpirajo vodo ali zemljino,
- izkopi,
- oporniki premostitvenih objektov,
- nasipi in druga zemeljska dela, vse vrste zemeljskih sider,
- predori v trdni, nerazpokani kamnini, za katere ni posebnih zahtev glede vodotesnosti ali drugih posebnih zahtev.

Geotehnična kategorija 3 vsebuje konstrukcije ali dele konstrukcij, ki ne sodijo v geotehnični kategoriji 1 in 2.

Geotehnična kategorija 3 ponavadi vsebuje alternativne predpise in pravila glede na določila tega standarda.

OPOMBA: Geotehnična kategorija 3 vsebuje naslednje primere:

- zelo velike in nenavadne konstrukcije,
- konstrukcije, ki vključujejo neobičajno velika tveganja ali izjemno zahtevne pogoje tal ali obtežbe,
- konstrukcije na področjih z veliko seizmičnostjo,
- konstrukcije na področjih, kjer obstaja verjetnost nestabilnosti terena ali stalnih premikov tal, kar zahteva ločene dodatne preiskave ali posebne ukrepe.

2.1.2 Projektna stanja

Upoštevat je potrebno kratkotrajna in dolgotrajna projektna stanja.

V geotehničnem projektu morajo podrobne specifikacije projektnih stanj glede na naravo projekta upoštevati:

- vplive, njihove kombinacije in obtežne primere,
- splošno ustreznost tal, na katerih se nahaja konstrukcija, glede na globalno stabilnost in premike tal,
- razporeditev in klasifikacijo različnih plasti zemljin, kamnin in elementov konstrukcije, vključenih v računski model,
- smer vpada plastovitosti,
- rudarjenje, podzemne jame ali druge podzemne zgradbe,
- pri konstrukcijah, ki stojijo na kamninah ali so te v neposredni bližini:
 - menjave trdnih in mehkih plasti,
 - prelomnice, razpoke in mikrorazpoke,
 - možno nestabilnost blokov kamenine,
 - votline, ki nastanejo kot posledica raztapljanja kamenin, kot so požiralniki, ali pa razpoke, zapolnjene z mehkim materialom, ter aktivne procese raztapljanja kamenin,
- okolje, v katerega je postavljen projekt, ki vsebuje:
 - učinke izpiranja, erozije in izkopavanj, ki vodijo do sprememb v geometriji površine tal,
 - učinke kemijske korozije,
 - učinke preperevanja,

- učinke zmrzovanja,
 - učinke dolgotrajne suše,
 - spremembe nivoja podtalnice, vključujoč npr. učinke odvodnjavanja, možnosti poplavljanja, okvar v drenažnem sistemu, izkoriščanja vode,
 - prisotnost zemeljskih plinov, ki izhajajo iz tal,
 - druge časovne in prostorske učinke na trdnost in druge lastnosti materialov, npr. učinek votlin, ki jih napravijo živali,
- potrese,
 - premike tal zaradi pogrezanja tal kot posledice rudarjenja ali drugih dejavnosti,
 - občutljivost konstrukcije na deformacije,
 - učinke nove konstrukcije na obstoječe konstrukcije, komunalne vode in lokalno okolje.

2.1.3 Trajnost

V fazi geotehničnega projektiranja je treba oceniti pomembnost okoljskih pogojev glede na trajnost in predvideti ukrepe za zaščito ali ustrezno odpornost materialov.

2.1.4 Geotehnično projektiranje na podlagi računskih analiz

2.1.4.1 Splošno

Projektiranje na podlagi računskih analiz mora biti v skladu z osnovnimi zahtevami EN 1990:2002 in s posameznimi pravili tega standarda. Projektiranje na podlagi računskih analiz vsebuje:

- vplive, ki so lahko bodisi vsiljene obtežbe bodisi pomiki, npr. zaradi premikov tal,
- karakteristike zemljin, kamenin in drugih materialov,
- geometrijske podatke,
- mejne vrednosti deformacij, širin razpok, vibracij itd.,
- računske modele.

Računski model mora opisati predvideno obnašanje tal v obravnavanem mejnem stanju.

Kadar za določeno mejno stanje ni na voljo zanesljivega računskega modela, je treba izvesti analizo drugega mejnega stanja z uporabo faktorjev, ki zagotavljajo, da je preseganje prvega mejnega stanja dovolj malo verjetno. Alternativa temu je projektiranje s predpisovanjem ukrepov, eksperimentalnimi modeli in obremenilnimi preizkusi ali z opazovano metodo.

Vsak računski model mora biti bodisi točen bodisi so njegovi rezultati na varni strani.

Kadar je v analizi uporabljen empirični postopek, mora biti jasno ugotovljeno, da je ta postopek ustrezen za prevladujoče pogoje v tleh.

2.1.4.2 Vplivi

Definicija vplivov je navedena v EN 1990:2002. Kjer je to potrebno, je treba upoštevati vrednosti vplivov iz EN 1991.

Za uporabo v izračunu je treba izbrati vrednosti geotehničnih vplivov, saj so vrednosti znane, preden se izvede račun. Med računanjem se vrednosti geotehničnih vplivov lahko spremenijo.

OPOMBA: Vrednosti geotehničnih vplivov se med potekom računa lahko spremenijo. V teh primerih se začne izračun s predhodno znano vrednostjo kot začetnim približkom.

Pri določanju vplivov, ki se upoštevajo v projektu, je treba upoštevati kakršnekoli interakcije med tlemi in zemljino.

V geotehničnem projektu morajo biti kot možni vplivi upoštevani:

- teža zemljin, kamnin in vode,
- napetosti v tleh,
- zemeljski pritiski,
- pritiski površinske vode, vključno s pritiski valov,
- pritiski podtalnice,
- strujne sile
- lastne teža konstrukcij in druge obtežbe, ki izvirajo iz konstrukcij,
- dodatne obremenitve tal,
- sile zaradi priveza plovil,

- odstranitev obtežbe ali izkop zemljine,
- prometne obremenitve,
- premiki zaradi rudarjenja ali gradnje predorov ali gradnje drugih podzemnih prostorov,
- nabrekanje in krčenje, ki ju povzročajo vegetacija, podnebje ali spremembe vlage,
- premiki zaradi lezenja ali plazenja ali posedanja zemeljskih mas,
- premiki zaradi preperevanja, disperzije glin, razpadanja, sesedanja in raztapljanja,
- premiki in pospeški, ki jih povzročijo potresi, eksplozije, vibracije in dinamične obtežbe,
- vplivi temperature, vključno z delovanjem zmrzali,
- obremenitev zaradi ledu,
- sile prednapetja sider ali razpor,
- negativno trenje.

Upoštevati je treba možnost, da spremenljivi vplivi delujejo ločeno ali skupaj.

Trajanje vplivov je treba upoštevati glede na časovne učinke pri materialnih lastnostih zemljin, zlasti drenažnih lastnosti in stisljivosti drobnozrnatih zemljin.

Ponavljajoče se vplive in vplive s spremenljivo intenziteto je treba posebej obravnavati glede na npr. kontinuirne premike, utekočinjenje tal, spremembo togosti in trdnosti tal.

Pozorno je treba opredeliti in obravnavati vplive, ki povzročijo dinamični odziv v konstrukciji in v tleh.

Pozorno je treba opredeliti in obravnavati vplive, pri katerih prevladujejo sile podtalne in površinske vode glede na deformacije, razpokanost, spremenljivo vodo prepustnost in erozijo.

OPOMBA: Neugodni (ki zmanjšujejo stabilnost) in ugodni (ki večajo stabilnost) stalni vplivi lahko v nekaterih primerih izhajajo iz istega vira. Kadar se upoštevajo na tak način, se lahko uporabi en sam delni faktor na vsoto teh vplivov ali na vsoto njihovih učinkov.

2.1.4.3 Lastnosti tal

Lastnosti zemljin in kamenin, ki se za projektne izračune opredelijo z geotehničnimi parametri, je treba pridobiti iz rezultatov preskusov neposredno ali prek korelacij, teorije ali empirično ter iz drugih ustreznih podatkov.

Vrednosti, ki se dobijo iz rezultatov preizkusov in drugih podatkov, je treba interpretirati ustrezno glede na obravnavano mejno stanje.

Upoštevati je treba možne razlike med lastnostmi tal in geotehničnimi parametri, dobljenimi iz rezultatov preizkusov, in tistimi, ki določajo obnašanje geotehnične konstrukcije.

Razlike, o katerih govori prejšnji odstavek, so posledica naslednjih dejavnikov:

- mnogi geotehnični parametri niso prave konstante, ampak so odvisni od ravni napetosti in načina deformiranja,
- zgradba zemljin in kamenin (npr. mikrorazpoke, laminacija, večja zrna itd.) lahko igra različno vlogo v preskusu in pri geotehnični konstrukciji,
- časovni učinki,
- učinki mehčanja zaradi pronicanja vode na trdnost zemljine ali kamenine,
- učinki mehčanja zaradi dinamičnih vplivov,
- krhkost ali duktilnost preskušane zemljine in kamnine,
- metoda gradnje geotehnične konstrukcije,
- vpliv izvedbe na lastnosti umetno vgrajenih ali izboljšanih tal,
- učinek gradbenih del na lastnosti tal.

Po potrebi je treba skladno z EN 1997-2 rezultate laboratorijskih ali terenskih preskusov pretvoriti v vrednosti, ki predstavljajo obnašanje zemljin in kamnin v tleh pri obravnavanem mejnem stanju. Pri tem je treba uporabiti kalibracijske faktorje oziroma je treba upoštevati korelacije, uporabljene pri ovrednotenju dobljenih vrednosti iz rezultatov preizkusov.

2.1.4.4 Geometrijski podatki

Kot geometrijske podatke je treba obravnavati nivo in nagnjenost površine tal, nivoje vode, nivoje mejnih ploskev med plastmi, nivoje izkopov in dimenzije geotehnične konstrukcije.

2.1.4.5 Karakteristične vrednosti

2.1.4.5.1 Karakteristične in reprezentativne vrednosti vplivov

Karakteristične in reprezentativne vrednosti vplivov je treba določiti v skladu z EN 1990:2002 in različnimi deli EN 1991.

2.1.4.5.2 Karakteristične vrednosti geotehničnih parametrov

Izbira karakterističnih vrednosti geotehničnih parametrov mora temeljiti na rezultatih in dobljenih vrednostih iz laboratorijskih preskusov, dopolnjenih z uveljavljenimi izkušnjami.

Karakteristično vrednost geotehničnega parametra je treba izbrati kot varno oceno vrednosti, ki vpliva na pojav mejnega stanja.

Večjo varianco c' v primerjavi s $\tan\phi'$ je treba upoštevati pri določanju njihovih karakterističnih vrednosti.

Izbira karakterističnih vrednosti geotehničnih parametrov mora upoštevati:

- geološke in druge spremljajoče informacije, kot so podatki iz prejšnjih projektov,
- spremenljivost vrednosti merjene lastnosti in druge ustrezne informacije npr. iz obstoječega znanja,
- obsežnost terenskih in laboratorijskih preiskav,
- vrsto in število vzorcev,
- obsežnost območja tal, ki bistveno vpliva na obnašanje geotehnične konstrukcije v obravnavanem mejnem stanju,
- zmožnost geotehnične konstrukcije, da prenese obremenitve s šibkih na trdnejša območja v tleh.

Pri vsakem izračunu je treba uporabiti najneugodnejšo kombinacijo spodnjih in zgornjih vrednosti neodvisnih parametrov.

2.1.4.5.3 Karakteristične vrednosti geometrijskih podatkov

Karakteristične vrednosti nivojev tal ter podtalnice ali površinske vode morajo biti izmerjeni, nazivni ali ocenjeni zgornji ali spodnji nivoji.

2.1.4.6 Projektne vrednosti

2.1.4.6.1 Projektne vrednosti vplivov

Projektno vrednost vpliva je potrebno določiti v skladu z EN 1990:2002.

Projektno vrednost vpliva (F_d) je treba določiti neposredno ali pa iz reprezentativnih vrednosti z uporabo enačbe:

$$F_d = \gamma_F \cdot F_{rep} \quad (1)$$

γ_F ...delni faktor za vplive, ki upošteva možnost neugodnih odklonov vrednosti vpliva od reprezentativne vrednosti

F_d ...projektna vrednost vpliva

F_{rep} ...reprezentativna vrednost vpliva

$$F_{rep} = \psi \cdot F_k \quad (2)$$

F_k ...karakteristična vrednost vpliva

ψ ...faktor za izračun reprezentativne vrednosti iz karakteristične vrednosti

Ustrezne vrednosti ψ je treba vzeti iz EN 1990:2002

V enačbi (1) je treba uporabiti vrednosti delnega faktorja γ_F za trajna in spremenljiva stanja iz preglednice 1, preglednice 3, preglednice 8 in preglednice 10.

Kadar so prisotni tlaki podtalnice pri mejnih stanjih z resnimi posledicami (v splošnem so to mejna stanja nosilnosti), morajo projektne vrednosti predstavljati najneugodnejše vrednosti, ki se lahko pojavijo med projektno življenjsko dobo konstrukcije. Za mejna stanja z manj resnimi posledicami (v splošnem so to mejna stanja uporabnosti) morajo biti projektne vrednosti najneugodnejše vrednosti, ki se lahko pojavijo pri normalnih pogojih.

2.1.4.6.2 Projektne vrednosti geotehničnih parametrov

Projektne vrednosti geotehničnih parametrov je treba določiti bodisi z iz karakterističnih vrednosti z uporabo enačbe (3) ali pa neposredno:

$$X_d = \frac{X_k}{\gamma_M} \quad (3)$$

γ_M ...delni faktor za materialno lastnost zemljine, ki upošteva tudi nezanesljivost modela

X_d ...projektna vrednost materialne lastnosti

X_k ...karakteristična vrednost materialne lastnosti

V enačbi (3) je treba uporabiti vrednosti delnega faktorja γ_M za trajna in spremenljiva stanja iz preglednice 2, preglednice 4 in preglednice 9.

2.1.4.6.3 Projektne vrednosti geometrijskih podatkov

Delna faktorja z vplive in za materialne lastnosti (γ_F in γ_M) zajemata tudi manjša odstopanja v geometrijskih podatkih, zato v takih primerih ni potrebna dodatna varnost na geometrijske podatke.

Kadar odstopanja v geometrijskih podatkih pomembno vplivajo na zanesljivost konstrukcije, je treba projektne vrednosti geometrijskih podatkov (a_d) bodisi določiti neposredno bodisi iz nazivnih vrednosti z uporabo enačbe:

$$a_d = a_{nom} \pm \Delta a \quad (4)$$

Δa ...sprememba nazivne vrednosti geometrijskega podatka za določen projektni namen

a_d ...projektne vrednost geometrijskega podatka

a_{nom} ...nazivna vrednost geometrijskega podatka

2.1.4.6.4 Projektne vrednosti lastnosti konstrukcij

Projektne vrednosti za trdnost konstrukcijskih materialov in projektne odpornosti konstrukcijskih elementov je treba izračunati v skladu z EN 1992 do EN 1996 in EN 1999.

2.1.4.7 Mejna stanja nosilnosti

2.1.4.7.1 Splošno

Preveriti je treba, ali niso prekoračena za projekt značilna mejna stanja iz spodnjega seznama:

- Izguba statičnega ravnotežja konstrukcije ali tal kot togega telesa, pri čemer trdnosti materialov konstrukcije in tal niso pomembne pri zagotavljanju odpornosti (**EQU**ilibrium),
- Notranja odpoved ali pretirana deformacija konstrukcije ali konstrukcijskih elementov vključno s temelji, piloti, kletnimi stenami itd., kjer je za zagotavljanje odpornosti pomembna trdnost materialov v konstrukciji (**STR**ucture),
- Odpoved ali pretirana deformacija tal, pri čemer je za zagotavljanje odpornosti pomembna trdnost zemljine ali kamenine (**GEO**technical),
- Izguba ravnotežje konstrukcije ali tal zaradi dviga kot posledica vodnega pritiska (vzgon) ali drugih navpičnih vplivov (**UPL**ift),
- Hidravlični lom tal, notranja erozija in tvorba podzemnih poti vode v tleh kot posledica hidravličnih gradientov (**HYD**raulic).

OPOMBA: Mejno stanje GEO je pogosto odločilno za izbiro velikosti elementov temeljnih konstrukcij ali podpornih konstrukcij in včasih tudi za izbiro trdnosti konstrukcijskih elementov.

Uporabiti je treba delne faktorje za trajna in spremenljiva stanja iz dodatka A v EN 1997-1:2005.

2.1.4.7.2 Kontrola statičnega ravnovesja

Pri obravnavi mejnega stanja statičnega ravnovesja ali mejnega stanja globalnih premikov konstrukcije ali tal (EQU) je treba preveriti, da velja:

$$E_{dst,d} \leq E_{stb,d} + T_d \quad (5)$$

$$E_{dst,d} = E\{\gamma_F F_{rep}, X_k / \gamma_M, a_d\}_{dst} \quad (6)$$

$$E_{stb,d} = E\{\gamma_F F_{rep}, X_k / \gamma_M, a_d\}_{stb} \quad (7)$$

$E_{dst,d}$...projektna vrednost učinka vpliva, ki povečuje stabilnost

$E_{stb,d}$...projektna vrednost učinka vpliva, ki zmanjšuje stabilnost

T_d ...projektna vrednost celotne strižne odpornosti, ki se razvije v obodu bloka tal, v katerem so vgrajeni natezni piloti, ali na delu konstrukcije, ki je v stiku s tlemi

V enačbi (5) je treba uporabiti delne faktorje za trajna in spremenljiva stanja:

Preglednica 1: Delni faktorji za vplive (γ_F)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 110)

Vplivi	Oznaka	Vrednost
Stalni		
Neugodni ^a	$\gamma_{G;dst}$	1,10
Ugodni ^b	$\gamma_{G;stb}$	0,90
Začasni		
Neugodni ^a	$\gamma_{Q;dst}$	1,50
^a Zmanjšuje stabilnost.		
^b Povečuje stabilnost.		

Preglednica 2: Delni faktorji za parametre zemljin (γ_M)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 111)

Parameter zemljine	Oznaka	Vrednost
Kot strižne odpornosti *	$\gamma_{\phi'}$	1,25
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1,25
Nedrenirana strižna trdnost	γ_{cu}	1,4
Enoosna tlačna trdnost	γ_{qu}	1,4
Prostorninska teža	γ_{γ}	1,4
* Faktor se uporabi za $\tan \phi'$		

OPOMBA: Statično ravnovesje EQU je pomembno predvsem pri projektiranju konstrukcij. Pri geotehničnih projektih bo preverjanje mejnega stanja EQU omejeno na redke primere, kot so togi temelji na kamninski podlagi, in je v osnovi različno od preverjanja globalne stabilnosti ali problemov vzgona. Kadar se pri tem upošteva kakršenkoli strižni odpor T_d , mora ta imeti majhen vpliv.

2.1.4.7.3 Preverjanje odpornosti za mejna stanja konstrukcije in tal pri trajnih in spremenljivih stanjih

2.1.4.7.3.1 Splošno

Pri preverjanju mejnega stanja loma ali prekomerne deformacije konstrukcijskega elementa ali dela tal (STR in GEO) je treba zagotoviti, da je:

$$E_d \leq R_d \quad (8)$$

E_d ...projektna vrednost učinka vpliva

R_d ...projektna vrednost odpornosti proti vplivu

2.1.4.7.3.2 Projektni učinki vplivov

Delni faktorji za vplive se lahko uporabljajo neposredno za vplive (F_{rep}) ali njihove učinke (E):

$$E_d = E\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\} \quad (9)$$

ali

$$E_d = \gamma_E E\{F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\} \quad (10)$$

Preglednica 3: Delni faktorji za vplive (γ_F) ali učinke vplivov (γ_E)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 111)

Vpliv		Oznaka	Nabor	
			A1	A2
Stalni	Neugodni	γ_G	1,35	1,0
	Ugodni		1,0	1,0
Spremenljivi	Neugodni	γ_Q	1,5	1,3
	Ugodni		0	0

Preglednica 4: Delni faktorji za parametre zemljin (γ_M)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 112)

Parameter zemljine	Oznaka	Nabor	
		M1	M2
Kot strižne odpornosti *	$\gamma_{\phi'}$	1,0	1,25
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1,0	1,25
Nedrenirana strižna trdnost	γ_{cu}	1,0	1,4
Enoosna tlačna trdnost	γ_{qu}	1,0	1,4
Prostorninska teža	γ_{γ}	1,0	1,0
* Faktor se uporabi za $\tan \phi'$			

2.1.4.7.3.3 Projektne odpornosti

Delni faktorji se lahko uporabijo za lastnosti tal (X) ali za odpornosti (R) ali za oboje, kot sledi:

$$R_d = R\{\gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d\} \quad (11)$$

ali

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k; a_d \} / \gamma_R \quad (11)$$

ali

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} / \gamma_R \quad (13)$$

Preglednica 5: Delni faktorji za odpornosti (γ_R) za plitvo temeljenje

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 112)

Odpornost	Oznaka	Nabor		
		R1	R2	R3
Nosilnost	$\gamma_{R:v}$ (za nosilnost tal)	1,0	1,4	1,0
Zdrs	$\gamma_{R:h}$ (za odpornost proti zdrs)	1,0	1,1	1,0

Preglednica 6: Delni faktorji za odpornosti (γ_R) za zabite pilote

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 113)

Odpornost	Oznaka	Nabor			
		R1	R2	R3	R4
Konica	γ_b	1,0	1,1	1,0	1,3
Plašč (tlak)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
Celotna/kombinirana (tlak)	γ_t	1,0	1,1	1,0	1,3
Plašč v nategu	$\gamma_{s;t}$	1,25	1,15	1,1	1,6

Preglednica 7: Delni faktorji za odpornosti (γ_R) za uvertane pilote

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 113)

Odpornost	Oznaka	Nabor			
		R1	R2	R3	R4
Konica	γ_b	1,25	1,1	1,0	1,6
Plašč (tlak)	γ_s	1,0	1,1	1,0	1,3
Celotna/kombinirana (tlak)	γ_t	1,15	1,1	1,0	1,5
Plašč v nategu	$\gamma_{s;t}$	1,25	1,15	1,1	1,6

γ_b ...za odpornost pod konico pilota,

γ_s ...za odpornost po plašču pri tlačno obremenjenih pilotih,

γ_t ...za celotno/kombinirano odpornost tlačno obremenjenih pilotov,

$\gamma_{s;t}$...za odpornost po plašču pri natezno obremenjenih pilotih.

2.1.4.7.3.4 Projektni pristopi

Način uporabe enačb (9) – (13) je treba določiti z uporabo enega od treh projektnih pristopov.

Projektni pristop 1

Z izjemo projektiranja osno obremenjenih pilotov in sider je treba preveriti, da ne bo prišlo do mejnega stanja porušitve ali prekomernih deformacij za katerokoli od naslednjih kombinacij naborov delnih faktorjev:

kombinacija 1: A1 "+" M1 "+" R1

kombinacija 2: A2 "+" M2 "+" R1

kjer "+" pomeni "v kombinaciji z"

OPOMBA: Pri kombinacijah 1 in 2 se delni faktorji uporabljajo za vplive in parametre trdnosti tal

Pri projektiranju osno obremenjenih pilotov in sider je treba preveriti, da ne bo prišlo do mejnega stanja porušitve ali prekomernih deformacij za katerokoli od naslednjih kombinacij naborov delnih faktorjev:

kombinacija 1: A1 "+" M1 "+" R1

kombinacija 2: A2 "+" (M1 ali M2) "+" R4

OPOMBA 1: Pri kombinaciji 1 se uporabijo delni faktorji za vplive in parametre trdnosti tal. Pri kombinaciji 2 se uporabijo delni faktorji za vplive, odpornosti tal in v nekaterih primerih za parametre trdnosti tal.

OPOMBA 2: Pri kombinaciji 2 se nabor delnih varnostnih faktorjev M1 uporablja za račun odpornosti pilotov ali sider, nabor M2 pa za izračun neugodnih vplivov na pilote, kot sta npr. negativno trenje ali prečna obtežba.

Projektni pristop 2

Preveriti je potrebno, da ne bo prišlo do mejnega stanja porušitve ali prekomernih deformacij za naslednjo kombinacijo naborov delnih faktorjev:

kombinacija: A1 "+" M1 "+" R2

Projektni pristop 3

Preveriti je potrebno, da ne bo prišlo do mejnega stanja porušitve ali prekomernih deformacij za naslednjo kombinacijo naborov delnih faktorjev:

kombinacija: (A1* ali A2^a) "+" M1 "+" R2

* za vplive, ki izvirajo iz konstrukcij

^a za geotehnične vplive

2.1.4.7.4 Preverjanje in delni faktorji za dvig tal ali konstrukcije

Preverjanje dviga tal ali konstrukcije (UPL) se izvede tako, da se preveri ali je projektna varnost stalnih in spremenljivih navpičnih vplivov, ki zmanjšujejo stabilnost ($V_{dst;d}$), manjša ali enaka vsoti projektne vrednosti stalnih navpičnih vplivov, ki povečujejo stabilnost ($G_{stb;d}$), in projektne vrednosti katerekoli dodatne odpornosti proti dvigu (R_d):

$$V_{dst,d} = G_{dst,d} + Q_{dst,d} \leq G_{stb,d} + R_d \quad (14)$$

V enačbi (14) je treba uporabiti vrednosti delnih faktorjev za $G_{dst;d}$, $Q_{dst;d}$, $G_{stb;d}$ in R_d za trajna in sprejemljiva stanja:

Preglednica 8: Delni faktorji za vplive (γ_F)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 116)

Vplivi	Oznaka	Vrednost
Stalni		
Neugodni ^a	$\gamma_{G;dst}$	1,0
Ugodni ^b	$\gamma_{G;stb}$	0,9
Začasni		
Neugodni ^a	$\gamma_{Q;dst}$	1,5
^a Zmanjšuje stabilnost.		
^b Povečuje stabilnost.		

Preglednica 9: Delni faktorji za parametre zemljin in odpornosti

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 116)

Parameter zemljine	Oznaka	Vrednost
Kot strižne odpornosti *	$\gamma_{\phi'}$	1,25
Efektivna kohezija	$\gamma_{c'}$	1,25
Nedrenirana strižna trdnost	γ_{cu}	1,4
Natezna odpornost pilotov	$\gamma_{s;t}$	1,4
Odpornost sider	γ_a	1,4
* Faktor se uporabi za $\tan \phi'$		

2.1.4.7.5 Preverjanje odpornosti proti poružitvi zaradi hidravličnega loma tal, ki je posledica strujanja vode v tleh

Ko se povečuje mejno stanje poružitve zaradi hidravličnega loma tal, ki je posledica pronicanja vode v tleh (HYD), je treba za vsak merodajen stolpec zemljine preveriti, da je projektna vrednost tlaka porne vode, ki zmanjšuje stabilnost, ($u_{dst;d}$), na dnu stolpca manjša ali enaka totalni navpični napetosti, ki povečuje stabilnost ($\sigma_{stb;d}$), ali projektna vrednost strujne sile ($S_{dst;d}$) v stolpcu zemljine manjša ali enaka potopljeni teži istega stolpca zemljine ($G'_{stb;d}$):

$$u_{dst,d} \leq \sigma_{stb,d} \quad (15)$$

$$S_{dst,d} \leq G'_{stb,d} \quad (16)$$

V enačbah (15) in (16) je treba uporabiti vrednosti delnih varnostnih faktorjev za $u_{dst;d}$, $\sigma_{stb;d}$, $S_{dst;d}$ in $G'_{stb;d}$ za trajna in spremenljiva stanja:

Preglednica 10: Delni faktorji za vplive (γ_F)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 117)

Vplivi	Oznaka	Vrednost
Stalni		
Neugodni ^a	$\gamma_{G;dst}$	1,35
Ugodni ^b	$\gamma_{G;stb}$	0,90
Začasni		
Neugodni ^a	$\gamma_{Q;dst}$	1,50
^a Zmanjšuje stabilnost.		
^b Povečuje stabilnost.		

2.1.4.8 Mejno stanje uporabnosti

Preverjanje mejnih stanj uporabnosti v tleh ali prerezu, elementu ali v vezi konstrukcije mora zahtevati:

$$E_d \leq C_d \quad (17)$$

E_d ...projektna vrednost učinka vpliva

C_d ...mejna projektna vrednost učinka vpliva

2.1.4.9 Mejne vrednosti pomikov temeljev

Pri projektiranju temeljev je treba določiti mejne vrednosti za premike temeljev.

Omejiti je treba vsakršne diferenčne premike temeljev, ki vodijo do deformacije v konstrukciji, tako da v konstrukciji ne pride do mejnega stanja.

Izbira projektnih vrednosti za mejne premike in deformacije mora upoštevati:

- zaupanje, s katerim je mogoče opredeliti sprejemljive vrednosti pomikov,
- pojavljanje in hitrost pomikov tal,
- vrsto konstrukcije,

- vrsto konstrukcijskega materiala,
- način temeljenja,
- vrsto tal,
- način deformiranja,
- predvideno rabo konstrukcije,
- potrebo po zagotovitvi, da s komunalnimi vodi in drugimi komunikacijami, ki vodijo v stavbo, ne bo nikakršnih težav.

Izračuni diferenčnih posedkov morajo upoštevati:

- pojavljanje in hitrost posedanja in premikov tal,
- naključne in sistematične razlike v lastnostih tal,
- razporeditev obremenitev,
- metodo gradnje (vključno z zaporedjem obremenjevanja),
- togost zgradbe med gradnjo in po njej.

2.1.5 Obremenilni preskusi in preskusi na eksperimentalnih modelih

Kadar se za potrditev projekta ali kot dopolnilo katere od drugih alternativnih možnosti uporabijo rezultati obremenilnih preskusov ali preskusov na malih ali velikih modelih, je treba upoštevati naslednje:

- razlike v pogojih tal pri preskusu in pri dejanski konstrukciji,
- časovne vplive, še posebej kadar je trajanje preskusa mnogo krajše kot trajanje obremenitve dejanske konstrukcije,
- učinke materiala, še posebej kadar se uporabljajo pomanjšani modeli. Upoštevati je treba učinke ravni obremenitev in učinke velikosti zrn obremenitve.

2.1.6 Opazovalna metoda

Pred začetkom gradnje morajo biti izpolnjene naslednje zahteve:

- določiti je treba še sprejemljive meje obnašanja;
- oceniti je treba območje možnega obnašanja in pokazati, da obstaja sprejemljiva verjetnost, da bo dejansko obnašanje znotraj sprejemljivih meja;

- pripravljen mora biti načrt tehničnega opazovanja, ki bo pokazal, ali je dejansko obnašanje znotraj sprejemljivih meja. Tehnično opazovanje mora to razjasniti dovolj zgodaj in v dovolj kratkih intervalih, da se omogoči uspešna uporaba dodatnih ukrepov;
- odzivni čas merilnih instrumentov in postopkov za analizo rezultatov mora biti dovolj kratek v primerjavi z možnim razvojem dogodkov pri gradnji;
- načrt dodatnih ukrepov, ki se lahko uporabijo, kadar tehnično opazovanje odkrije obnašanje izven sprejemljivih meja, mora biti pripravljen v naprej.

Med gradnjo je treba tehnično opazovanje izvajati v skladu z načrtom.

Rezultate tehničnega opazovanja je treba analizirati v primernih fazah gradnje. Kadar so sprejemljive meje obnašanja presežene, je treba uporabiti načrtovane dodatne ukrepe.

Kadar merilna oprema ne daje zanesljivih podatkov določene vrste ali je podatkov premalo, je treba merilno opremo bodisi nadomestiti bodisi dopolniti.

2.1.7 Poročilo o geotehničnem projektu

Poročilo o geotehničnem projektu mora vsebovati predpostavke, podatke, računske metode in rezultate preverjanja varnosti in uporabnosti.

Poročilo o geotehničnem projektu mora vsebovati načrt nadzora in tehničnega opazovanja, kjer je to primerno. Zadeve, ki zahtevajo nadzor med gradnjo ali vzdrževanje po gradnji, morajo biti v poročilu jasno navedene. Ko se zahtevana preverjanja med gradnjo izvedejo, jih je treba v dodatku k poročilu dokumentirati.

Izveček poročila o geotehničnem projektu, ki vsebuje zahteve glede nadzora, tehničnega opazovanja in vzdrževanja zgrajene konstrukcije, je treba posredovati investitorju/naročniku.

2.2 Temeljenje na pilotih

2.2.1 Splošno

Določila tega poglavja veljajo za stoječe, trenjske pilote, natezno obremenjene pilote in prečno obremenjene pilote, ki so vgrajeni z vtiskanjem, zabijanjem, vijačenjem ali uvtavanjem z injektiranjem ali brez njega.

2.2.2 Mejna stanja

Pri projektiranju je treba preučiti in ustrezno upoštevati naslednja mejna stanja:

- izgubo globalne stabilnosti,
- preseženo mejno nosilnost temeljenja na pilotih,
- dvig ali nezadostno natezno odpornost temeljenja na pilotih,
- porušitev temeljnih tal zaradi prečnih obremenitev temelja na pilotih,
- konstrukcijsko porušitev pilota v tlaku, nategu, upogibu, uklonu ali strigu,
- skupno porušitev tal in temelja na pilotih,
- skupno porušitev tal in konstrukcije,
- prekomerne posedke,
- prekomerne dvižke,
- prekomerne pomike prečno na os pilota,
- nesprejemljive vibracije.

2.2.3 Vplivi in projektne situacije

2.2.3.1 Splošno

Projektna stanja je treba določiti skladno z načeli, navedenimi v poglavju 2.1.2.

2.2.3.2 Vplivi zaradi pomikov tal

2.2.3.2.1 Splošno

Tla, v katerih se nahajajo piloti, so lahko izpostavljena pomikom, ki jih povzroča konsolidacija, nabrekanje, obtežbe v neposredni bližini, lezenje zemljine, plazovi in potresi.

Tem pojavom je treba nameniti pozornost, saj lahko vplivajo na pilote in povzročijo negativno trenje, dvigovanje, raztezanje zemljine, prečne obremenitve in premike.

Za projektiranje je treba uporabiti enega izmed spodaj navedenih načinov računa:

- pomik tal se obravnava kot vpliv. Sile, premiki, in deformacije v pilotu se določijo z interakcijsko analizo;
- zgornjo vrednost sile, ki bi jo tla lahko prenesla v pilot, je treba upoštevati kot projektni vpliv. Pri ovrednotenju te sile je treba upoštevati trdnost zemljine in izvor obtežbe, ki ga predstavlja teža ali tlak premikajoče se zemljine ali velikost motečih vplivov.

2.2.3.2.2 Negativno trenje

Pri računu po mejnem stanju nosilnosti in upoštevanju obtežbe negativnega trenja kot vpliva je treba upoštevati največjo vrednost vpliva, ki ga lahko povzroči navzdol usmerjen pomik tal v vplivnem območju pilota.

2.2.3.2.3 Dvižki tal

Pri obravnavanju učinkov dvižka tal ali navzgor delujočih obtežb, ki se lahko razvijejo vzdolž plašča pilota, je treba te pomike tal upoštevati kot vpliv.

OPOMBA 1: Nabrekanje ali dvižek tal je lahko posledica razbremenitve, izkopov, zmrzovanja ali zabijanja pilotov v bližini. Prav tako je lahko posledica povečanja vlage zaradi poseka dreves, prenehanja črpanja vode iz vodonosnikov, zmanjšane izhlapevanja (npr. gradnja novih zgradb) in nesreč.

OPOMBA 2: Dvižki tal lahko nastopijo med gradnjo, preden se piloti obremenijo z objektom, in lahko povzročijo nesprejemljiv dvig ali konstrukcijsko porušitev pilotov.

2.2.3.2.4 Obtežbe prečno na os pilota

Pozornost je treba posvetiti vplivom prečno na os pilota, ki jih povzročajo premiki tal v okolici pilota.

2.2.4 Projektne metode in konstrukcijske zahteve

2.2.4.1 Projektne metode

Projektiranje mora temeljiti na enem od naslednjih pristopov:

- na rezultatih statičnih obremenilnih preskusov, za katere se je izkazalo, z izračuni ali drugače, da so skladni z drugimi ustreznimi izkušnjami;
- na empiričnih ali analitičnih računskih metodah, katerih veljavnost je bila dokazana s statičnimi obremenilni preskusi v primerljivih razmerah;
- na rezultatih dinamičnih obremenilnih preskusov, katerih veljavnost je bila dokazana s statičnimi obremenilnimi preskusi v primerljivih situacijah;
- na rezultatih opazovanja obnašanja primerljivega temeljenja na pilotih, če takšen pristop podprt z rezultati preiskav terena in lastnosti tal.

2.2.4.2 Projektne zahteve

Obravnavati je treba obnašanje posamičnih pilotov in skupine pilotov ter tudi trdnost konstrukcije, ki povezuje pilote.

Pri izbiri računske metode in vrednosti parametrov ter uporabi rezultatov obremenilnih preskusov je treba upoštevati trajanje in spreminjanje obtežbe s časom.

Tako pri izračunih kakor tudi pri vrednotenju rezultatov obremenilnih preskusov je treba upoštevati načrtovane postavitve ali odstranitve preobremenitve ali možne spremembe režima talne vode.

Pri odločanju o vrsti pilota, kakovosti materiala pilota in načinu vgrajevanja pilota je treba upoštevati:

- pogoje tal in podtalnice na delovišču in tudi pričakovane ali možne ovire v tleh,
- napetosti, ki se razvijejo v pilotu med vgradnjo,
- možnost ohranjanja zveznosti in kontrole zveznosti pilota, ki se vgrajuje,
- vpliv metode vgradnje in zaporedja vgradnje pilotov na tiste pilote, ki so že vgrajeni, ter na bližnje objekte in infrastrukturo,

- tolerance, znotraj katerih je mogoče pilot zanesljivo izvesti,
- škodljive učinke kemikalij v tleh,
- možnost, da se različni režimi talne vode spojijo,
- rokovanje s piloti in njihov transport,
- vpliv izvedbe pilotov na sosednje objekte.

2.2.5 Obremenilni preskusi pilotov

2.2.5.1 Splošno

Obremenilne preskuse je treba izvesti v naslednjih primerih:

- ko se uporablja vrsta pilota ali metoda vgradnje, za katero ni primerljivih izkušenj;
- če piloti niso bili preskušani v primerljivih zemljinah in s primerljivimi obtežnimi pogoji;
- v primerih, ko bodo piloti obremenjeni z obtežbo, za katero teorija in izkušnje za zanesljivo projektiranje ne obstajajo. Program obremenilnega preskusa mora v takšnih primerih predvideti podobno obtežbo, kot se dejansko pričakuje;
- ko opažanja med vgradnjo pilota zaznajo bistveno slabše obnašanje pilota, kot je bilo pričakovano na podlagi preiskav terena ali izkušenj, in ko dodatne geotehnične preiskave na lokaciji ne pojasnijo vzroka za to;

Kadar se na pilotu izvede en sam obremenilni preskus, je treba to storiti na lokaciji, kjer se pojavijo najneugodnejši pogoji tal. Če to ni mogoče, je treba to upoštevati pri določanju karakteristične vrednosti tlačne odpornosti.

Kadar se obremenilni preskus izvede na dveh ali več preskusnih pilotih, morajo biti preskusne lokacije reprezentativne za celotno delovišče, kjer se izvajajo piloti. Obremenilni preskus enega izmed poskusnih pilotov je treba izvesti na lokaciji, kjer se pričakujejo najneugodnejši pogoji tal.

Med vgradnjo preskusnega pilota in začetkom obremenilnega preskusa mora preteči dovolj časa, da vgrajeni material doseže zahtevano trdnost in da tlaki porne vode ponovno dosežejo svoje začetne vrednosti.

2.2.5.2 Statični obremenilni preskusi

2.2.5.2.1 Postopek obremenitve

Postopki obremenilnega preskusa pilota, še posebej število obremenilnih stopenj (korakov), trajanje teh korakov in izvedba obremenilnih ciklov, morajo biti takšni, da je iz opravljenih meritev na pilotu mogoče dobiti podatke o deformacijah pri obremenjevanju, razbremenjevanju in lezenju pilota. Za preskusne pilote je treba izbrati takšno obtežbo, da je mogoče pridobiti podatke o mejni obremenitvi.

2.2.5.2.2 Preskusni piloti

Število preskusnih pilotov, potrebno za potrditev projekta, je odvisno od:

- pogojev tal in spreminjanja le-teh na območju lokacije gradnje,
- geotehnične kategorije konstrukcije,
- predhodno dokumentiranih primerov obnašanja enakega tipa pilota v podobnih pogojih tal,
- celotnega števila pilotov in vrst pilotov v projektu temeljenja.

Na lokaciji, kjer se izvaja preskus pilota, je treba pogoje tal temeljito preiskati. Globina vrtn ali terenskih preiskav mora biti zadostna, da zagotovi podatke o lastnostih tal v okolici in pod konico pilota. Preiskati je treba vse sloje, ki lahko pomembno vplivajo na obnašanje pilota.

2.2.5.2.3 Delovni piloti

Predpisati je treba, da se število delovnih pilotov, na katerih se bodo izvedli obremenilni preizkusi, določi na podlagi zabeleženih ugotovitev med vgradnjo.

Obtežba delovnih pilotov pri obremenilnem preskusu ne sme biti manjša od projektne obtežbe temelja.

2.2.5.3 Dinamični obremenilni preskusi

Dinamični obremenilni preskusi se lahko uporabljajo za oceno tlačne odpornosti pilota pod pogojem, da so bile izvedene ustrezne preiskave tal na lokaciji in je bila metoda umerjena na statične obremenilne preskuse, izvedene na enaki vrsti pilota, podobne dolžine in prereza ter v primerljivih geotehničnih pogojih.

Kadar se uporabi več različnih vrst dinamičnih preskusov, je treba rezultate različnih vrst dinamičnih preskusov vedno preučiti z upoštevanjem relacij med temi preskusi.

Dinamični obremenilni preskusi se lahko uporabijo tudi kot pokazatelji zveznosti pilotov ter za odkrivanje slabših pilotov.

2.2.5.4 Poročilo o obremenilnem preskusu

Predpisati je treba, da se mora za vsak izveden obremenilni preskus napisati poročilo. Kadar je smiselno, mora poročilo vsebovati:

- opis lokacije,
- pogoje tal glede na izvedene preiskave tal,
- vrsto, pilota
- opis vgrajevanja pilota in kakršnekoli težave, ki so nastale med deli,
- opis obremenitve merilnih aparatov in sistema za prevzem reakcijskih sil,
- dokumente o umerjanju merilne celice, dvigalk in merilnikov pomikov,
- zapiske o vgrajevanju preskusnih pilotov,
- fotodokumentacijo o pilotu in lokaciji preskusa,
- rezultate preskusa v številčni obliki,
- krivulje časovnega poteka pomikov za vsako bremensko stopnjo (pri postopnem obremenjevanju),
- izmerjeno obnašanje obtežba-pomik
- razloge za morebitna odstopanja od zgoraj navedenih zahtev.

2.2.6 Osno obremenjeni piloti

2.2.6.1 Splošno

2.2.6.1.1 Projektiranje po metodi mejnih stanj

V projektu je treba dokazati, da je dovolj malo verjetno, da bodo prekoračena naslednja mejna stanja:

- mejno stanja zaradi prekoračitve tlačne ali natezne nosilnosti posamičnega pilota,
- mejno stane zaradi prekoračitve tlačne ali natezne nosilnosti celotne temeljne konstrukcije,
- mejno stanje porušitve ali resne poškodbe zgornje konstrukcije zaradi prevelikih pomikov ali diferenčnih pomikov temeljne konstrukcije na pilotih,
- mejno stanje uporabnosti zgornje konstrukcije zaradi premikov pilotov

Pri tlačno obremenjenih pilotih je na podlagi krivulje obtežba-pomik, ki je vseskozi ukrivljena, pogosto težko določiti mejno stanje. V takih primerih naj se privzame, da je porušitev nastopila, ko znaša posedek pilota 10 % premera na konici pilota.

Pri pilotih, ki se znatno posedejo, lahko mejna stanja v zgornjih konstrukcijah nastopijo, še preden je v celoti mobilizirana nosilnost pilotov. V takih primerih je treba pri projektiranju previdno oceniti možno območje pomikov.

2.2.6.2 Tlačna odpornost tal

2.2.6.2.1 Splošno

Da se dokaže, da temelj na pilotih dovolj varno prenaša projektno tlačno obtežbo, mora biti za vse obtežne primere pri mejnem stanju nosilnosti in za vse obtežne kombinacije izpolnjena naslednja enačba:

$$F_{c,d} \leq R_{c,d} \quad (18)$$

$F_{c,d}$...projektna vrednost osne tlačne obremenitve pilota ali skupine pilotov

$R_{c,d}$...projektna vrednost tlačne odpornosti tal pod pilotom pri mejnem stanju nosilnosti

Za pilote v skupinah je potrebno preveriti dva porušna mehanizma:

- prekoračitev tlačne odpornosti posameznega pilota,
- prekoračitev tlačne odpornosti pilotov in zemljine med njimi, ki skupaj delujejo kot blok.

Za projektno vrednost odpornosti je treba prevzeti nižjo izmed vrednosti za zgornja dva porušna mehanizma.

Pri izračunu projektne odpornosti temelja je treba upoštevati togost in trdnost konstrukcije, ki povezuje skupino pilotov.

Kadar sloj zemljine, v katerem so piloti, leži nad slabše nosilnim slojem, je treba pri računu tlačne odpornosti temelja upoštevati vpliv tega slabše nosilnega sloja.

Pri računu odpornosti konice pilota je treba upoštevati trdnost območja tal nad konico pilota in pod njo.

OPOMBA: Območje, ki ga je treba upoštevati, lahko obsega več premerov pilota nad konico pilota in pod njo. Vsak slabše nosilen sloj v tem območju ima relativno velik vpliv na odpornost konice pilota.

Kadar je premer na konici pilota večji od premera na plašču pilota, je treba upoštevati morebitne neugodne učinke.

2.2.6.2.2 Mejna tlačna odpornost iz statičnih obremenilnih preskusov

Obremenilni preskusi se izvajajo na način, ki mora biti v skladu s 2.2.5 ter mora biti določen v poročilu o geotehničnem projektu.

Preskusni piloti, ki bodo predhodno preskušeni, morajo biti vgrajeni na enak način in morajo s konico segati v isti sloj tal kot piloti, ki bodo sestavljali temeljno konstrukcijo.

Kadar je temelj na pilotih pod vplivom negativnega trenja, je treba popraviti vrednost mejne odpornosti pilota, ki je bila določena na podlagi rezultatov obremenilnih preskusov bodisi pri porušitvi bodisi pri pomikih, pri katerih je bil izpolnjen pogoj mejnega stanja nosilnosti. Korekcija se izvede tako, da se izmerjen odpornost ali pa najneugodnejša pozitivna odpornost plašča v stisljivem sloju in v slojih nad njim, kjer se razvije negativno trenje, od obtežbe, izmerjene na vrhu pilota.

Pri vrednotenju mejne karakteristične odpornosti $R_{c,k}$ iz vrednosti $R_{c,m}$, izmerjene pri enem ali več obremenilnih preskusih, je treba upoštevati spremenljivost tal in spremenljivost učinka, ki ga ima vgradnja pilota.

Pri konstrukcijah, ki niso sposobne prenašati obtežb s »slabših« na »boljše« pilote (gibke konstrukcije), je treba kot minimalno zahtevo izpolniti naslednjo enačbo:

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,m})_{\text{mean}}}{\xi_1}; \frac{(R_{c,m})_{\text{min}}}{\xi_2} \right\} \quad (19)$$

kjer sta ξ_1 in ξ_2 korekcijska faktorja, odvisna od števila preskušanih pilotov in se nanašata na srednjo vrednost $(R_{c,m})_{\text{mean}}$ oziroma najmanjšo vrednost $(R_{c,m})_{\text{min}}$ izmed vrednosti $R_{c,m}$.

$R_{c,m}$...izmerjena vrednost tlačne odpornost tal pod pilotom pri mejnem stanju nosilnosti pri enem izmed več obremenilnih preskusov pilotov

Preglednica 11: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakteristične vrednosti na podlagi statičnih obremenilnih preskusov pilotov (n – število preskušanih pilotov)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 114)

ξ za $n=$	1	2	3	4	≥ 5
ξ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ξ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Projektna vrednost odpornosti $R_{c,d}$ je treba izračunati iz enačbe:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t}$$

ali

$$R_{c,d} = \frac{R_{b,k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s,k}}{\gamma_s} \quad (20)$$

$R_{b,k}$...karakteristična vrednost odpornost tal pod konico pilota

$R_{s,k}$...karakteristična vrednost odpornost ob plašču pilota

2.2.6.2.3 Mejna tlačna odpornost, določena iz rezultatov terenskih preiskav

Metode za določitev tlačne odpornosti temelja na pilotih na podlagi rezultatov terenskih preiskav morajo biti že prej preverjene z obremenilnimi preskusi in s primerljivimi izkušnjami.

Projektno tlačno odpornost pilota $R_{c,d}$ je treba izračunati kot:

$$R_{c,d} = R_{b,d} + R_{s,d} \quad (22)$$

$$R_{b,d} = R_{b,k} / \gamma_b \quad (22)$$

$$R_{s,d} = R_{s,k} / \gamma_s \quad (23)$$

Karakteristični vrednosti $R_{b,k}$ in $R_{s,k}$ je treba izračunati na enega izmed spodaj navedenih načinov:

$$R_{c,k} = (R_{b,k} + R_{s,k}) = \frac{R_{b,cal} + R_{s,cal}}{\xi} = \frac{R_{c,cal}}{\xi} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,cal})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{c,cal})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad (24)$$

ker sta ξ_3 in ξ_4 korekcijska faktorja, odvisna od števila profilov terenskih meritev n.

$R_{c,cal}$...računska vrednost tlačne odpornosti tal pod pilotom pri mejnem stanju nosilnosti

$R_{b,cal}$...odpornost tal pod konico pilota pri mejnem stanju nosilnosti, iz vrednotena na podlagi preiskav tal

$R_{s,cal}$... mejno trenje ob plašču, iz vrednotenja na podlagi parametrov iz preiskav tal

Preglednica 12: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakteristične vrednosti na podlagi rezultatov terenskih preiskav (n – število profilov terenskih preiskav)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 114)

ξ za $n=$	1	2	3	4	5	7	10
ξ_3	1,40	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
ξ_4	1,40	1,27	1,23	1,20	1,15	1,12	1,08

Pri vrednotenju rezultatov preiskav tal in izračunane odpornosti je treba upoštevati sistematične in naključne komponente variabilnosti tal.

Kadar se uporabi 3. projektni pristop, je treba karakteristične vrednosti parametrov tal določiti v skladu z 2.1.4.5. Za te karakteristične vrednosti je treba uporabiti delne faktorje, da se dobijo projektne vrednosti parametrov tal, ki se uporabijo za izračun projektnih vrednosti odpornosti pilota.

2.2.6.2.4 Mejna tlačna odp., ugotovljena z dinamičnimi obremenilnimi preskusi

Če se za ugotovitev odpornosti posameznega tlačno obremenjenega pilota uporabi dinamični obremenilni preskus [merjenje deformacij in pospeškov pilota v odvisnosti od časa med udarcem zabijala (glej 2.2.5.3)], je treba ustreznost dinamičnega preskusa predhodno potrditi z rezultati statičnih obremenilnih preskusov na enaki vrsti pilota, s podobno dolžino in premerom pilota ter v podobnih pogojih tal.

Energija udarca mora biti dovolj velika, da omogoča ustrezno vrednotenje nosilnosti pilota pri odgovarjajoči in dovolj visoki ravni deformacij.

Projektno vrednost tlačne odpornosti pilota $R_{c,d}$ je treba določiti z enačbo:

$$R_{c,d} = \frac{R_{c,k}}{\gamma_t} \quad (25)$$

kjer je

$$R_{c,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_5}; \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_6} \right\} \quad (26)$$

kjer sta ξ_5 in ξ_6 korekcijska faktorja, odvisna od števila preskušanih pilotov n .

Preglednica 13: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakteristične vrednosti na podlagi dinamičnih terenskih preiskav ^{a, b, c, d, e} (n – število preskušanih pilotov)

(Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila: str. 114)

ξ za $n=$	≥ 2	≥ 5	≥ 10	≥ 15	≥ 20
ξ_5	1,60	1,50	1,45	1,42	1,40
ξ_6	1,50	1,35	1,30	1,25	1,25

^a Tabelirane vrednosti ξ veljajo za dinamične obremenilne preskuse.

^b Pri dinamičnih obremenilnih preskusih, analiziranih z ujemanjem merjenih signalov, se vrednosti ξ lahko množijo z modelnim faktorjem 0,85.

^c Pri uporabi zabijalnih obrazcev z merjenjem navidezno elastičnih pomikov glave pilota med zabijanjem se vrednosti ξ množijo z modelnim faktorjem 1,10.

^d Pri uporabi zabijalnih obrazcev brez merjenja navidezno elastičnih pomikov glave pilota med zabijanjem se vrednosti ξ množijo z modelnim faktorjem 1,20.

^e Kadar so v temeljni konstrukciji uporabljeni različni piloti, se pri izbiri preskusnih pilotov (n) posamezne skupine pilotov upoštevajo ločeno.

2.2.6.2.5 Mejna tlačna odpornost, določena z uporabo zabijalnih obrazcev

Zabijalni obrazci se smejo uporabiti le, kadar je slojevitost tal znana.

Zabijalni obrazci se za ugotovitev mejne tlačne odpornosti posameznih pilotov v temeljni konstrukciji lahko uporabimo samo v primerih, če je bila njihova veljavnost preverjena s predhodnimi eksperimentalnimi dokazi o sprejemljivem ujemanju s statičnimi obremenilnimi preskusi na enaki vrsti pilota, s podobno dolžino in prerezom ter v podobnih pogojih tal.

Za stoječe pilote, ki so zabiti v nekoherentna tla, je treba projektno vrednost tlačne odpornosti $R_{c,d}$ določiti po enakem postopku, kot je opisan v 2.2.6.2.4.

2.2.6.2.6 Mejna tlačna odpornost, ugotovljena z valovno analizo

Valovno analizo zabijanja se sme uporabiti le tam, kjer je bila slojevitost terena predhodno zagotovljena z vrтанjem in terenskimi preiskavami.

Kadar se za ugotovitev odpornosti tlačno obremenjenega posameznega pilota uporabi metoda z valovno analizo zabijanja pilota, je treba pravilnost analize potrditi s predhodnimi dokazi o sprejemljivem obnašanju pri statičnih obremenilnih preskusih na enaki vrsti pilota, s podobno dolžino in prerezom ter v podobnih pogojih tal.

Projektna vrednost tlačne odpornosti $R_{c,d}$, izračunamo iz rezultatov valovne analize zabijanja pilota za večje število reprezentativnih pilotov, je treba določiti na enak način, kot je opisan v 2.2.6.2.4, z uporabo faktorjev ξ , ki temeljijo na lokalnih izkušnjah.

OPOMBA: Metoda valovne enačbe temelji na matematičnem modelu zemljine, pilota in zabijalne naprave brez merjenja napetostnih valov v pilotu med zabijanjem. Metoda se ponavadi uporablja za analizo učinkovitosti delovanja zabijala, dinamičnih parametrov zemljine in napetosti v pilotu med zabijanjem. Na podlagi modeliranja je mogoče določiti potrebno število udarcev zabijala na enoto pogrezka pilota, ki je potrebno za doseganje izbrane tlačne odpornosti pilota.

2.2.6.2.7 Ponovno zabijanje

V projektu je treba točno opredeliti število pilotov, na katerih je potrebno izvesti serijo ponovnega zabijanja. Če ponovno zabijanje pokaže nižje vrednosti tlačne odpornosti, je treba slednje uporabiti kot osnovo za oceno mejne tlačne odpornosti pilotov. Če ponovno zabijanje pokaže višje vrednosti, se smejo uporabiti v ocenah odpornosti.

2.2.6.3 Natezna odpornost tal

2.2.6.3.1 Splošno

Projektiranje natezno obremenjenih pilotov mora biti skladno s pravili projektiranja, navedenimi v 2.2.6.2, kjer je ta pravila mogoče uporabiti. Projektna pravila, ki so posebna za temeljenje na natezno obremenjenih pilotih, so navedena v nadaljevanju.

Da se preveri, da temelj dovolj varno prenaša projektno natezno obtežbo, mora za vse obtežne primere pri mejnem stanju nosilnosti in vse obtežne kombinacije veljati:

$$F_{t,d} \leq R_{t,d} \quad (27)$$

$F_{t,d}$...projektna vrednost osne natezne obremenitve nateznega pilota ali skupine nateznih pilotov

$R_{t,d}$...projektna vrednost natezne odpornosti pilota ali skupine pilotov

Za natezno obremenjene pilote je treba upoštevati dva porušna mehanizma:

- izvlek pilotov iz gmote tal,
- dvig bloka tal, v katerem so piloti

Preverjanje varnosti proti porušitvi zaradi dviga bloka zemljine, ki vsebuje pilote je treba izvesti v skladu z 2.1.4.7.4.

Pri ugotavljanju natezne odpornosti skupine pilotov je treba upoštevati vpliv skupine pilotov, ki lahko zmanjša efektivne navpične napetosti v zemljini in posledično odpornost po plašču posameznih pilotov v skupini.

Upoštevati je treba izredno neugodne učinke ciklične in spreminjajoče se obtežbe na natezno nosilnost.

2.2.6.3.2 Mejna natezna odpornost, ugotovljena z obremenilnimi preskusi

Obremenilni preskusi za ugotovitev natezne odpornosti posameznega pilota R_t morajo biti izvedeni v skladu s 2.2.5.1, 2.2.5.2 in 2.2.5.4 in glede na 2.2.6.2.2.

Projektno natezno odpornost $R_{t,d}$ je treba izračunati kot:

$$R_{t,d} = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s,t}} \quad (28)$$

$R_{t,d}$... projektna vrednost natezne odpornosti pilota ali skupine pilotov

$R_{t,k}$... karakteristična vrednost natezne odpornosti pilota ali skupine pilotov

Zapise o vgradnji preskusnega pilota oziroma pilotov je treba pregledati in pri vrednotenju rezultatov obremenilnega preskusa upoštevati vsakršna odstopanja od običajnih pogojev vgradnje.

Karakteristično vrednost natezne odpornosti pilota je treba določiti z enačbo:

$$R_{t,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{t,m})_{\text{mean}}}{\xi_1}; \frac{(R_{t,m})_{\text{min}}}{\xi_2} \right\} \quad (29)$$

kjer sta ξ_1 in ξ_2 korekcijska faktorja, odvisna od števila preskušanih pilotov n in pripadat srednji $(R_{t,m})_{\text{mean}}$ oziroma najmanjši $(R_{t,m})_{\text{min}}$ vrednosti izmerjenih nateznih odpornosti.

$R_{t,m}$...izmerjena natezna odpornost tal posameznega pilota pri enem ali več obremenilnih preskusih

2.2.6.3.3 Mejna natezna odpornost, določena iz rezultatov terenskih preiskav

Metode za določitev natezne odpornosti temelja na pilotih iz rezultatov terenskih preiskav morajo biti potrjene z obremenilnimi preskusi ali primerljivimi izkušnjami.

Projektno vrednost natezne odpornosti pilota $R_{t,d}$ je treba izračunati iz enačbe:

$$R_{t,d} = \frac{R_{t,k}}{\gamma_{s,t}} \quad (30)$$

kjer je

$$R_{t,k} = R_{s,k} \quad (31)$$

$R_{t,k}$...karakteristična vrednost natezne odpornosti pilota ali skupine pilotov

$R_{s,k}$...karakteristična vrednost odpornosti ob plašču pilota

Karakteristično vrednost $R_{t,k}$ določimo iz:

$$R_{t,k} = \text{Min} \left\{ \frac{(R_{s,cal})_{mean}}{\xi_3}; \frac{(R_{s,cal})_{min}}{\xi_4} \right\} \quad (32)$$

ker sta ξ_3 in ξ_4 korekcijska faktorja, odvisna od števila profilov terenskih meritev n .

$R_{s,cal}$...mejno trenje ob plašču, iz vrednoteno na podlagi parametrov iz preiskav tal

Kadar se uporabi 3. projektni pristop, je treba karakteristične vrednosti parametrov tal določiti v skladu z 2.1.4.5. Za te karakteristične vrednosti je treba uporabiti delne faktorje, da se dobijo projektne vrednosti parametrov tal, ki se uporabijo za izračun projektnih vrednosti odpornosti pilota.

2.2.6.4 Navpični premiki temeljev na pilotih (uporabnost zgornje konstrukcije)

2.2.6.4.1 Splošno

Navpični pomiki za mejno stanje uporabnosti morajo biti določeni in preverjeni glede na zahteve, navedene v 2.1.4.8 in 2.1.4.9.

2.2.6.4.2 Tlačno obremenjeni piloti

Preveriti je treba mejno stanje uporabnosti v zgornji konstrukciji, ki nastane zaradi posedkov pilotov, in upošteva tudi negativno trenje, kjer obstaja možnost, da se le-to pojavi.

OPOMBA: Kadar leži konica pilota v srednje gostih ali težko gnetnih zemljinah, ki imajo pod seboj kamninsko ali zelo trdno podlago, so delni varnostni faktorji za mejno stanje nosilnosti ponavadi dovolj, da se zadostijo pogoji mejnega stanja uporabnosti.

Analiza posedkov mora vsebovati tako določitev posedkov posameznih pilotov kot tudi določitev posedka zaradi učinka skupine pilotov.

2.2.6.4.3 Natezno obremenjeni piloti

Določitev dvižkov je treba izvesti v skladu z načeli, navedenimi v 2.2.6.4.2.

OPOMBA: Posebno pozornost se nameni raztezanju materiala, iz katerega je pilot.

Če se za mejno stanje uporabnosti zahtevajo zelo striga merila, je treba za dvižke izvesti ločeno preverjanje.

2.2.7 Prečno obremenjeni piloti

2.2.7.1 Splošno

Prečno obremenjeni piloti morajo biti projektirani v skladu s projektnimi pravili, navedenimi v 2.2.4 in 2.2.5, kjer je to primerno. Projektna pravila, posebej namenjena temeljnim konstrukcijam s prečno obremenjenimi piloti, so navedena spodaj.

Da se dokaže, da temelj na pilotih dovolj varno prenaša projektno prečno obtežbo, mora za vse obtežne primere pri mejnem stanju nosilnosti in vse obtežne kombinacije veljati naslednja neenačba:

$$F_{tr,d} \leq R_{tr,d} \quad (33)$$

$F_{tr,d}$...projektna vrednost prečne obremenitve pilota ali temelja na pilotih

$R_{tr,d}$...projektna odpornost prečno obremenjenega pilota

Pri določanju odpornosti prečno obremenjenih pilotov je treba upoštevati učinek skupine pilotov.

2.2.7.2 Odpornost proti prečni obtežbi, ugotovljeni z obremenilnimi preskusi

Obremenilni preskus s prečno obtežbo je treba izvesti skladno s 2.2.5.2.

V nasprotju s postopkom obremenilnega preskusa, opisanim v 2.2.5, preskusov na prečno obremenjenih pilotih ponavadi ni treba izvajati do porušitve. Velikost in prijemališče vpliva pri obremenilnem testu naj simulira projektno obtežbo pilota.

Pri izbiri števila pilotov za preskuse in določanju projektne vrednosti prečne odpornosti iz rezultatov obremenilnih preskusov je treba upoštevati raznolikost tal, posebno v zgornjih nekaj metrih pilota.

2.2.7.3 Prečna odpornost pilota, določena iz rezultatov temeljnih tal in trdnostnih karakteristik pilota

Prečno odpornost pilota ali skupine pilotov je treba izračunati ob upoštevanju medsebojno skladnih učinkov vplivov (notranjih sil) v konstrukciji, reakcij tal in premikov.

Analiza prečno obremenjenega pilota mora vključevati tudi možnost konstrukcijske porušitve pilota v zemljini skladno s 2.2.8.

Pri določanju prečne odpornosti temeljne konstrukcije je treba upoštevati prostostno stopnjo rotacije pilotov na mestu, kjer so povezani s konstrukcijo.

2.2.7.4 Premiki prečno na os pilota

Pri določitvi prečnih premikov temelja na pilotih je treba upoštevati:

- togost tal in odvisnost togosti od velikosti deformacij,
- upogibno togost posameznih pilotov,
- vpetost pilotov na mestu, kjer je pilot povezan s konstrukcijo,
- učinek skupine pilotov,
- učinek spremembe smeri delovanja obtežbe ter cikličnih obremenitev.

2.2.8 Dimenzioniranje pilotov

Pilote je treba glede nevarnosti konstrukcijske porušitve preveriti skladno z 2.1.4.6.4.

Konstrukcija pilotov mora biti načrtovana tako, da ustreza vsem stanjem, ki jim bodo piloti izpostavljeni:

- okoliščine med uporabo, npr. pogoje za korozijo,
- okoliščine med vgradnjo, kot so neugodni pogoji tal, npr. samice, strmo nagnjena površina kamninske podlage,
- druge dejavnike, ki vplivajo na vgradljivost pilota, vključno s kakovostjo stikov pilotov,
- pogoje prevoza na gradbišče in vgradnje za predizdelane pilote.

Pri projektiranju pilotov je potrebno projektirati izvedbene tolerance, kot so določene za posamezen tip pilota, komponente vplivov ter obnašanje celotne temeljne konstrukcije.

Vitke pilote, ki potekajo skozi vodo ali debele plasti zelo slabo nosilne zemljine, je treba preveriti na uklon.

Preverjanje glede na uklon ponavadi ni potrebno, če so piloti vgrajeni v zemljino z nedrenirano strižno trdnostjo c_u , večjo od 10 kPa.

2.2.9 Nadzor vgradnje

Načrt vgradnje mora biti osnova za izvajanje pilotiranja.

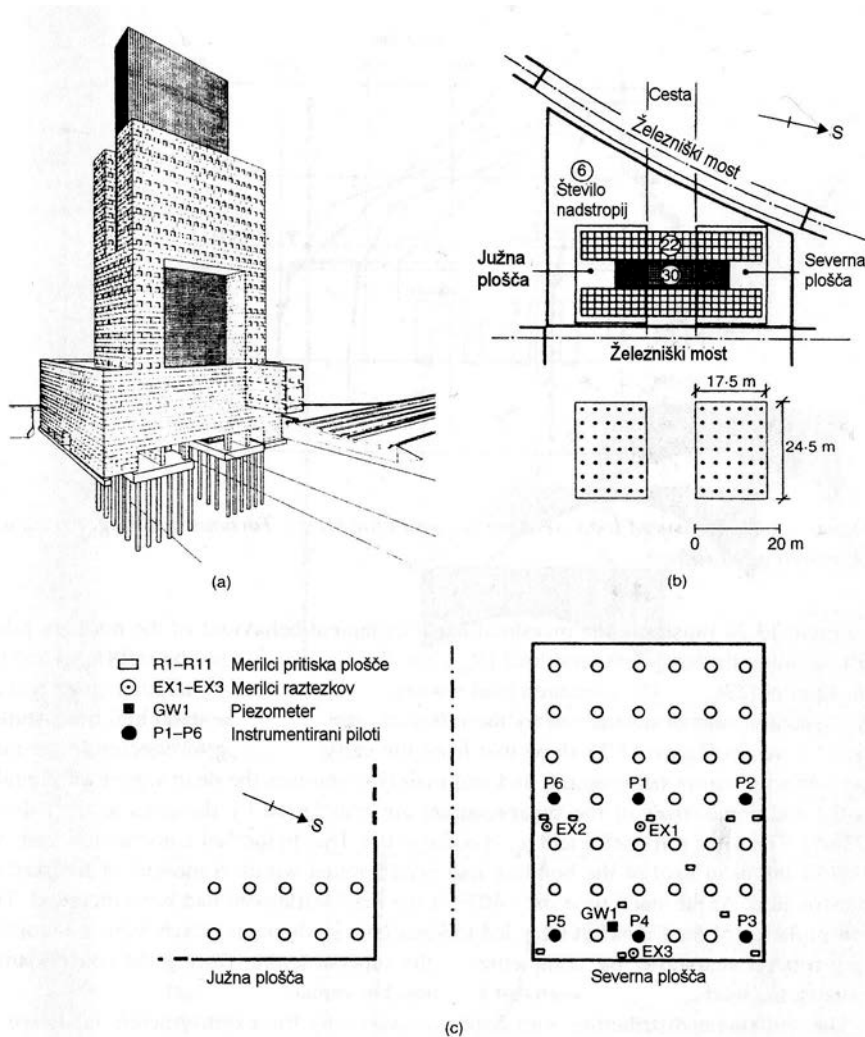
Zahtevati je treba, da se vgradnja pilotov spremlja in da se sproti izdelajo zapisniki.

Kadar zapažanja na terenu in pregled zapisnikov glede kakovosti vgrajenih pilotov kažejo na nezanesljivost, je treba izvesti dodatne preiskave za določitev dejanskega stanja vgrajenih pilotov in oceniti potrebo po sanacijskih ukrepih. Takšne preiskave morajo vključevati bodisi statične obremenilne preskuse bodisi preiskave zveznosti, gradnjo novega pilota ali v primeru vtisnjenih pilotov ponovno zabijanje v kombinaciji s preiskavami tal ob sumljivem pilotu.

Preiskave zveznosti pilotov je treba izvesti, kadar je kakovost zelo odvisna od postopkov vgradnje, ki jih ni mogoče zanesljivo nadzorovati.

3 PRIMERI OBJEKTOV TEMELJENIH NA PILOTIH

3.1 Stavba Messe-Torhaus, Frankfurt, 1983 – 85



Slika 1: Stavba Messe-Torhaus, Frankfurt: (a) izometričen pogled; (b) lega; (c) lokacija instrumentov v temeljenju

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 349)

To je prvi primer stavbe, kjer je temeljenje sestavljeno iz plošče podprte s piloti, v Frankfurtu in celo v Nemčiji.

To 30 nadstropno stavbo obkrožajo 6 nadstropni bloki. Zaradi bližine železniških mostov potrebujemo temeljenje, ki bo omejilo posedke. Poslovna stavba stoji na dveh ločenih

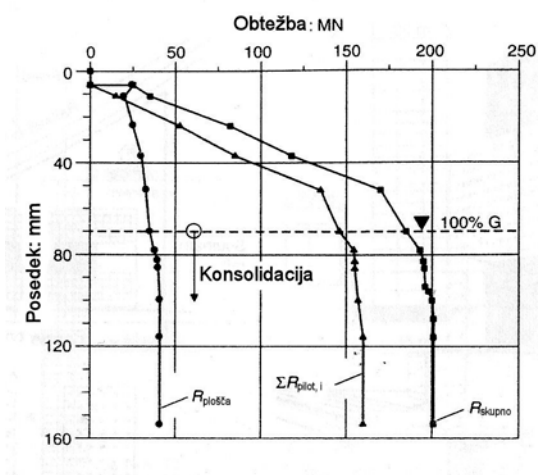
ploščah. Skozi podvoz med njima gre cesta. Sloj zemljine neposredno pod površjem sestoji iz gramoza debeline 5,5 m, pod njim pa je zelo debel sloj gline.

Temeljenje sestoji iz dveh ločenih plošč, vsaka je podprta z 42 uvrtnimi piloti dolžine 20 m in premera 0,9 m. Na obeh ploščah so piloti razporejeni v rastru 6 x 7 pilotov, torej z razmakom 3 do 3,5 premera pilota. Obe plošči sta dimenzij 17,5 m x 24,5 m. Nameščeni sta 3 m pod površino. Vsaka plošča nosi efektivno obtežbo 200 MN.

V Nemčiji ni bilo predhodnih izkušenj s temeljenjem plošče podprte s piloti. Predpostavka je, da bodo piloti izrabili svojo celotno nosilnost, ki jo poznamo za posamezen pilot. Preostanek obtežbe pa se prenese s ploščo neposredno v zemljinu.

Izmerjena porazdelitev obtežbe pokaže, da se le majhen del obtežbe prenese v zemljo preko plošče. Diagram časovnega razvoja posedkov in nosilnosti plošče ter pilotov pokaže, da plošča nosi le svojo lastno težo, vso ostalo obtežbo pa v zemljinu prenesejo piloti. Konsolidacija je potekala še po treh letih od končanja konstrukcije, vendar porazdelitev obtežbe ostaja enaka.

Posedki so od vrha do konice pilota konstantni. Tudi vrednosti posedkov središčnega pilota ne odstopajo od vrednosti vogalnega pilota. Iz tega sklepamo, da je plošča zelo toga.



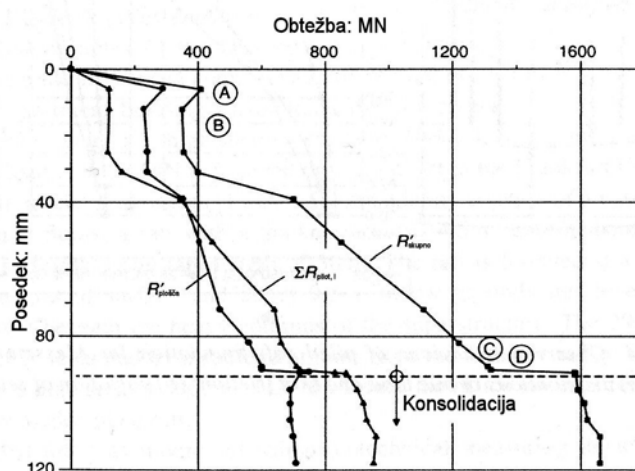
Slika 2: Izmerjene krivulje obtežba-posedek za stavbo Messe-Torhaus, Frankfurt (severna plošča)

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 349)

Robni piloti so bolj obremenjeni kot notranji. Tudi v robnih pilotih obremenitev narašča proti vogalu. Zaradi ekscentričnosti obtežbe porazdelitev obtežbe znotraj skupine pilotov ni simetrična.

Vogalni pilot mobilizira v spodnjih dveh tretjinah 140 kPa trenja po plašču, medtem ko notranji pilot le 60 kPa. Vrednost 140 kPa je več kot dvakrat večja od mejne nosilnosti po plašču določene iz statične obremenilne preizkušnje na kratkem pilotu v glini.

3.2 Stavba Messeturm, Frankfurt, 1988 – 91



Slika 3: Izmerjene krivulje obtežba-posedek temeljenja stavbe Messeturm v Frankfurtu (Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 356)

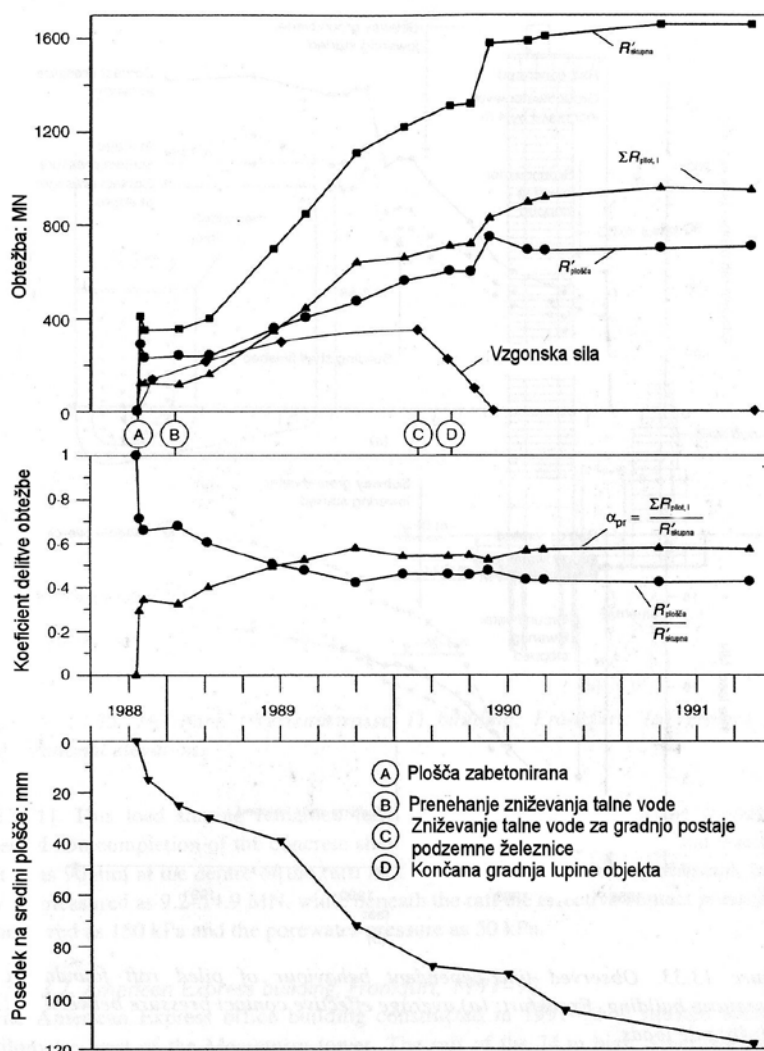
To je najvišja poslovna stavba v Evropi in daleč najvišja v Frankfurtu. Visoka je 256,5 m. Skupna ocenjena obtežba stavbe znaša 1880 MN. Tla na vrhu sestavlja 8 m debel sloj peska in gramoza, sledi pa mu več kot 100 m debel sloj glin. Zaradi tega bi bilo temeljenje samo na pilotih nemogoče.

Debelina plošče se spreminja. Na sredini je debela 6 m, na robu pa 3 m. Plošča je na globini 14 m in 9 m pod nivojem vode. 64 uvrtnih pilotov ima premer 1,3 m in so razporejeni v treh centričnih krogih pod ploščo. Dolžina pilotov se veča proti središču od 26,9 m do 34,9 m. Razdalja med piloti je med 3,5 D in 6 D.

Piloti so postavljeni pod jedrom stavbe blizu težkim stebrom, tako se izognemo velikim notranjim silam in upogibnim momentom v plošči.

Cilj uporabe temeljenja plošče podprte s piloti, je bil zmanjšanje posedkov, in še posebej prevelikega naklona plošče. To storijo tako, da prenesemo del obtežbe v globlje bolj toge dele tal.

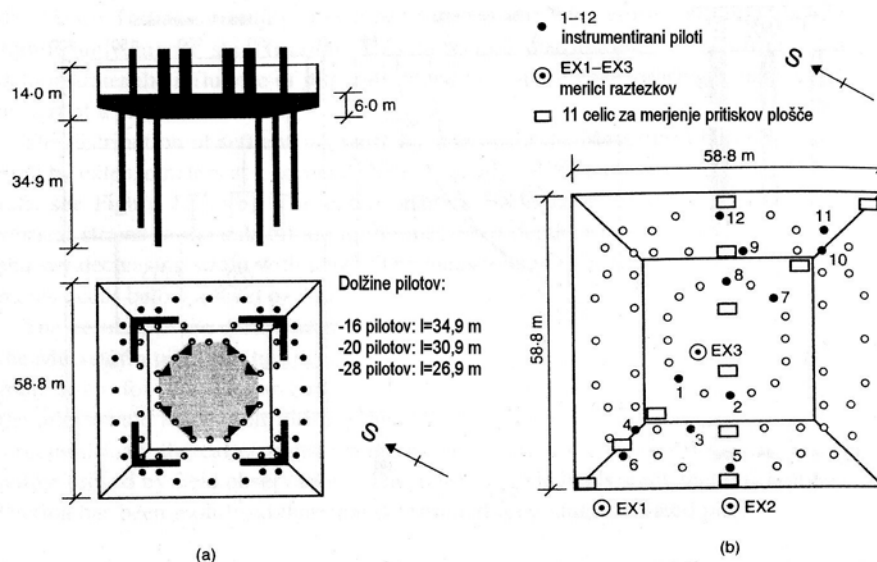
Preverjena sta bila dva različna obtežna primera. V prvem primeru se predpostavi, da bodo piloti prenesli 30 % celotne obtežbe, ostalo pa se prenese s kontaktnimi tlaki preko plošče. V drugem primeru pa piloti prenesejo 55 % celotne obtežbe. Za oba primera je bilo predpostavljeno, da bodo piloti presegli svojo nosilnost po plašču. Po končani gradnji so posedki na sredini plošče znašali 85 mm, na robu pa 48 mm.



Slika 4: Časovna odvisnost krivulje obtežba-posedek in razdelitev obtežbe znotraj temeljenja stavbe Messeturm

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 356)

Tokom gradnje je koeficient deleža obtežbe, ki pade na pilote, zrasel iz 35 % na 55 %.



Slika 5: Stavba Messeturm na plošči podprti s piloti, Frankfurt: (a) načrt in prečni prerez; (b) lokacija merilnih instrumentov

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 356)

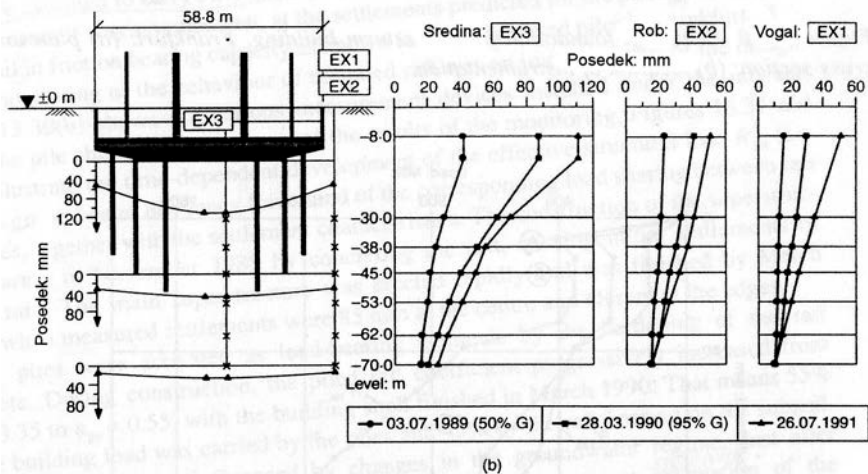
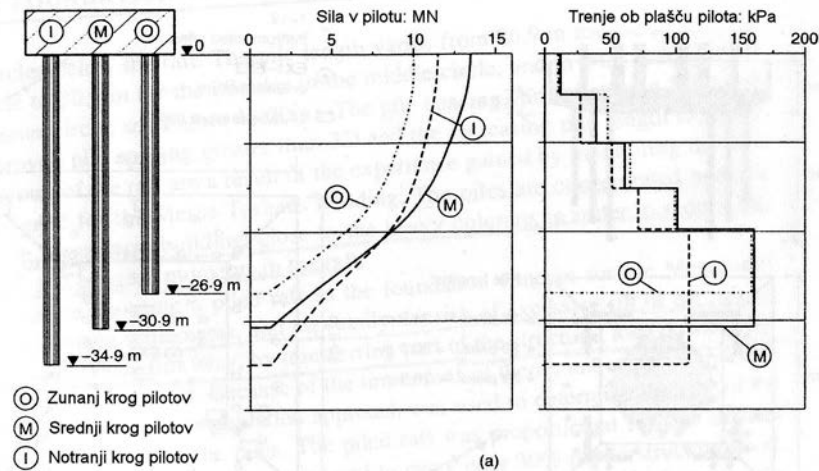
Spremembe v delitvi obtežbe so nastale zaradi spremembe nivoja podzemne vode. Takoj po končanju izkopavanj za klet, se je prenehalo zniževanje podzemne vode. Vzgonske sile na ploščo so rasle dokler se ni leta 1990 začelo zniževanje talne vode za gradnjo postaje za podzemno železnico. Rezultirajoča izguba vzgonske sile je povzročila povečanje deleža obtežbe na pilotih in dodatne posedke.

Po končani gradnji so povprečne efektivne kontaktne napetosti pod ploščo znašale 160 kPa. V centru plošče je bil kontaktni pritisk za 20 % večji kot na robu. Zaradi znižanja nivoja podzemne vode za postajo podzemne železnice so se kontaktni pritiski povečali za 30 %.

Po končani gradnji znašajo sile v pilotih v zunanjem krogu 10 MN, v notranjem krogu 11 MN in v srednjem krogu 13,5 MN. Porazdelitev obtežbe znotraj skupine pilotov je dokaj homogena. Različne dolžine pilotov proti centru skupine pilotov povzročijo izenačenje sil v pilotih.

Uvrtani piloti prenašajo obtežbo preko trenja po plašču. Zgornji del pilota, to je od plošče do 15m pod ploščo, znaša trenje 25-70kPa. Globlji deli mobilizirajo trenje po plašču do 110kPa,

medtem ko piloti v srednjem krogu mobilizirajo do 160 kPa. Porazdelitev trenja po plašču pilotov kaže vpliv interakcije piloti – plošča na obnašanje pilotov kot del temeljenja.

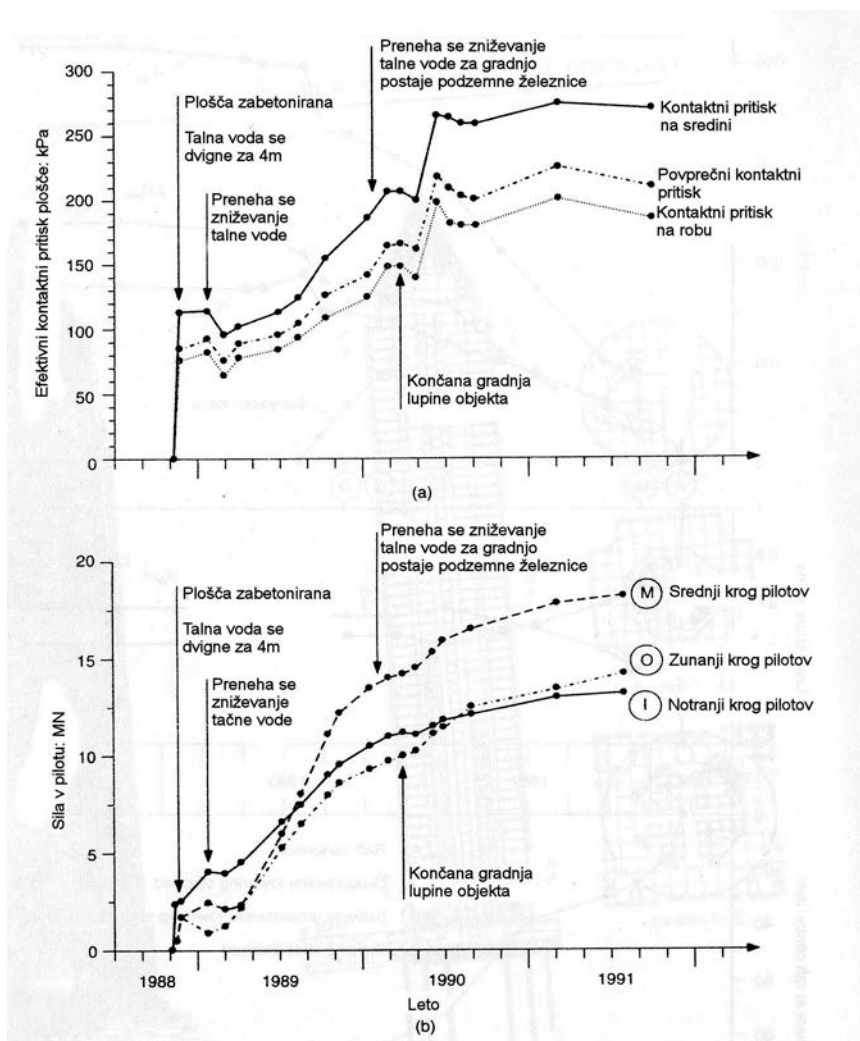


Slika 6: Rezultati opazovanja obnašanja stavbe Messeturm temelječe na plošči podprti s piloti, Frankfurt: (a) porazdelitev obtežbe in trenja po plašču po pilotih; (b) spreminjanje posedkov z globino

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 359)

Grdešič, J. 2009. Objekti temeljeni na ploščah, podprtih s piloti.

Diplomska naloga – UNI. Ljubljana, UL, Odd. za gradbeništvo, Konstrukcijska smer.

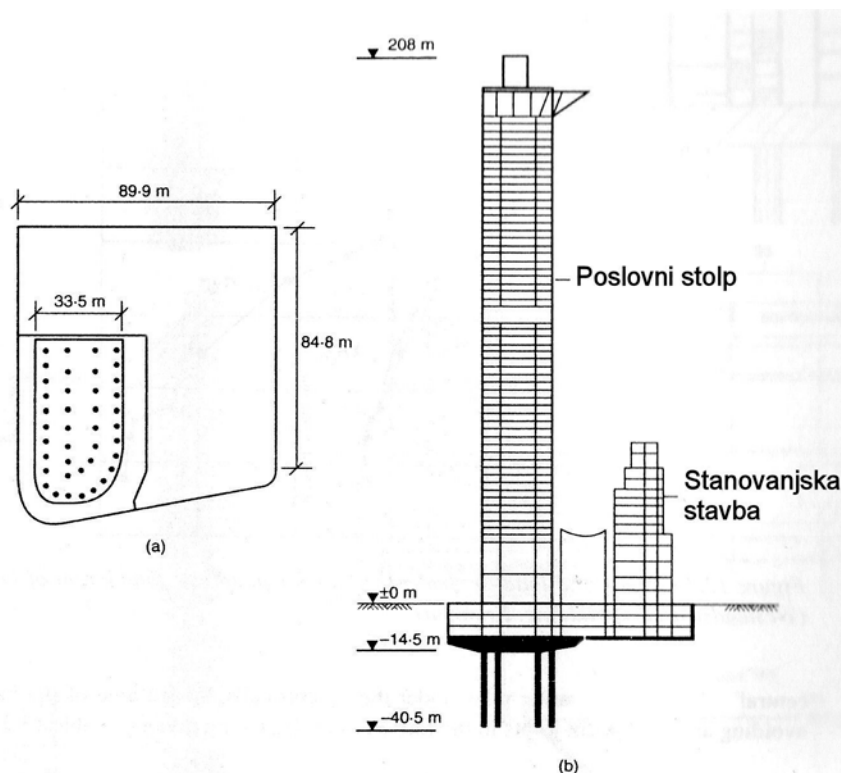


Slika 7: Prikaz časovno odvisnega obnašanja stavbe Messeturm temeljene na plošči podprti s piloti, Frankfurt: (a) povprečen efektiven kontakten pritisk med ploščo in tlemi; (b) sile v pilotih

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 358)

Izmerjene sile kažejo veliko večje mobilizirano trenje po plašču kot je bilo določeno za posamezen pilot.

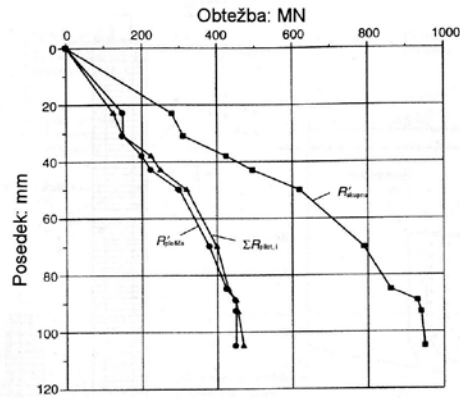
3.3 Stavba DG-Bank, Frankfurt, 1990 – 93



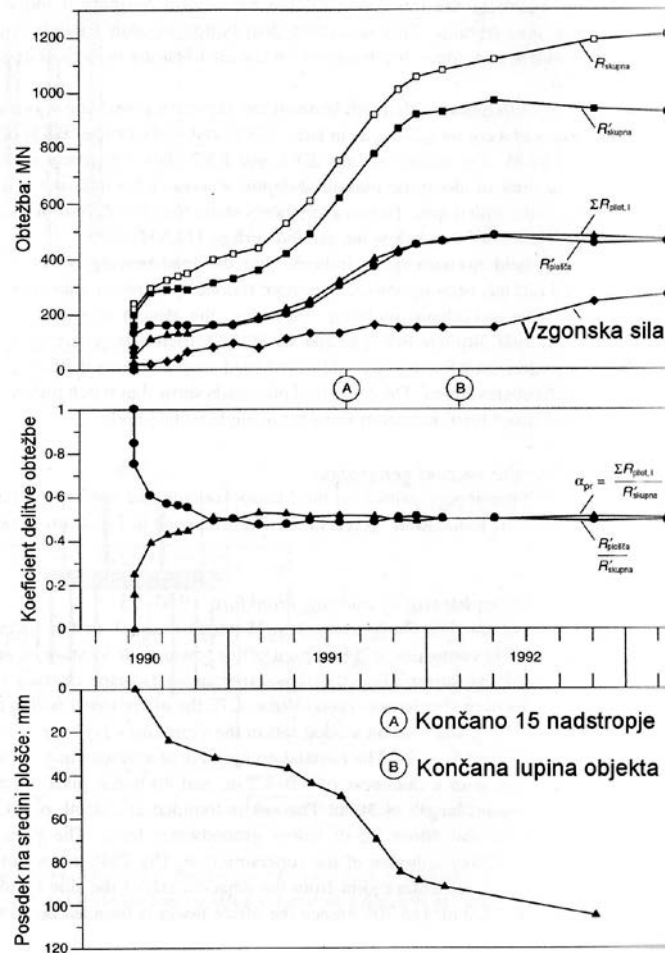
Slika 8: Stavba DG-Bank, Frankfurt: (a) načrt temeljenja; (b) prečni prerez
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 361)

Stavba je visoka 208 m in ima 53 nadstropij. Iz dveh strani jo obkroža 12 nadstropna stanovanjska stavba v obliki črke L. Skupaj tvorita celoto. Glede na faktor vitkosti ($H/B=4,7$), je poslovni blok z obtežbo 1420 MN temeljen na plošči podprti s piloti, zato da se zmanjša nevarnost diferenčnih posedekov. Temeljenje sestavlja plošča debeline 3 – 4,5 m, podprta s 40 uvrzanimi piloti premera 1,3 m in konstantne dolžine 30 m. Plošča je temeljena 14,5 m pod površino tal in 9,5 m pod nivojem talne vode. Piloti se nahajajo neposredno pod težkimi stebri. Temeljna plošča glavne stavbe je ločena od temeljne plošče sosednje stavbe. Poslovni stolp je temeljen na svoji, centrično obremenjeni temeljni plošči podprti s piloti.

Obtežba se med ploščo in pilote razporedi skoraj enakomerno. Ta porazdelitev ostane skoraj konstantna skozi celoten proces gradnje. Po končani gradnji je bil izmerjen posedek na sredini plošče 90 mm. Sile v pilotih so znašale 9,2 – 14,9 MN. Pod ploščo je bil izmerjen kontaktni tlak 150 kPa in porni tlak 50 kPa.

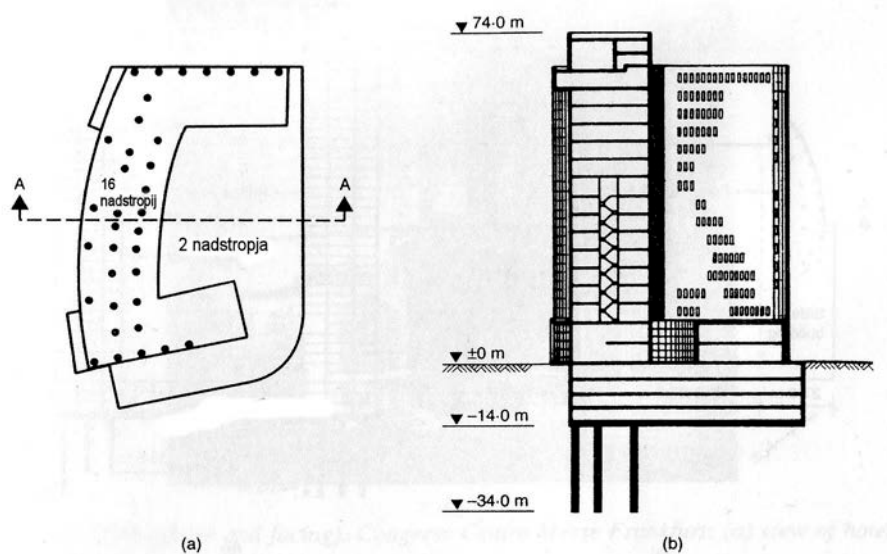


Slika 9: Izmerjeni posedki temeljenja stavbe DG-Bank, Frankfurt
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 362)



Slika 10: Opazovano obnašanje časovne odvisnosti obtežba-posedek ter porazdelitev obtežbe znotraj temeljenja stavbe DG-Bank, Frankfurt
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 363)

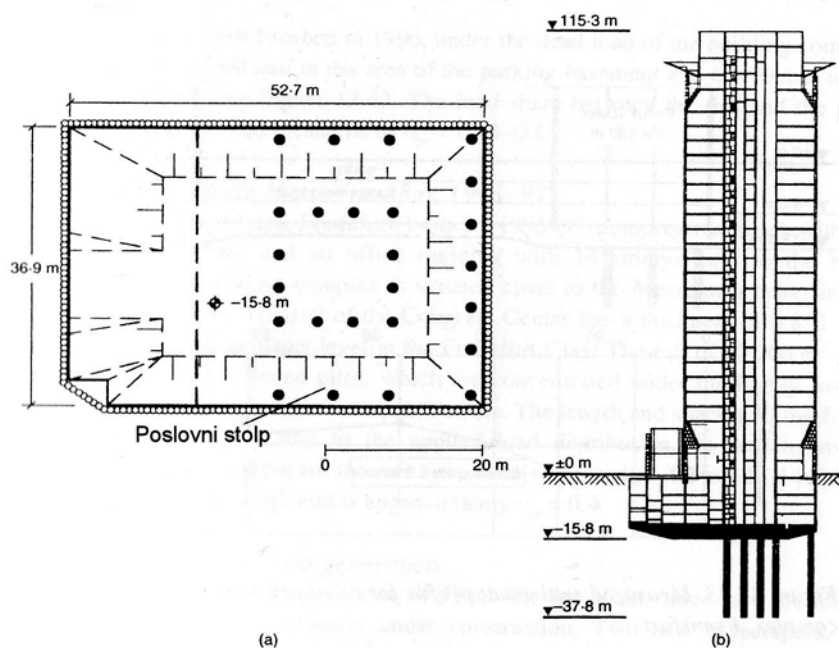
3.4 Stavba American Express, Frankfurt, 1991 – 92



Slika 11: Stavba American Express, Frankfurt: (a) načrt temeljenja; (b) prerez A-A
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 364)

Stavba American Express je 74 m visoka, 16 nadstropna poslovna stolpnica. Za zmanjšanje nagiba in diferenčnih posedkov je bilo uvrtenih 35 pilotov premera 0,9 m in dolžine 20 m. Tukaj imamo prvi primer temeljenja plošče podprte s piloti v Nemčiji, kjer je odpornost temeljenja osredotočena na združevanje pilotov pod ekscentrično obtežbo, da se izognejo točkam ekstremnih posedkov na plošči.

3.5 Stavba Taunustor-Japan-Centre, Frankfurt, 1994 – 96

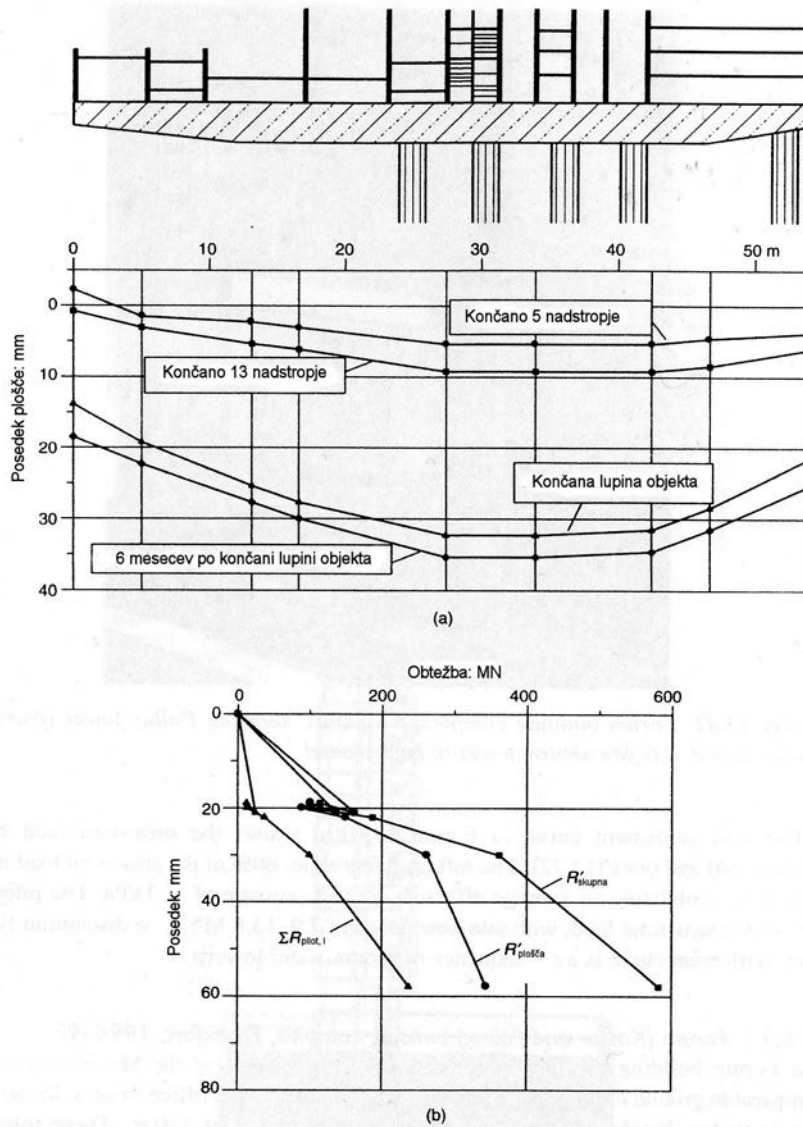


Slika 12: Stavba Japan-Centre, Frankfurt: (a) načrt temeljenja; (b) prečni prerez
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 364)

Stavba Japan – Centre je 115,3 m visoka poslovna stolpnica, ima 4 kletne etaže in 29 nadstropij nad tlemi. Tlorisna površina znaša 36 x 36 m. Celotna obtežba znaša 1050 MN, podpira pa jo temeljna plošča podprta s piloti, ki se nahaja 15,8 m pod površino, kar je 9,5 m pod nivojem talne vode. Plošča je na sredini debela 3 m, na robu pa 1 m. Pozicija 25 pilotov (premera 1,3 m; dolžine 22 m) je optimizirana tako, da so posedki pod celotno površino plošče čim bolj konstantni.

5 m pod konico pilota se nahaja sloj apnenca. Ta s svojo togostjo vpliva na nosilnost temeljenja. Šest mesecev po končani gradnji so bili posedki v območju od 19 – 36 mm.

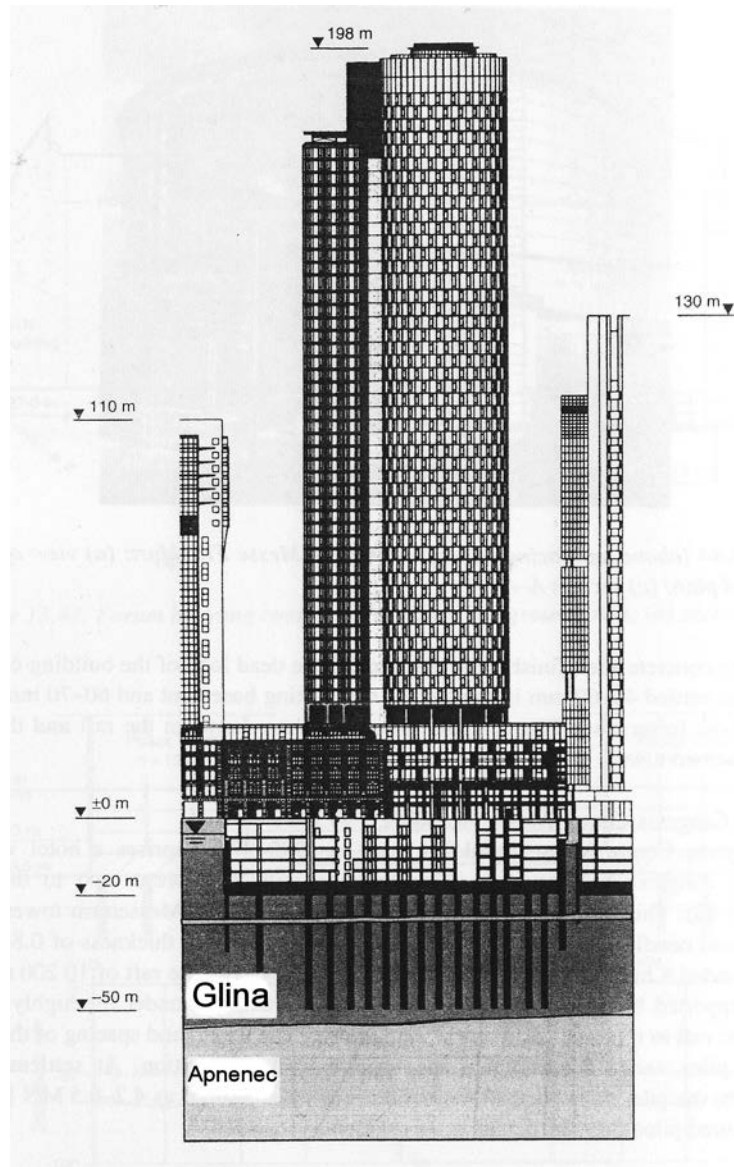
Plošča prenese približno 60 % obtežbe v tla in s tem mobilizira efektivni kontaktni tlak 180 kPa. Na pilote pade 40 % obtežbe kar pomeni silo 7,9 – 13,8 MN na pilot.



Slika 13: Opazovano obnašanje temeljenja stavne Japan-Centre, Frankfurt: (a) profili posedkov; (b) krivulje obtežba-posedek

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 365)

3.6 Stavba Main Tower, Frankfurt, 1996 – 99



Slika 14: Prečni prerez stavbe Main Tower, Frankfurt

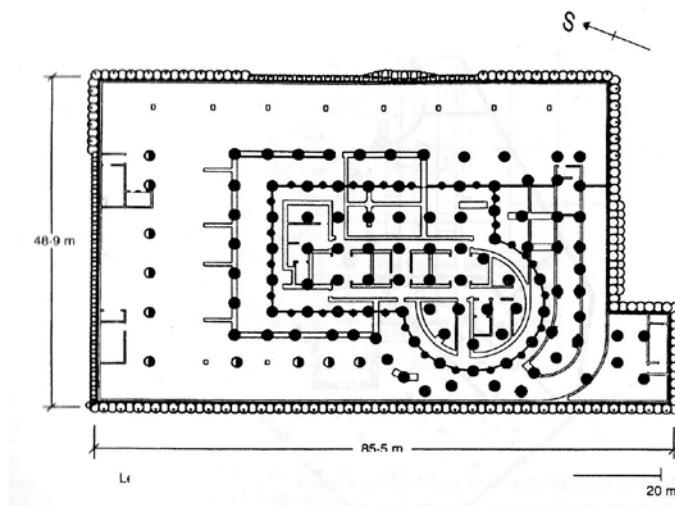
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 371)

Nebotičnik, ki ima pet kletnih etaž, pritličje in 57 nadstropij nad njim sega do višine 198 m. Plošča je temeljena na globini 21 m, kar je 14 m pod nivojem podzemne vode. Območje nebotičnika obsega 50 x 85 m. Celotna obtežba znaša približno 2000 MN.

Zmanjšanje posedkov zaradi izkopavanja in temeljenja nebotičnika je bilo glavno vodilo projektiranja. S tem dobijo uporabnejšo in stabilnejšo stavbo v urbanem okolju.

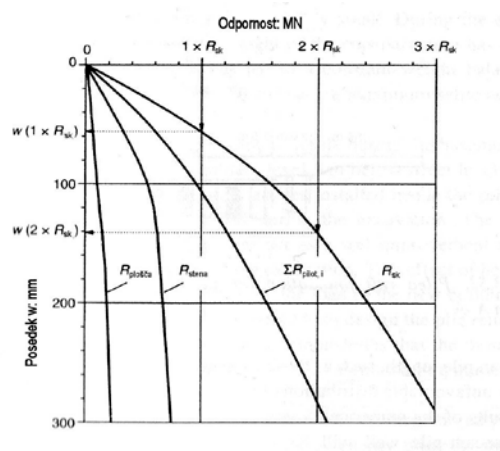
Plošča ima površino 3800 m^2 in je debela 3,8 m na sredini, točno pod jaškom. 3 m je debela po vsej ostali površini. Pilotiranje vsebuje 112 pilotov, ki sestavljajo tudi pilotno steno. Premer imajo 1,5 m in so dolžine 30 m, na robu pa so nekateri dolžine 20 m. Obtežbo prenašajo v tla preko trenja po plašču. 30 m dolgi piloti se nahajajo 5 – 8 m nad slojem apnenca. Predhodne numerične analize pokažejo, da bi različne uporabljene dolžine pilotov neugodno vplivale na porazdelitev obtežbe.

Obtežba, ki jo v tem primeru prevzame plošča, je zelo majhna. Maksimalni izmerjeni posedek je znašal 20 mm.



Slika 15: Načrt temeljenja stavbe Main Tower, Frankfurt

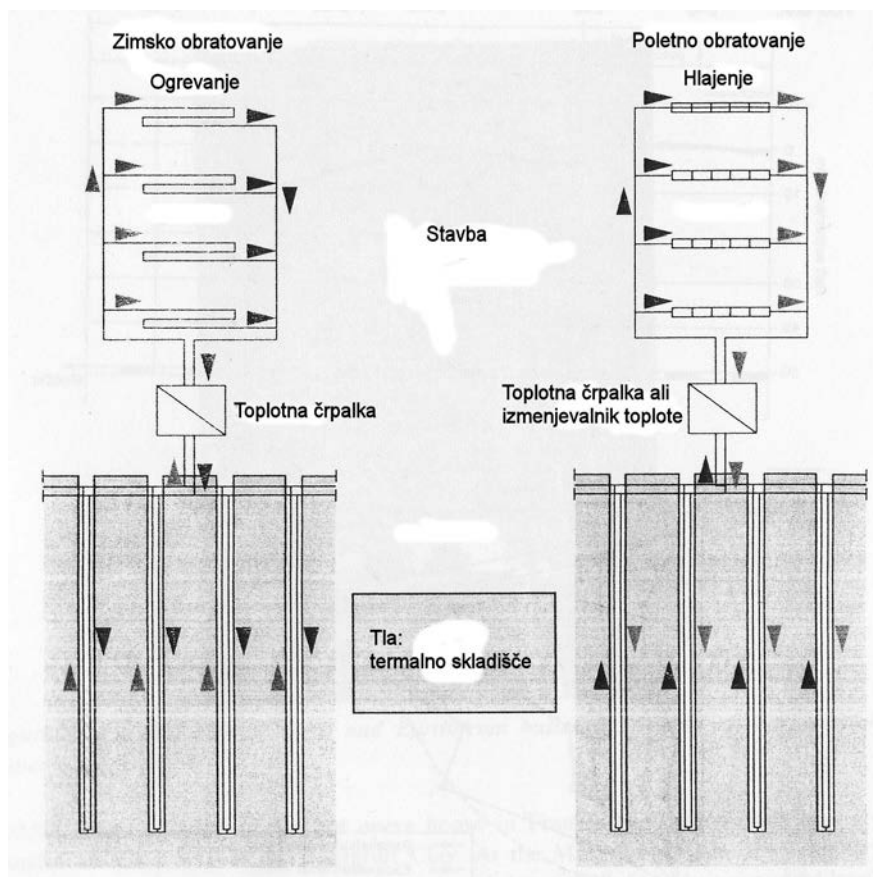
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 372)



Slika 16: Izračunane krivulje obtežba-posedek za temeljenje stavbe Main Tower, Frankfurt

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 372)

Poleg statične funkcije ima lahko temeljenje tudi okolju prijazno funkcijo. Pilote uporabljamo za okolju prijazno ogrevanje in hlajenje. V pilote so vgrajene toplotno izmenljive cevi, ki omogočajo kroženje vode. Na ta način uporabimo tla in podzemno vodo za termalno skladišče za ogrevanje in hlajenje pisarn.



Slika 17: Uporaba globljih zemljin in talne vode za sezonsko termalno skladiščenje pri stavbi Main Tower, Frankfurt

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 374)

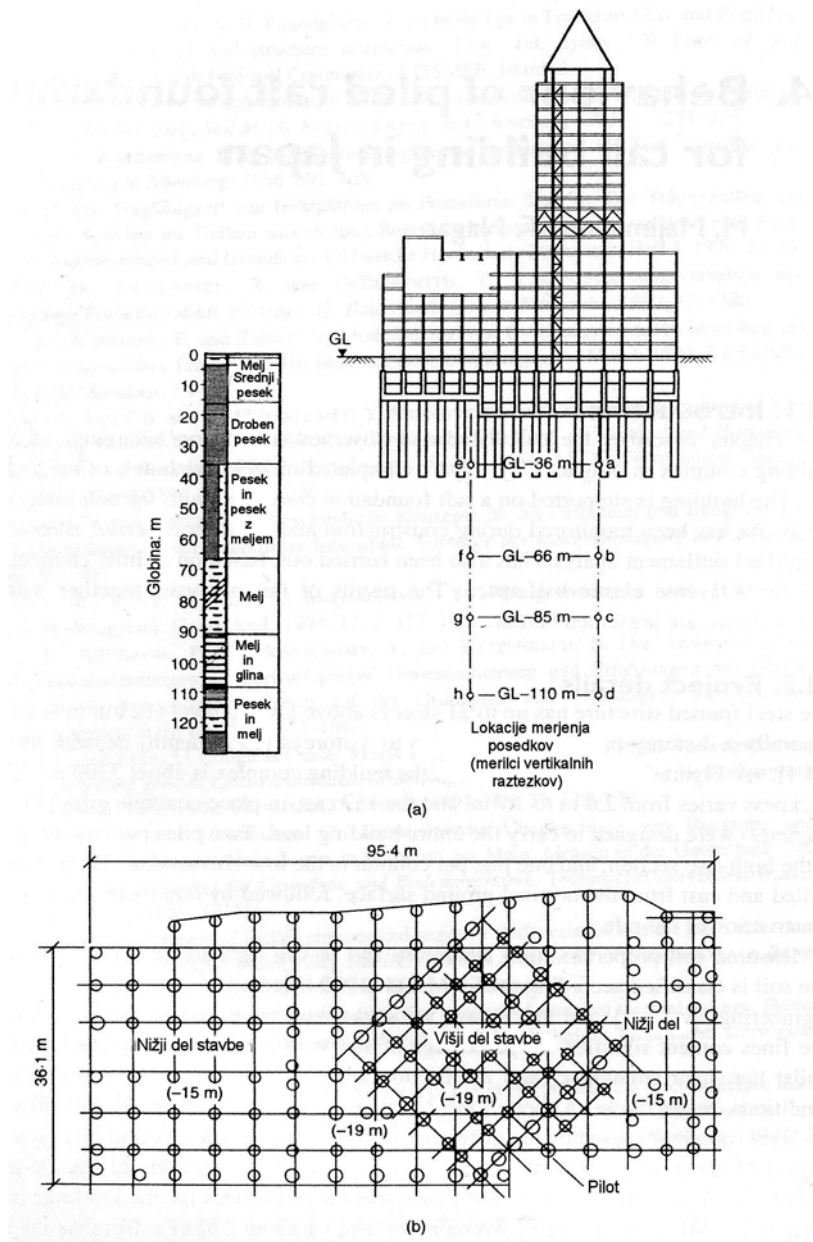
3.7 Stavba Commerzbank, Frankfurt, 1994 – 97

Stavba je pilotirana na 111 uvrtnih pilotih. Piloti merijo v dolžino do 45 m. Obtežba stolpa se prenese preko glin v trdni sloj apnenca. Pri projektiranju je bilo potrebno zagotoviti dvakrat večjo odpornost pilotov v primerjavi z obtežbo.

Pri Commerzbank so bili izmerjeni najmanjši posedki od vseh na pilotih temeljenih stavb v Frankfurtu. Znašali so 15 – 19 mm. Skoraj vsa obtežba se prenese s piloti v tla. Delež

obtežbe, ki pade na pilote, znaša približno 96 %. 85 % obtežbe pilotov se prenese v apnenec. Skozi trenje po plašču pa se mobilizira do 450 kPa.

3.8 Stavba v kateri je hotel, pisarne in trgovine, Niigata, Japonska, 1994



Slika 18: Stavbni kompleks v mestu Niigata, Japonska: (a) prečni prerez; (b) načrt temeljenja (Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 394)

Jeklen objekt ima 21 nadstropij, kar znaša 125 m v višino. Poleg tega ima še tri kletne etaže, kar pomeni globino 19 m pod zemljo. Površina kompleksa je 3300 m². Debelina plošče se spreminja od 2 m do 3,7 m in jo podpira 157 na mestu betoniranih pilotov premera 1 – 1,8 m. Na površini temeljenja, kjer se nahaja stolp, uporabijo dva pilota, kjer ga pa ni pa po en pilot. Ti piloti so uvrtni in zabetonirani do prvotnega nivoja terena, šele nato sledi izkop za klet in izdelava plošče.

V predelu nižje višine stavbe znaša dvig po izkopu 15 mm, na delu kjer je stolp, se pravi višji del stavbe, pa znaša dvig 28 mm (večja globina izkopa na tem predelu).

Posedki v območju od plošče do konice pilotov so neznani. Poznani pa so posedki med ploščo in globino 65 m, ti znašajo 80 % celotnih posedkov. Ostali posedki se zgodijo med globino 65 – 105 m.

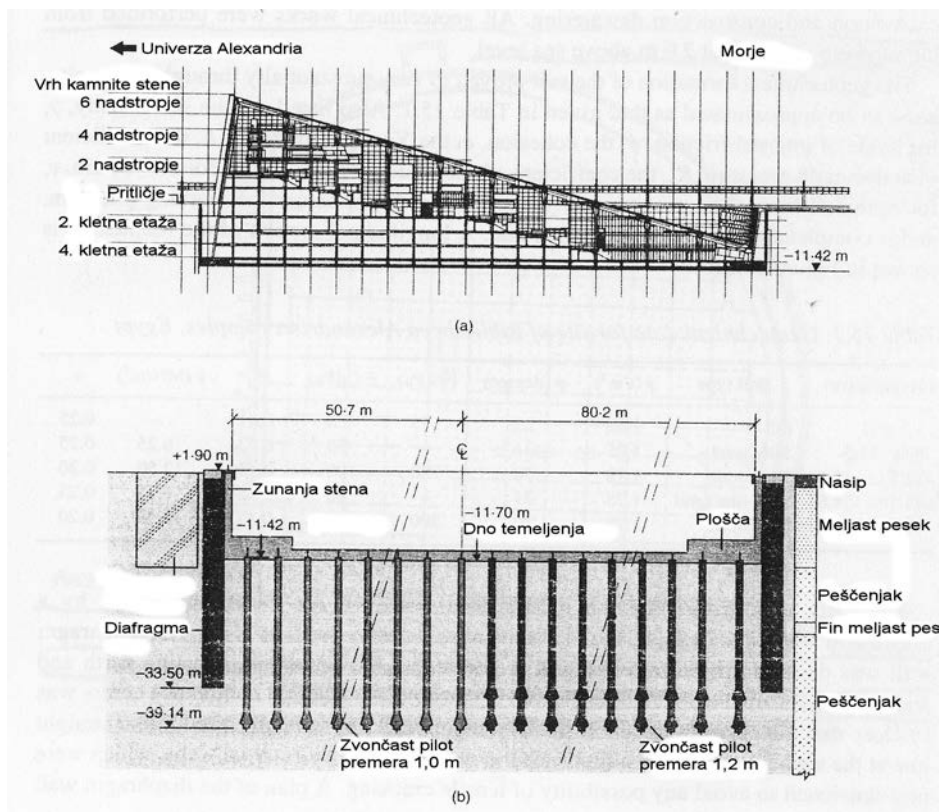
Maksimalni izmerjeni posedki znašajo 22 mm. Gradient maksimalnega osnega naklona znaša 1/3250.

Pritisk podzemne vode se kontrolira s podzemnimi črpalkami. V obdobju gradnje objekta povečajo tlak podzemne vode in s tem zmanjšamo posedke s pomočjo vzgona. Po končani gradnji imamo nivo talne vode na globini 2 m. Porni tlaki so temu primerni.

Efektivni kontaktni pritisk na ploščo pade, ko aktivirajo črpalke. S katerimi se začne povečevati porni tlak.

Na območju stolpa znaša sila v centralnem pilotu 1,2 MN, v vogalu pa 2,1 MN. V času gradnje je delež obtežbe, ki jo prevzamejo piloti konstanten in znaša približno 65 %. Po končanju glavne konstrukcije pa se ta delež poveča na 80 %.

3.9 Biblioteka Alexandrina, Alexandria, Egipt, 1995 – 1999



Slika 19: Prečna prereza z knjižnico Alexandrina, Egipt: (a) arhitekturni detajli; (b) detajli temeljenja

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 413)

Biblioteka Alexandrina je bila vrsto stoletij kulturno središče zahodnega sveta. Zgradil jo je Aleksander Veliki pred približno 2400 leti. Kasneje jo je požgal Julij Cezar. Da bi oživel staro knjižnico in hkrati ohranili 8 milijonov knjig, je bila zgrajena nova knjižnica Alexandrina. Novi kompleks leži na skoraj enaki lokaciji kot prejšnji. Grajen je za življenjsko dobo 200 let. Največja grožnja je bližnje Sredozemsko morje, ki je oddaljeno le 40 m.

Konstrukcija je premera 160 m in ima 10 nadstropij. Štiri etaže so pod zemljo in hkrati pod nivojem talne vode. Talna voda se nahaja 0,8 m nad morjem kar pomeni, da je 11 m nad kletno ploščo. Zaradi velikih dvižnih sil in nesimetričnih stalnih in spremenljivih sil, je neizogibna uporaba kompleksnega in dragega temeljenja.

Zaradi kompliciranega temeljenja knjižnica zahteva dodatno temeljenje in geotehnično delo, ki vključuje stene, uvtane pilote, poglobitve in izsuševanje konstrukcije. Vsa geotehnična dela so bila opravljena iz delovne ploščadi 2 m nad nivojem morja.

Z membransko steno je bila zagotovljena stabilnost globoke gradbene jame in talni vodi preprečen vdor v klet. Stena sega v peščenjak do globine 35 m. Membranska stena nudi odpor zemeljskemu pritisku in pritisku talne vode.

Temeljenje biblioteke sestoji iz betonske plošče podprte s piloti. Glede na obliko stavbe se v temeljenje prenaša nekaj ekscentričnih sil. Ekscentričnost se poveča, ko analiziramo kombinacije, ki vsebujejo obtežbe zaradi vetra, potresa in dviga. Plošča je konstruirana tako, da prenese obtežbo iz stavbe v pilote.

Intenzivnost obremenitve, ki pade na temeljenje, se zaradi nesimetrične notranjosti zgradbe, spreminja. Na južni strani deluje velika stalna obtežba, kar se kaže v velikih tlačnih silah v pilotih. Na severni strani pa so nujni natezni piloti, saj morajo prenesti dvižno silo, ki je posledica vzgona in majhne stalne obtežbe. Na sredini stavbe so piloti lahko v nategu ali tlaku, odvisno od pogojev. Vsi piloti segajo do plasti peščenjaka. Temeljenje obsega:

- 131 pilotov (1,5 m premera, vsebujejo razširitev na konici, večinoma so pod tlakom)
- 143 pilotov (1 m premera, imajo dve razširitvi na konici, večinoma so pod natezno – tlačno silo)
- 325 pilotov (1,2 m premera, imajo dve razširitvi na konici, večinoma so pod natezno silo)

Piloti v tlaku in piloti v tlaku – nategu so razporejeni v rastru 4,8 x 7,2 m, medtem ko so piloti v nategu razporejeni v kvadratnem rastru 4,8 m. Vsi piloti so ojačeni po celotni dolžini, v tlačnih pilotih se ta ojačitev zmanjša v spodnji polovici pilota.

Pilotiranje je bilo izvedeno pod zelo strogimi omejitvami. Preden se je začelo vrtnanje, je bil jeklen opaž zabit v peščenjak.

Le nekaj ur po končanem betoniranju pilotov, se začne z zalivanjem z malto. Malta se vbrižgava ob plašču pilota. Cilj zalivanja z malto je izboljšanje nosilnosti pod konico in po plašču. Redka malta se nahaja v betonski cevi. Plastična cevka ima luknje pokrite z čepi. Ti čepi počijo ob črpanju vode, ki počí tudi betonski ovoj cevi. Malta zalije prostor med pilotom in obdajajočim jaškom. Konice pilota zalijejo z malto tako, da so cevke pritrjene tudi na konico.

Debelina dela plošče, ki je podprt s piloti v tlaku in piloti v tlaku – nategu znaša 1275 mm. Plošča je povezana do nivoja kletne plošče s kratkimi stebri in vertikalnimi spleti. Kot je omenjeno že prej, se natezni piloti nahajajo v severnem delu objekta. Da se zmanjša delež

natezne sile v pilotih, dodajo na tem delu dodatno stalno obtežbo tako, da povečamo debelino plošče na tem delu iz 1275 mm na 2400 mm. Povečanje debeline pa tudi povečuje upogibno nosilnost plošče. S tem tudi nekoliko preprečijo poškodbe, ki se lahko pojavijo zaradi nateznih pilotov.

Temeljna plošča je postavljena na 200 mm debel podložni beton na katerega je postavljena vodo neprepustna membrana. Temeljna plošča je konstrukcijsko ločena od membranske stene. Da bi zagotovili popolno izolacijo, spojimo robove temeljne plošče in zunanje stene. Zunanja stena je postavljena ob membransko steno z vmesno neprepustno membrano.

Poznamo dva različna pristopa k načrtovanju temeljev. Prvi pravi, da naj bodo temelji projektirani tako konzervativno kot je ostala konstrukcija in posledično utrpijo poškodbe enake stopnje kot ostala konstrukcija. Opravičilo za to metodo je, da imajo temelji nizko ekonomsko vrednost. Omejena pa je tudi občutljivost temeljev na premike tal. Druga opcija pa je, da projektiramo temelje bolj konzervativno kot preostala konstrukcija, tako da se obnaša vsaj tako dobro, ali boljše kot preostala konstrukcija. Ta drugi pristop je pogosto bolj priporočljiv zaradi težkega in dragega popravila.

Za racionalno projektiranje je nujno, da določimo ekspliciten kriterij porazdelitve sil in kako jih prenesemo v različne dele temeljenja. Uporabiti je potrebno različne ukrepe, da zagotovimo MSN in MSU. Recimo, vsi stebri se nahajajo skoraj direktno nad piloti. S tem zmanjšamo upogibne momente v plošči. Prečne stene in jedra prenesejo svojo obtežbo indirektno v pilote preko upogiba plošče. Ker je temeljenje izpostavljeno dvižnim silam, moramo zagotoviti vertikalno sidranje. To storimo s pomočjo pilotov.

Tretjina natezno obremenjenih pilotov predstavlja projektantu velik izziv. Še posebej če vzamejo v zakup 200 letno življenjsko dobo. Širina razpok v plošči in pilotih je omejena, da zaščitijo armaturo.

Skrbi zaradi razpok so bile iz dveh razlogov: puščanja in korozije. Armatura obdana z betonom ne bo korodirala dokler je vzpostavljena elektrolitična akcija. To se zgodi, ko karbonizacija betona doseže jeklo, ali ko kloridi pridejo do površine palic armature. Čas potreben za ta pojav je odvisen od vremena in ne od razpok betona, okolja, debeline obloge ali trajnosti betona. Zaščitna plast betona znaša 75 mm. Posebna pozornost je namenjena zagotovitvi vodoodpornosti stika med nateznim pilotom in ploščo.

Armiran beton temeljne plošče je lahko izpostavljen:

- kemikalijam (morska voda)

- koroziji položene armature
- kemični reakciji agregatov

Plošča mora biti zelo trajna, sicer jo bo težko in drago popraviti. Močno armirana plošča mora biti brez razpok, da se izognemo koroziji in zagotovimo vodotesnost. Beton sestavljajo visoko kvalitetne sestavine. Vodocementni faktor je nizek, cement ima nizko hidrationsko toploto.

Da bi se izognili upogibnim razpokam betona, mora imeti beton minimalno natezno trdnost 5 MPa. Da minimiziramo termalno pokanje, določimo maksimalno temperaturo betona 32 °C.

V standardnem prerezu plošče sta dva sloja armature v zgornjem delu in dva v spodnjem. Gostota armature znaša 145 kg/m³, na nekaterih območjih pa presega 180 kg/m³.

Velika gostota armature oteži vibracijo betona. Zelo pomembno je, da se konstrukcija vibrira, saj je potrebno zagotoviti vodotesnost. Vibriranje je bilo nujno za zagotovitev dobre sprejemljivosti med svežim in nekoliko starejšim betonom. Tlačna trdnost 28 dni starega betona je morala znašati 45 MPa.

4 PROJEKTIRANJE PLOŠČ, PODPRTIH S PILOTI

4.1 Uvod

Praksa pri projektiranju je, da se najprej uporabi plitvo temeljenje. Če to ni primerno, objekt temeljimo globoko na pilotih. V tem primeru, celotno projektno obtežbo prenesejo piloti. Kljub takšnemu projektному pristopu, je plošča sestavni del temeljenja (zagotoviti je treba tla v kleti). V zadnjih nekaj letih se je začela uporaba pilotov s katero zmanjšamo posedke in diferenčne posedke plošče. Takšen način je ekonomičen in ne poslabšuje varnosti in delovanja temeljenja. V tem primeru za prevzem obtežbe izrabljamo tako pilote kot ploščo, temeljno konstrukcijo imenujemo plošča podprta s piloti.

4.2 Praktično projektiranje

4.2.1 Na kaj je treba paziti pri projektiranju

- a) Mejno nosilnost glede na vertikalno, momentno in vodoravno obtežbo
- b) Togost in posedke
- c) Diferenčne posedke in kotne zasuke
- d) Vodoravne premike in togosti
- e) Dimenzije plošče in pilotov

Za mejno stanje velja:

$$E_d \leq R_d \quad (34)$$

E_d ... projektna vrednost učinka vpliva

R_d ...projektna vrednost odpornosti proti vplivu

$$E_d = \gamma_E E \{ F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} \quad (35)$$

in

$$R_d = R \{ \gamma_F F_{rep}; X_k / \gamma_M; a_d \} / \gamma_R \quad (36)$$

γ_E ...delni faktor za učinek vpliva

γ_M ...delni faktor za materialno lastnost zemljine, ki upošteva tudi nezanesljivost modela

γ_R ...delni faktor za odpornost

F_{rep} ...reprezentativna vrednost vpliva

X_k ...karakteristična vrednost materialne lastnosti

a_d ...projektna vrednost geometrijskega podatka

Posedki, diferenčni posedki in bočni premiki morajo biti znotraj predpisanih mej.

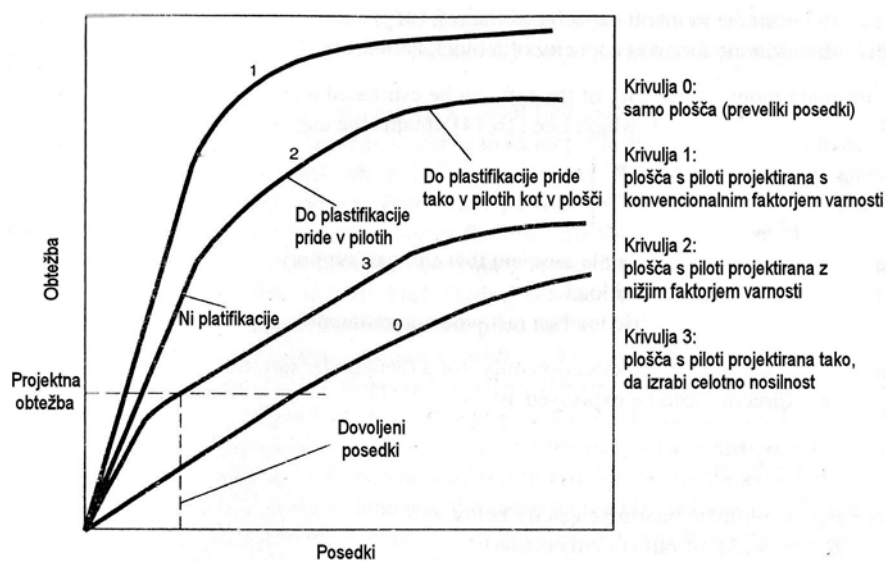
Dimenzioniranje temeljev zahteva določitev (oceno):

- a) Upogibnih momentov in strižnih sil v plošči
- b) Osne sile, prečne sile in upogibne momente v pilotih

Celovita projektna metoda po kateri bi projektirali, naj bi upoštevala vse zgoraj navedene faktorje. Takšna analiza obstaja samo v obliki zapletene tro-dimenzionalne numerične analize. Zato je nujno, da poznamo preproste metode s katerimi lahko ocenimo rezultate in kasneje vrednotimo rezultate dobljene z računalnikom.

4.2.2 Alternativne filozofije projektiranja

1. Konvecionalen pristop je tisti, pri katerem so piloti projektirani kot skupina, ki nosi večino obtežbe. Dovolijo tudi majhen vpliv plošče na nosilnost.
2. Piloti, ki lezejo: delujejo v območju 70 – 80 % mejne nosilnosti, kjer se pojavi že pomemben delež plastičnega lezenja na stiku pilot zemljin. Uporabiti moramo ustrezno število pilotov, da zmanjšajo kontaktni pritisk med ploščo in tlemi na nivo pod prekonsolidacijski tlak tal.
3. Kontrola diferenčnih posedkov. Tu so piloti postavljeni tako, da zmanjšajo diferenčne posedke, na pa da zmanjšajo skupne posedke.



Slika 20: Krivulje temeljenja obtežba-posedek pri različnih filozofijah projektiranja (Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 428)

4.2.3 Ugodne in neugodne razmere za plošče podprte z piloti

Najbolj učinkovito je takšno temeljenje, da plošča zagotovi ustrezno nosilnost. Skupni ali diferenčni posedki plošče pa ne presežejo maksimalno vrednost. Poulos je opazoval veliko profilov tal in ugotovil, da so najprimernejše naslednje situacije:

- a) Tla sestavljajo relativno trdne gline.
- b) Tla so sestavljena iz relativno zgoščenih peskov.

V obeh primerih plošča pomembneje doprinese k nosilnosti in togosti. Piloti bolj reagirajo na dvigovanje temeljev, kot nudijo večjo podprtost.

Obratno, tam kjer je takšno temeljenje neprimerno:

- a) Mehke gline blizu površja (tu celotno obtežbo prenesejo piloti, plošča ne zagotovi zadostne nosilnosti in togosti)
- b) Rahli peski blizu površine (tu celotno obtežbo prenesejo piloti, plošča ne zagotovi zadostne nosilnosti in togosti)
- c) Profili tal, katera sestavljajo mehki stisljivi sloji relativno plitvih globin. S časom plošča več ne prispeva toliko k togosti temeljenja.

- d) Profili tal, ki bodo prestali konsolidacijske posedke zaradi zunanjih razmer (zaradi izsuševanja ali krčenja sloja gline). Tukaj pride do izgube kontakta med zemljino in ploščo, temu sledi povečana obremenitev na pilotih in posledično večji posedki.
- e) Profili tal, ki bodo prestali premike zaradi nabrekanja, zaradi zunanjih razmer. Posledično se lahko v pilotih pojavijo natezne sile.

4.2.4 Projektiranje

Racionalen pristop projektiranja zajema dve glavni fazi:

- a) Primarna faza zajema ugotavljanje izvedljivosti in potrebno število pilotov, da zadovoljimo projektne zahteve.
- b) Faza detajlnega projektiranja zajema optimalno število pilotov, lokacijo in konfiguracijo pilotov. Račun natančne porazdelitve posedkov, upogibnih momentov in strižnih sil v plošči, ter sil in momentov v pilotih.

V primarni fazi lahko enostavne izračune dobimo brez računalnika. Detajlna faza pa zahteva primerno računalniško opremo, ki zajema vse potrebne interakcije med zemljino, ploščo in piloti.

4.3 Primarna faza projektiranja

4.3.1 Ocena mejne geotehnične nosilnosti

4.3.1.1 Navpična obtežba

Mejna nosilnost temeljenja je ocenjena kot manjša od sledečih dveh vrednosti:

- a) Vsota mejne nosilnosti plošče plus vseh pilotov v sistemu.
- b) Mejna nosilnost kocke, ki vsebuje vse pilote in ploščo plus ter nosilnost deleža plošče zunaj območja skupine pilotov.

4.3.1.2 Vodoravna obtežba

Za vodoravno obtežbo velja :

- a) Vsota mejne nosilnosti plošče plus vseh pilotov v sistemu.
- b) Mejna nosilnost kocke, ki vsebuje vse pilote in ploščo ter nosilnost deleža plošče zunaj območja skupine pilotov.

Omeniti pa je potrebno naslednje stvari:

- a) Upoštevati je potrebno odziv v obeh pravokotnih vodoravnih smereh.
- b) Mejna odpornost plošče v vodoravni smeri upošteva tako strižno odpornost na spodnji strani plošče, kot pasivno odpornost ob boku zakopanega dela plošče.
- c) Za mejno nosilnost moramo upoštevati tako porušitev temeljnih tal, kot upogibno porušitev pilotov.
- d) Za mejno nosilnost kocke bo merodajna t.i. »porušitev kratkega pilota« v vodoravni smeri.

4.3.1.3 Momentna obtežba

Mejno momentno nosilnost približno ocenimo kot manjšo od:

- a) Mejne momentne nosilnosti plošče (M_{ur}) in skupine pilotov (M_{up})
- b) Mejne momentne nosilnosti kocke, ki vsebuje pilote, ploščo in zemljino (M_{ub})

Mejna momentna nosilnost plošče po enačbi Lee – ja:

$$\frac{M_{ur}}{M_m} = \frac{27}{4} \frac{V}{V_u} \left[1 - \left(\frac{V}{V_u} \right)^{1/2} \right] \quad (37)$$

M_m ...Maksimalen moment, ki ga tla lahko podprejo

V ...Vertikalna obtežba

V_u ...Mejna centrična obtežba na ploščo, ko na ploščo ne deluje moment

Obravnavamo obtežbo samo v x – smeri za pravokotno ploščo, maksimalen moment znaša:

$$M_m = \frac{p_{ur} B L^2}{8} \quad (38)$$

p_{ur} ...mejna nosilnost pod ploščo

B ...širina plošče (y – smer)

L ...dolžina plošče (x – smer)

Mejni moment, ki ga prispevajo piloti:

$$M_{up} \approx \sum_{i=1}^{n_p} P_{uii} |x_i| \quad (39)$$

P_{uii} ... mejna nosilnost proti dvigu tipičnega pilota i

$|x_i|$... absolutna razdalja pilota i od težišča skupine

n_p ... število pilotov

Nosilnost kocke (ocenimo po teoriji »kratkih pilotov«). Poulos in Davis predlagata naslednjo rešitev, če ni delujoče horizontalne sile:

$$M_{uB} = \alpha_B \bar{p}_u B_B D_B^2 \quad (40)$$

B_B ... širina kocke, pravokotna na smer obtežbe

D_B ... globina kocke

\bar{p}_u ... povprečna bočna odpornost zemljine vzdolž kocke

α_B ... faktor odvisen od razporeditve stranskega pritiska po globini

(0,25... p_u konstanten po globini)

(0,20... p_u linearno narašča po globini)

4.3.2 Ocena odvisnosti posedkov od obtežbe

Cela vrsta enostavnih analitičnih metod je izdelana za oceno odvisnosti posedka od obtežbe.

Poulos in Davis sta razvila enostavno metodo, kjer lahko ocenimo krivuljo obtežba – posedki do porušitve. Elastične rešitve so uporabljene za začetno togost temeljenja in posebej plošče.

Dobljena je krivulja obtežba – posedek, ki ima tri linearne dele. Upošteva samo popolnoma toge ali popolnoma gibke plošče.

Randolph je razvil uporabne približne enačbe za račun togosti temeljenja plošče podprte s piloti in delitve obtežbe med piloti in ploščo. Metoda je omejena na linearno obnašanje.

Znane so še druge metode, ki so jih predstavili avtorji kot so Franke, van Impe in de Clerq. V kasnejših elastičnih metodah so vpeljane različne interakcije, obnašanje pilotov pa je povzeto po Randolphu in Wrothu.

Spodaj je opisana metoda, ki združuje in razširi metode Poulosa in Davisa ter Randolpha.

Vključeni so sledeči vidiki:

- a) Ocena delitve obtežbe med ploščo in piloti.
- b) Hiperbolična zveza med obtežbo in upogibom za pilote in ploščo. Tako dobimo bolj realno zvezo med obtežbo in posedki temeljenja v primerjavi s trilinearnim pristopom Poulosa in Davisa.

Ocena posedkov (S):

$$0 \leq V \leq V_A :$$

$$S = \frac{V}{K_{pr}} \quad (41)$$

$$V_A \leq V :$$

$$S = \frac{V_A}{K_{pr}} + \frac{V - V_A}{K_r} \quad (42)$$

V ...vertikalna obtežba

K_{pr} ...osna togost sistema temeljenja

V_A ...obtežba pri kateri je dosežena nosilnost pilotov

K_r ...osna togost plošče

V_A lahko ocenimo iz:

$$V_A = \frac{V_{pu}}{\beta_p} \quad (43)$$

V_{pu} ...mejna nosilnost pilotov (manjša od vrednosti, ki izhaja iz porušitve kocke ali vsote nosilnosti posameznih pilotov)

β_p ...delež obtežbe, ki jo prevzamejo piloti

$$K_{pr} = X \cdot K_p \quad (44)$$

$$X \approx \frac{1 - 0,6(K_r / K_p)}{1 - 0,64(K_r / K_p)} \quad (45)$$

$$\beta_p = 1 / (1 + \alpha) \quad (46)$$

$$\alpha \approx \frac{0,2}{1 - 0,8(K_r / K_p)} \left(\frac{K_r}{K_p} \right) \quad (47)$$

Predpostavimo, da je zveza med obtežbi in posedki pri plošči in pilotih hiperbolična. Potem je sekantna togost pilotov (K_p) in plošče (K_r) izražena kot:

$$K_p = K_{pi} (1 - R_{fp} V_p / V_{pu}) \quad (48a)$$

$$K_r = K_{ri} (1 - R_{fr} V_r / V_{ru}) \quad (48b)$$

K_{pi} ...začetna tangentna togost skupine pilotov

R_{fp} ...hiperbolični faktor za skupino pilotov

V_p ...obtežba, ki jo nosijo piloti

V_{pu} ...mejna nosilnost pilotov

K_{ri} ...začetna tangentna togost plošče

R_{fr} ...hiperbolični faktor za ploščo

V_r ...obtežba, ki jo nosi plošča

V_{ru} ...mejna nosilnost plošče

Obtežba, ki jo nosijo piloti, je izražena z:

$$V_p = \beta_p V \leq V_{pu} \quad (49)$$

Obtežba, ki jo nosi plošča, pa znaša:

$$V_r = V - V_p \quad (50)$$

Sedaj dobimo drugačno zvezo med obtežbo in posedki:

$$V \leq V_A$$

$$S = \frac{V}{XK_{pi} \left(1 - \frac{R_{fp} \beta_p V}{V_{pu}} \right)} \quad (51)$$

$$V > V_A$$

$$S = S_A + \frac{V - V_A}{K_{ri} \left[1 - R_{fr} \frac{(V - V_{pu})}{V_{ru}} \right]} \quad (52)$$

kjer je

$$S_A = \frac{V_A}{XK_{pi} (1 - R_{fp})} \quad (53)$$

4.3.2.1 Takojšnji in končni posedki

Zgornjo metodo lahko uporabimo za oceno tako trenutnih, kot končnih posedkov temeljenja v glini. Za trenutne posedke v nedreniranem stanju je pomembna togost pilotov in plošče. Po teoriji elastičnosti, ocenimo posedke z uporabo nedreniranih vrednosti modulov in Poissonovega količnika zemljine. Za dolgotrajne posedke (takojšnji in konsolidacijski posedki) se togost plošče in pilotov izračuna z dreniranimi moduli in Poissonovim količnikom. Konsolidacijski posedek je razlika med končnim in trenutnim posedkom.

Zaradi možnosti nelinearnega obnašanja med obremenjevanjem v nedreniranem stanju zgornji postopek ne bo vedno natančen. Zato, kot predlagata Poulos in Davis, izračunamo konsolidacijske posedke kot razliko med končnimi elastičnimi posedki (drenirano stanje) in trenutnimi elastičnimi posedki (nedrenirano stanje). Konsolidacijske posedke prištejemo izračunanem trenutnim posedkom iz nelinearne analize. Skupni posedki potem znašajo:

$$S_{TF} = \frac{V}{K_u} + V \left(\frac{1}{K'_e} - \frac{1}{K_{ue}} \right) \quad (54)$$

V...vertikalna obtežba

K_u ...nedrenirana togost temeljenja (iz nelinearne analize)

K_{ue} ...nedrenirana togost temeljenja (iz elastične nedrenirane analize)

K_e' ...drenirana togost temeljenja (iz elastične drenirane analize)

4.3.2.2 Diferenčni posedki

Metoda opisana zgoraj služi samo oceni povprečnega obnašanja temeljenja. Diferenčni posedki so predvsem odvisni od porazdelitve obtežbe, postavitve pilotov in relativne togosti plošče. Randolph je predlagal približno metodo (poglavje 5.4) za oceno diferenčnih posedkov enakomerno obteženega temeljenja. Izračun le teh bo prikazan na praktičnem primeru.

4.3.3 Ocena obremenitve pilotov

Piloti nosijo delež obtežbe, osna sila P_i v pilotu i je ocenjena z:

$$P_i = V\beta_p / n_p + M_x^* x_i / I_y + M_y^* y_i / I_x \quad (55)$$

kjer je

$$M_x^* = \frac{M_x - M_y I_{xy} / I_x}{1 - I_{xy}^2 / (I_x I_y)}, \quad M_y^* = \frac{M_y - M_x I_{xy} / I_y}{1 - I_{xy}^2 / (I_x I_y)} \quad (56)$$

V ...celotna vertikalna obtežba, ki deluje v središču temeljenja

n_p ...število pilotov

M_x, M_y ...momenti okoli središča skupine pilotov v smeri osi x in y

β_p ...delež obtežbe, ki jo nosijo piloti

I_x, I_y ...vztrajnostni moment skupine pilotov v smeri osi x in y

I_{xy} ...deviacijski vztrajnostni moment pilotov

x_i, y_i ...razdalja pilota i od osi x in y

M_x^*, M_y^* ...efektivni momenti v smeri x in y , upoštevajoč simetrijo pilotov

Za simetrično razporeditev pilotov velja, $I_{xy}=0$ in $M_x^*=M_x, M_y^*=M_y$:

$$P_i = V\beta_p / n_p \pm \frac{M_x x_i}{\sum_{i=1}^{n_p} x_i^2} \pm \frac{M_y y_i}{\sum_{i=1}^{n_p} y_i^2} \quad (57)$$

Zgornji pristop zahteva sledeče predpostavke:

1. plošča je toga,

2. spoji med ploščo in piloti so členkasti, nič momenta se ne prenese v pilot,
3. piloti so vertikalni.

4.4 Podrobnejše projektiranje

Primarna faza pokaže, ali je temeljenje izvedljivo. Potem pa je potrebno narediti natančnejšo oceno posedkov, določiti je potrebno optimalno postavitev pilotov. Določiti pa moramo še upogibne momente in prečne sile v plošči ter sile v pilotih. Obravnavali bomo dva različna modela analize:

- približna metoda računalniške analize,
- bolj stroga metoda računalniške analize.

4.4.1 Približne metode računalniške analize

4.4.1.1 Metode, ki obravnavajo temeljenje kot trak na vzmeteh

Profil plošče je prikazan kot trak, vzmeti pa predstavljajo pilote. Približno so upoštewane vse štiri interakcije (pilot – plošča, plošča – pilot, plošča – plošča, pilot – pilot). Analizirani so tudi vplivi delov plošče zunaj površine traku, izračunamo premike zemljine na območju teh delov in interakcijo teh delov s trakom. Metoda je prilagodljiva in daje primerljive rezultate z bolj natančnimi metodami. Vendar ima pomembne omejitve. Ne upošteva torzijskih momentov znotraj plošče. Za posedke ne da konsistentnih vrednosti v točki, če gresta čez to točko dva trakova v različnih smereh.

4.4.1.2 Metode, ki obravnavajo temeljenje kot ploščo na vzmeteh

Temeljna plošča je simulirana z elastično ploskvijo, vzmeti, ki jo podpirajo, pa nadomeščajo pilote. Nekateri zgodnji pristopi k tej metodi so zanemarjali nekatere učinke interakcije zato so bile dobljene togosti prevelike. Kasneje so se metode razvile in upoštevale vse te interakcije.

Naprednejša verzija metode modelira pilote kot končne elemente. Metoda je še vedno omejena na elastično območje. Kasneje se piloti analizirajo nelinearno in ploščo modeliramo s končnimi elementi.

4.4.2 Bolj stroge numerične metode analize

4.4.2.1 Metoda robnih elementov

Diskretizirana je plošča in vsak pilot posebej. Zgodnji primer te metode je metoda Butterfield in Banerjee-ja. Študirala sta skupine pilotov v elastični zemljini s togo ploščo na površju. Kuwabara opiše metodo analize plošče podprte s piloti v elastični homogeni masi zemljine. Za ploščo se predpostavi, da je absolutno toga, v analizi pa se upošteva tudi stisljivost pilotov. Odkrito je bilo, da plošča v elastičnih pogojih pri normalnem razmaku med piloti, nosi le majhen del obtežbe. Poulos razširi metodo Kuwabare tako, da dovoli vpliv prostih premikov zemljine in omeji kontaktne pritiske med zemljino in ploščo. Prav tako omeji razvoj mejnih tlačnih in nateznih sil v pilotih. Omejitev, da je plošča toga, še vedno ostane.

4.4.2.2 Metode, ki združujejo robne in končne elemente

Hain in Lee objavita seminar o analizi plošč podprtih s piloti. Ploščo predstavlja serija ploskovnih končnih elementov, karakteristike pilotov pa so izračunane z metodo robnih elementov. Da se zmanjša zahteva po zmogljivosti računalnika se uvede koncept interakcijskega faktorja. Njuna metoda se uporabi v veliko raziskavah, kljub temu da vsebuje veliko predpostavk. Analiza je bila pravzaprav elastična, vendar sposobna vsebovati razvoj mejnih sil v pilotih. Omejitev metode je v tem, da zemljino obravnava kot elastični polprostor.

Metodo kasneje dopolni Franke, tako da dovoli nelinearen odziv pilotov.

Shina pa predpostavi, da je zemljina homogena elastična masa. Nelinearno obnašanje pilotov se dovoli v primeru omejitve kontaktnega pritiska plošče na zemljino, tako v tlaku kot nategu. Določiti pa je tudi potrebno mejno napetost med pilotom po plašču in zemljino. Enako velja za napetost pod konico pilota. Upošteva pa lahko tudi drsenje in konsolidacijo tal.

4.4.2.3 Poenostavljena metoda končnih elementov

Problem navadno obravnavamo kot ravninsko napetostno stanje ali kot osno simetrični problem. V obeh primerih uporabimo končne elemente za diskretizacijo tako plošče, kot pilotov. Upoštevamo nelinearno obnašanje tal in plošče. Upoštevamo lahko časovno odvisnost posedkov in porazdelitev sil po pilotih, ki so odvisne od konsolidacije. V tej metodi je možno upoštevati le pravokotne obtežbe, ni pa možno dobiti torzijskih momentov v plošči.

4.4.2.4 Trodimenzionalna metoda končnih elementov

To je metoda s katero analiziramo realen problem. Vendar pa moramo še vedno določiti parametre. Prvi, ki je opravil takšno analizo je bil Ottaviani. Zhuang in Lee uporabita linearno trodimenzionalno analizo za določitev posedkov in porazdelitve obtežbe znotraj temeljenja.

Ta in Small razvijeta metodo, ki obravnava ploščo iz končnih elementov tankih ploskev. Tla pa sestavljajo končni sloji. Metoda je omejena na elastično območje, omogoča pa uporabo slojevitih tal.

Najnatančnejšo analizo pa izvede Wang. To je nelinearna analiza. Za togo ploščo analiza pokaže, da enostavnejša elastična metoda z interakcijskimi faktorji da zadovoljive rezultate za posedke in porazdelitev obtežbe. Trodimenzionalna analiza pride v poštev pri stranskem odzivu pilotov, kljub temu, da je obtežba vertikalna. S to metodo porabimo več časa za pripravo vhodnih podatkov.

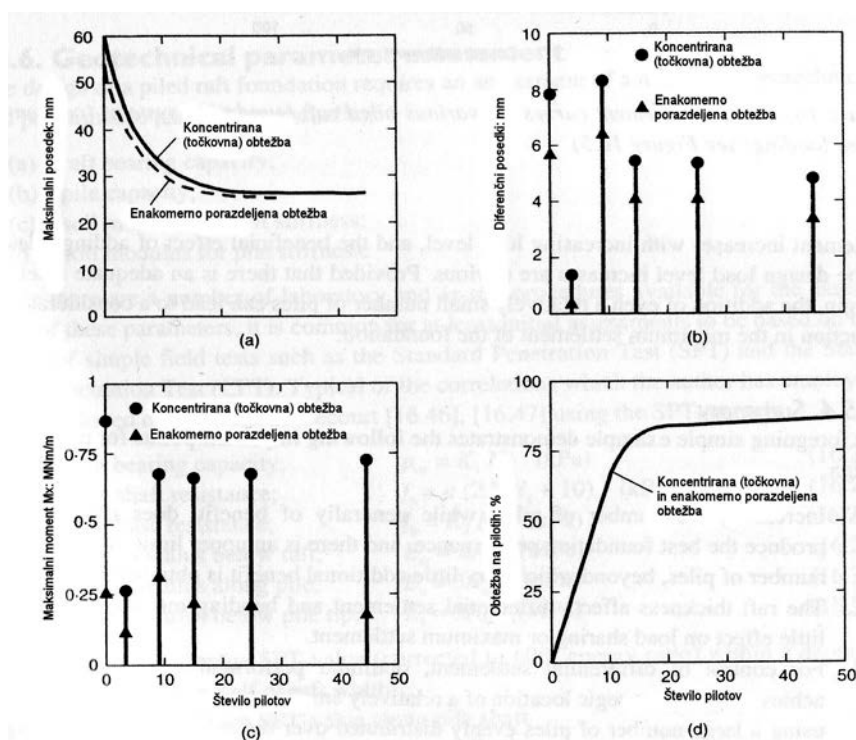
4.5 Karakteristično obnašanje temeljenja

Obnašanje temeljenja je odvisno od sledečih faktorjev:

- a) Števila pilotov
- b) Narave obtežbe (točkovne ali porazdeljene)
- c) Debeline plošče
- d) Velikosti obtežbe

4.5.1 Vpliv števila pilotov in tipa obtežbe

1. Maksimalni posedki se zmanjšujejo z večanjem števila pilotov, vendar po nekem številu postanejo konstantni.
2. Za majhno število pilotov so posedki pri koncentrirani obtežbi večji, vendar z večanjem števila pilotov postanejo vse bolj enaki.
3. Diferenčni posedki se ne spreminjajo tako kot bi pričakovali od manjšanja števila pilotov. Pomembnejša je pravilna razporeditev pilotov.
4. Maksimalni upogibni momenti v plošči so večji pri koncentrirani obtežbi. Najmanjši moment se pojavi, ko ploščo podpirajo trije piloti.
5. Delež obtežbe, ki jo nosijo piloti, se povečuje s povečanjem števila pilotov, vendar se pri določenem številu pilotov ne povečuje več.



Slika 21: Vpliv števila pilotov na obnašanje temeljenja na hipotetičnem primeru (skupna obtežba 12 MN): (a) maksimalni posedk; (b) diferenčni posedk; (c) maksimalni upogibni momenti; (d) proporcija obtežbe, ki jo nosijo poloti

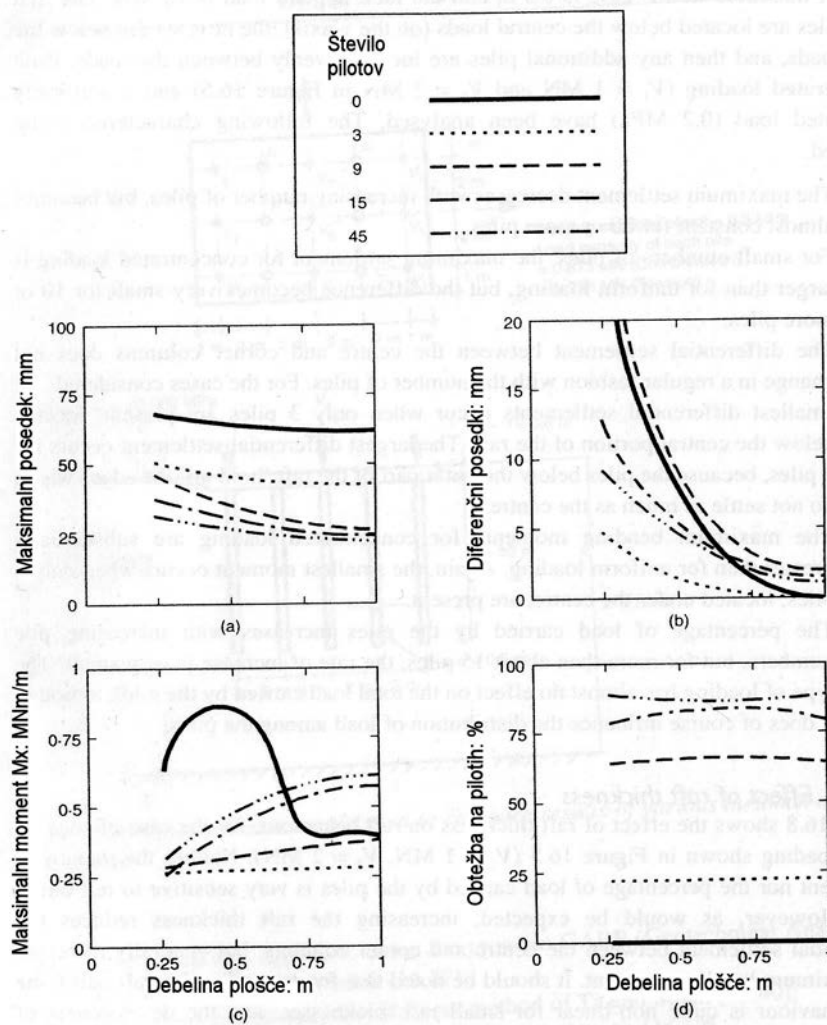
(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 444)

4.5.2 Vpliv debeline plošče

Debelina plošče ne vpliva na delež obtežbe, ki jo prenesejo piloti, ne na maksimalne posedke. Povečanje debeline zmanjša diferenčne posedke, ter poveča maksimalne upogibne momente.

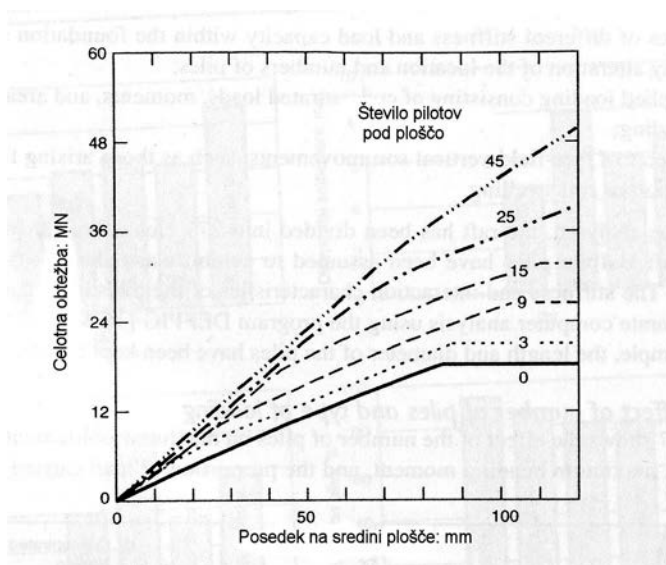
4.5.3 Vpliv velikosti obtežbe

S povečanjem obtežbe se posedk povečajo.



Slika 22: Vpliv debeline plošče na obnašanje temeljenja na hipotetičnem primeru (skupna obtežba znaša 12 MN): (a) maksimalni posedk; (b) diferenčni posedk; (c) maksimalni upogibni moment; (d) delež obtežbe, ki jo nosijo piloti

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 446)



Slika 23: Krivulje obtežba-posedek za različne sisteme plošč podprtih s piloti (koncentrirana obtežba)

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 447)

4.5.4 Priporočila za ekonomično projektiranje

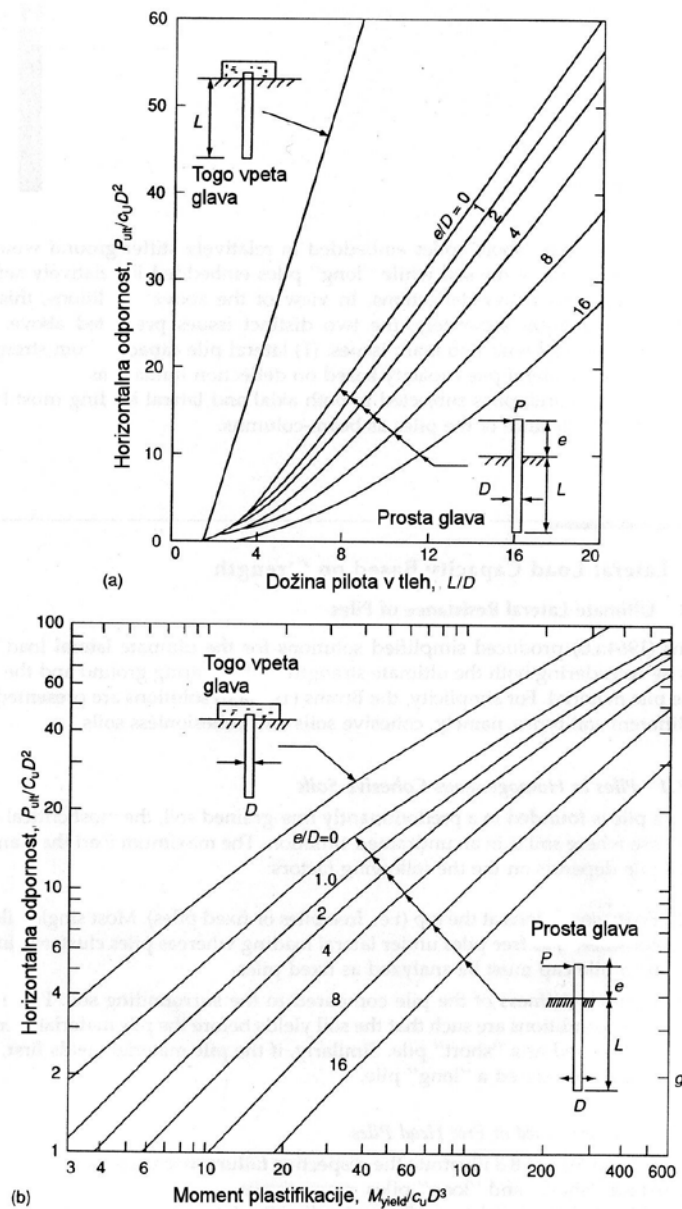
Horikoshi in Randolph podata sledeče smernice za optimalno projektiranje:

- Piloti naj bodo porazdeljeni na centralnih 16-25% plošče.
- Osna togost skupine pilotov naj bo približno enaka osni togosti same plošče.
- Nosilnost pilotov naj bo 40-70% projektne obtežbe.

5 TEORIJA

5.1 Bočna nosilnost pilotov po Bromsu

5.1.1 Piloti v homogenih koherentnih tleh



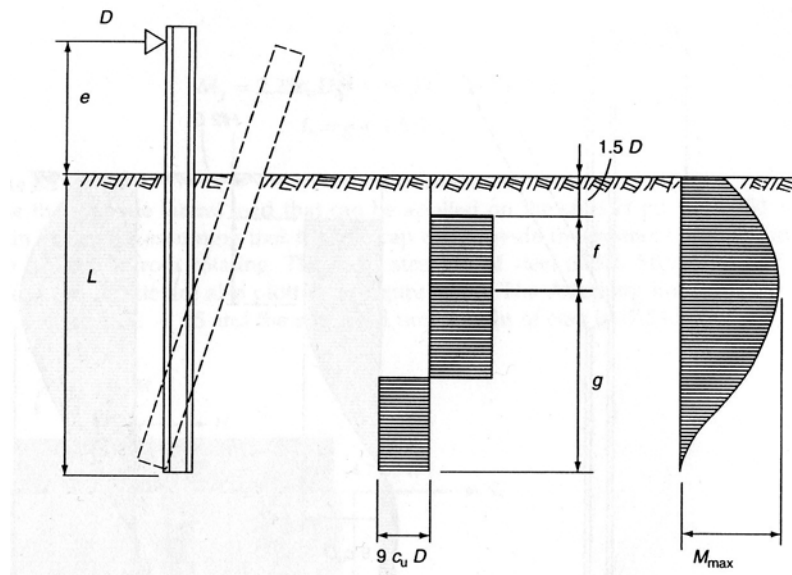
Grafikon 1: Mejna bočna odpornost pilotov v koherentnih tleh: (a) kratki piloti; (b) dolgi piloti

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 331)

Kritična situacija nastopi, ko je zemljina v nedreniranem stanju. Maksimalna sila, ki jo lahko prenesejo piloti, je odvisna od sledečih faktorjev:

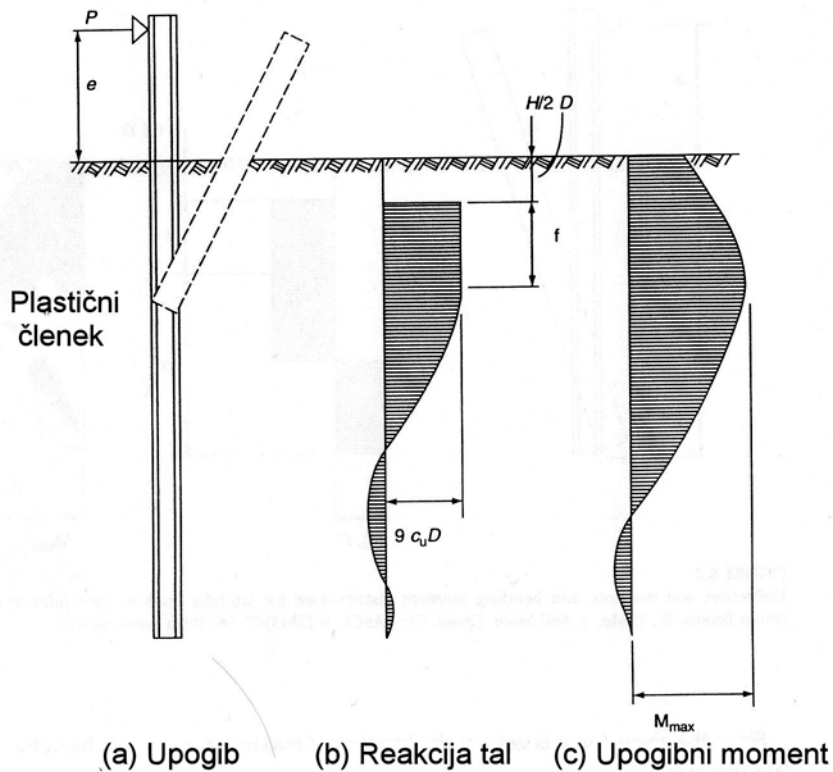
1. Vpetosti na vrhu pilota (prosto ali vpeto).
2. Relativne togosti pilotov v primerjavi s sosednjo zemljino. Če se zemljina ukloni pred pilotom, pravimo, da je pilot kratek. Če pa se najprej ukloni material pilota, je pilot dolg.

5.1.1.1 Piloti brez vpete glave



Slika 24: Odklon, reakcija tal in upogibni moment za bočno obremenjene kratke pilote v koherentnih tleh

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 329)



Slika 25: Porušni mehanizem bočno obremenjenega dolgega pilota v koherentnih tleh (Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 330)

Porušni mehanizmi pilotov so prikazani sliki 24 in sliki 25. Bočno nosilnost pa določimo iz sledečih enačb.

$$f = \frac{P_u}{9c_u D} \quad (58)$$

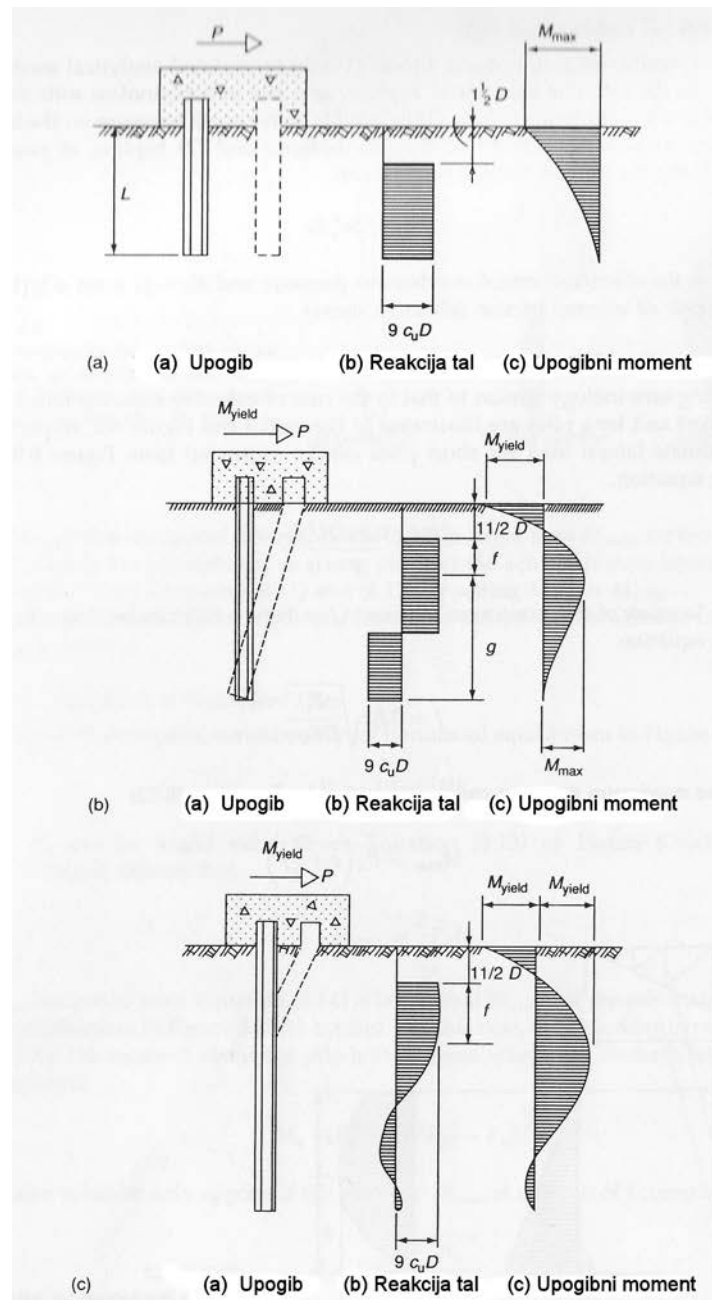
$$M_{max} = 2,25Dg^2c_u \quad (59)$$

$$M_{max} = P_u(e + 1,5D + 0,5f) \quad (60)$$

$$L = g + 1,5D + f \quad (61)$$

Nosilnost P_u pa lahko tudi odčitam iz grafikona 1.

5.1.1.2 Togo vpeta glava pilota



Slika 26: Porušni mehanizem bočno obremenjenega vpetega pilota v koherentnih tleh: (a) kratek pilot; (b) srednje dolg pilot; (c) dolg pilot

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 332)

Pri vpetih pilotih imamo tri možne porušne mehanizme. Oprelimo jih s pojmi kratkih, dolgih in srednje dolgih pilotov. Prikazani so na sliki 26. Predpostavka, ki nas pripelje do analitične rešitve, pravi, da na vrhu ni zasuka.

Mejno nosilnost P_u in M_{\max} za kratke pilote neposredno odčitamo iz grafikona 1 ali jih izračunamo.

$$P_u = 9c_u D(L - 1,5D) \quad (62)$$

$$M_{\max} = P_u(0,5L + 0,75D) \quad (63)$$

Za dolge pilote pa P_u očitamo iz grafikona 1, nato pa iz enačbe (66) določimo vrednost f . Ta nam določa globino na kateri se pilot plastificira.

$$M_y = W_b \cdot \alpha f_{yc} \quad (64)$$

$$\frac{M_y}{c_u D^3} \Rightarrow \frac{P_u}{c_u D^2} = \text{odč.} \Rightarrow P_u \quad (65)$$

$$P_u = \frac{2M_y}{1,5D + 0,5f} \Rightarrow f = \frac{2M_y - 1,5P_u D}{0,5P_u} \quad (66)$$

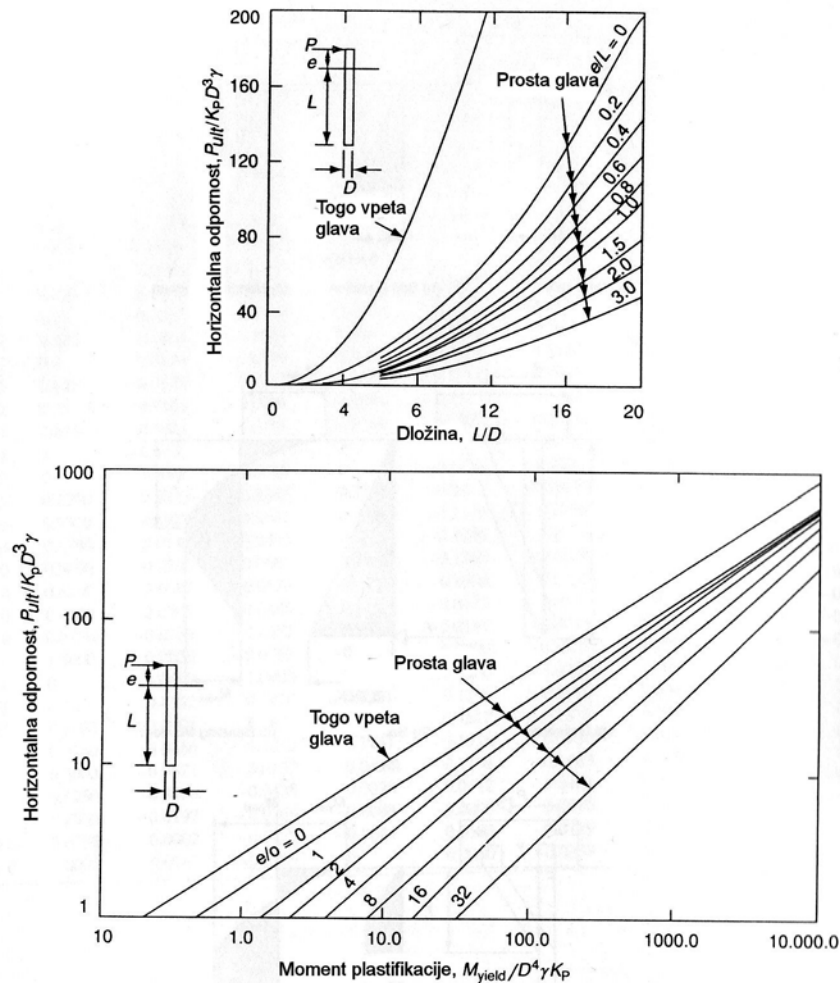
Za srednje dolge pilote pa lahko uporabimo sledeče enačbe:

$$f = \frac{P_u}{9c_u D} \quad (67)$$

$$M_y = 2,25c_u Dg^2 - 9c_u Df(1,5D + 0,5f) \quad (68)$$

$$L = g + 1,5D + f \quad (69)$$

5.1.2 Piloti v nekoherentnih tleh



Grafikon 2: Mejna bočna odpornost pilotov v nekoherentnih tleh: (a) kratki piloti; (b) dolgi piloti

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 337)

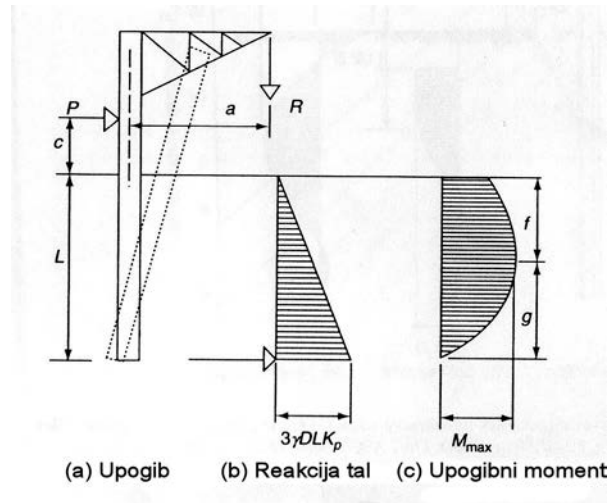
Pomembnejše predpostavke, ki jih vključi Broms v svojo metodo:

1. Zanemarljivi aktivni zemeljski pritiski na zadnji strani pilota.
2. Trojna vrednost pasivnih pritiskov ob vrhu sprednjega dela pilota.

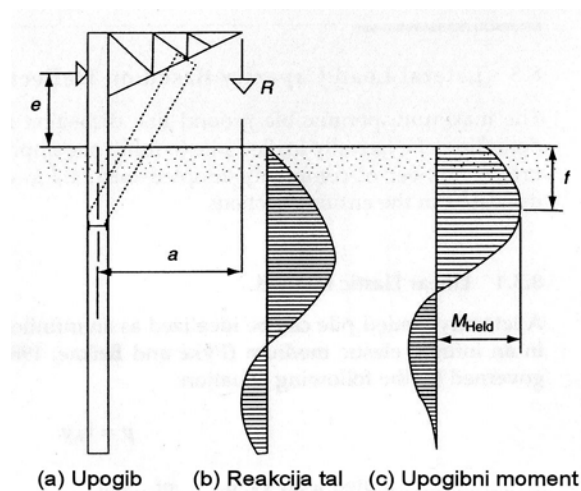
$$p_p = 3\sigma'_v K_p \quad (70)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \quad (71)$$

5.1.2.1 Piloti brez vpete glave



Slika 27: Porušni mehanizem bočno obremenjenega kratkega pilota v nekoherentnih tleh
(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 335)



Slika 28: Porušni mehanizem bočno obremenjenega dolgega pilota v nekoherentnih tleh
(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 336)

Porušni mehanizmi so prikazani na sliki 27 in sliki 28.

Bočno nosilnost kratkih pilotov lahko ocenimo iz naslednje enačbe:

$$P_u = \frac{0,5\gamma DL^3 K_p}{e + L} \quad (72)$$

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{P_u}{DK_p \gamma}} \quad (73)$$

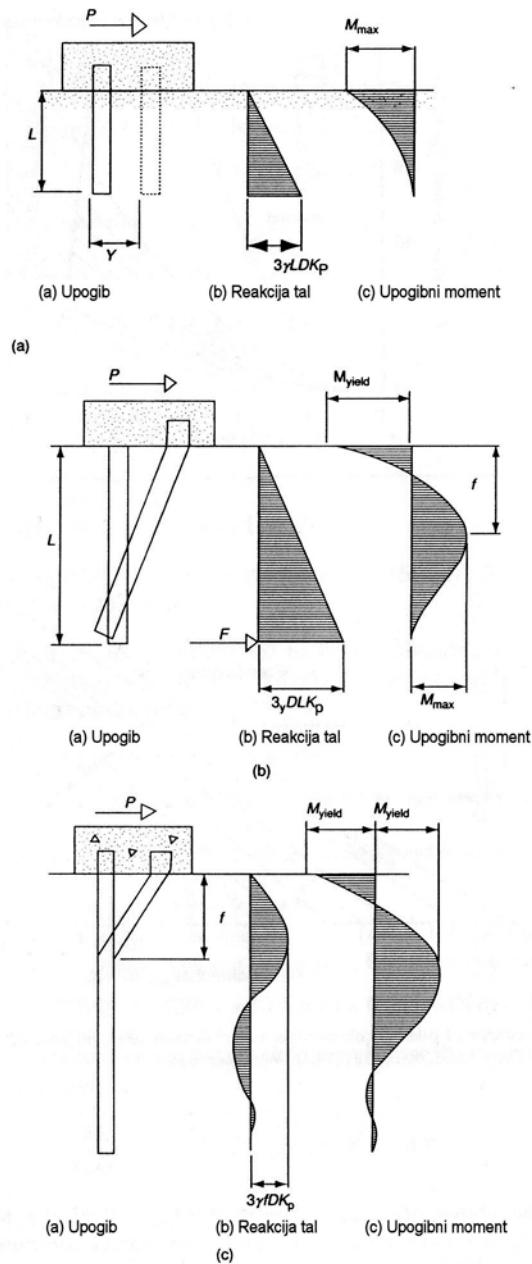
$$M_{\max} = P_u \left(e + \frac{2}{3} f \right) \quad (74)$$

Za dolge pilote pa veljajo sledeče enačbe (nosilnost lahko določimo tudi iz grafikona 2):

$$M_y = P_u \left(e + \frac{2}{3} f \right) \quad (75)$$

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{P_u}{DK_p \gamma}} \quad (76)$$

5.1.2.2 Togo vpeta glava pilota



Slika 29: Porušni mehanizem vpetega pilota v nekoherentnih tleh: (a) kratki piloti; (b) srednje dolgi piloti; (c) dolgi piloti

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 338)

Za kratke pilote lahko nosilnost odčitamo iz grafikona 2 ali jo določimo analitično po enačbah:

$$P_u = 1,5\gamma L^2 DK_p \quad (72)$$

$$M_{\max} = \frac{2}{3} P_u L \quad (73)$$

Za srednje dolge pilote veljajo naslednje zveze:

$$M_y = 0,5\gamma DL^3 K_p - P_u L \quad (74)$$

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{P_u}{DK_p \gamma}} \quad (75)$$

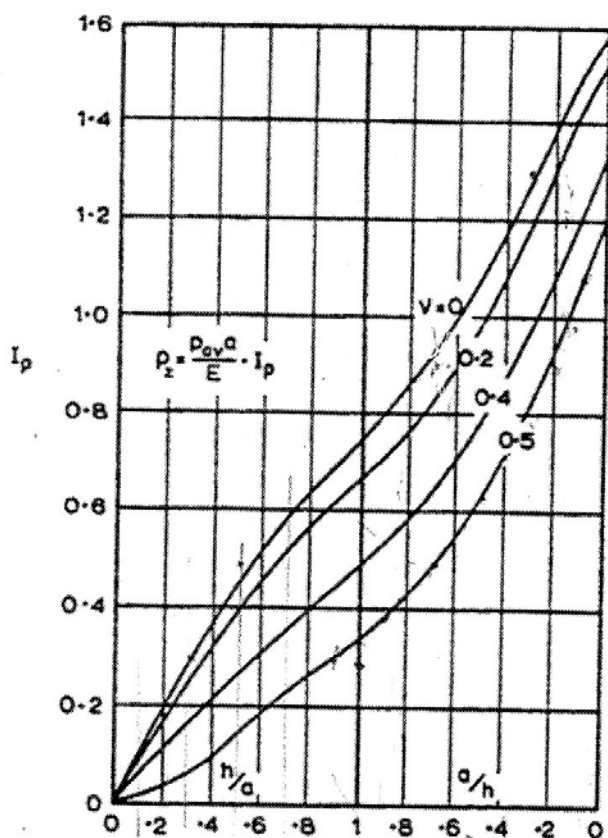
Ob pojavu porušnega mehanizma za dolge pilote veljajo naslednje zveze:

$$P_u \left(e + \frac{2}{3} f \right) = 2M_y \quad (76)$$

$$f = 0,82 \sqrt{\frac{P_u}{DK_p \gamma}} \quad (77)$$

5.2 Ocena povprečne osne togosti plošče

Povprečna osna togost plošče je ocenjena iz elastičnih rešitev, ki jih podata Poulos in Davis, za togo okroglo ploščo na sloju končne debeline. Uporabimo lahko enako ploščino kroga kot imamo ploščino pravokotne plošče. Vrednosti za togost plošče dobimo na sledeči način:



Grafikon 3: Vplivni faktorji za vertikalne premike okrogle plošče

(Poulos, H. G. in Davis, E. H. 1980. Pile foundation analysis and design: str. 179)

$$p_{av} = \frac{P}{\pi r^2} \quad (78)$$

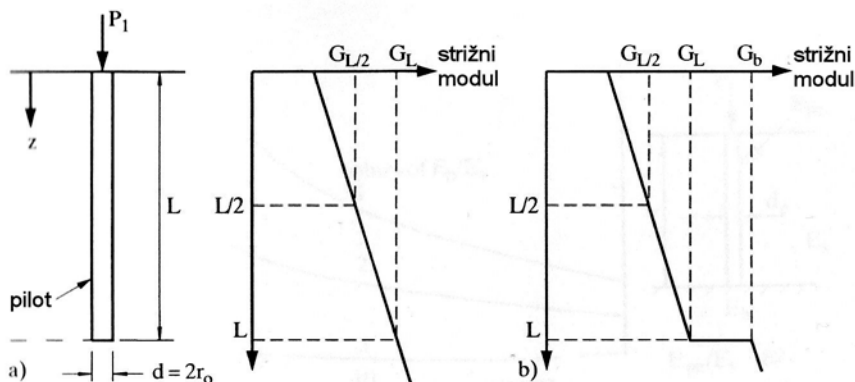
$$\rho_z = \frac{p_{av} r}{E} I_p \quad (79)$$

$$K_r = \frac{P}{\rho_z} \quad (80)$$

5.3 Togost skupine pilotov

Rešitve za določitev togosti posameznega pilota podata Randolph in Wroth (Randolph, M. F., Wroth, C. P. 1978. Analysis of deformation of vertically loaded piles. J. Geotech. Engineering Div., ASCE, 104,12:1465 – 1488). Skupinski faktor se upošteva v obliki $\sqrt{n_p}$ (n_p je število pilotov).

Togost pilotov izračunamo na sledeči način:



Slika 30: Posamezen osno obremenjen pilot: (a) trenjski pilot; (b) pilot, ki nosi pod konico (Smoltczyk, Ulrich 2003. Geotechnical Engineering Handbook Volume 1: Fundamentals: str. 306)

PILOTI:

r_0 ... radij plašča pilota

r_b ... radij konice pilota

l ... dolžina pilota

E_p ... Youngov modul pilota

$$E_p = (E \cdot A)_p / (\pi \cdot r_0^2) \dots \text{Youngov modul za okrogel pilot} \quad (81)$$

n_p ... število pilotov

LASTNOSTI TAL:

$E_{s(l/2)}$... Youngov modul tal na globini $l/2$

$E_{s(l)}$... Youngov modul tal na globini l

$E_{s(b)}$... Youngov modul ob konici

$\nu_{(l/2)}$... Poissonov količnik tal na globini $l/2$

$\nu_{(l)}$... Poissonov količnik tal na globini l

ν_b ... Poissonov količnik tal pod konico

$$G_{s(l/2)} = \frac{E_{s(l/2)}}{2(1 + \nu_{(l/2)})} \dots \text{strižni modul tal na globini } l/2 \quad (82)$$

$$G_{s(l)} = \frac{E_{s(l)}}{2(1 + \nu_{(l)})} \dots \text{strižni modul tal na globini } l \quad (83)$$

$$G_{s(b)} = \frac{E_{s(b)}}{2(1 + \nu_b)} \dots \text{strižni modul tal pod konico} \quad (84)$$

IZRAČUN PARAMETROV:

$$\eta_r = \frac{r_b}{r_0} \quad (85)$$

$$\xi = G_{s(l)} / G_{s(b)} \quad (86)$$

$$\rho = G_{s(l/2)} / G_{s(l)} \dots \text{vpliv spodnjega sloja na togost} \quad (87)$$

$$r_m = 0,25 \cdot l + (2,5 \cdot l \cdot \rho \cdot (1 - \nu) - 0,25 \cdot l) \cdot \xi \dots \text{oddaljenost od pilota pri kateri so strižne napetosti zanemarljive} \quad (88)$$

$$\zeta = \ln(r_m / r_0) \quad (89)$$

$$\lambda = E_p / G_{s(l)} \quad (90)$$

$$\mu l = \sqrt{2 / (\zeta \cdot \lambda)} \cdot (l / r_0) \quad (91)$$

TOGOST POSAMEZNEGA PILOTA:

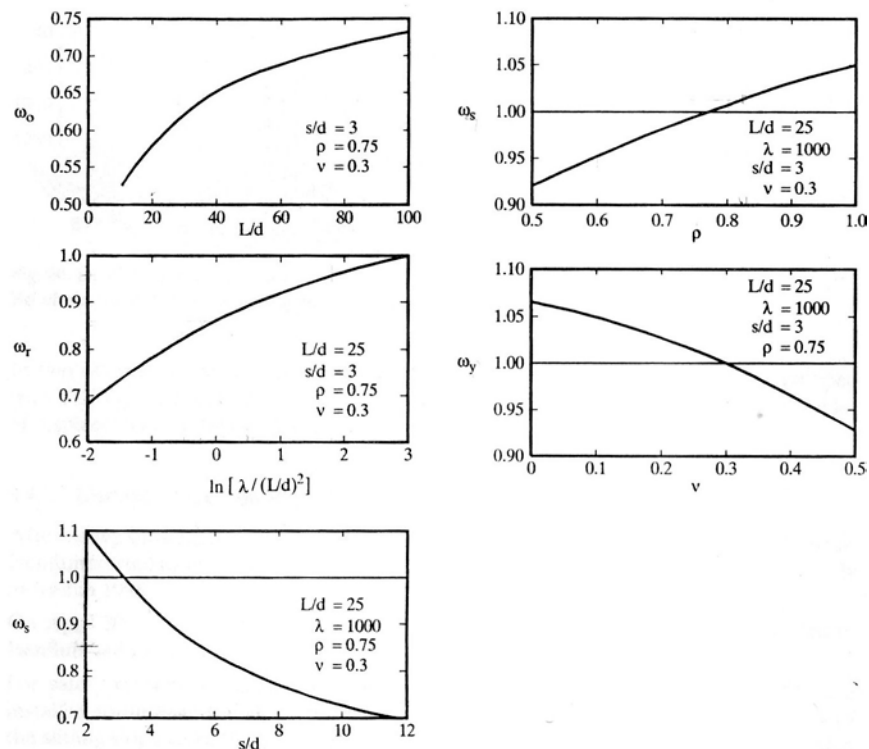
$$k = G_{s(l)} \cdot r_0 \cdot \frac{\left[\frac{4 \cdot \eta_r}{\xi \cdot (1-\nu)} + \frac{2 \cdot \pi}{\zeta} \cdot \rho \cdot \frac{l}{r_0} \cdot \frac{\tanh(\mu l)}{\mu l} \right]}{\left[1 + \frac{4 \cdot \eta_r}{\xi \cdot (1-\nu)} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{l}{r_0} \cdot \frac{\tanh(\mu l)}{\mu l} \right]} \quad (92)$$

TOGOT SKUPINE PILOTOV:

$$\omega = \omega_0 \cdot \omega_r \cdot \omega_s \cdot \omega_\rho \cdot \omega_\nu \quad (93)$$

$$k_p = n_p^\omega \cdot k \quad (94)$$

Vrednosti ω_0 , ω_r , ω_s , ω_ρ , ω_ν odčitamo iz grafikona 4. Znano je, da vrednost ω za trenjske pilote v glini znaša 0,5 za trenjske pilote v pesku pa 0,33.



Grafikon 4: Faktorji ω iz enačbe (93)

(Smolczyk, Ulrich 2003. Geotechnical Engineering Handbook Volume 1: Fundamentals: str. 310)

5.4 Ocena diferenčnih posedkov

Diferenčni posedki skupine pilotov so odvisni od števila pilotov (n), faktorja razmika (s/d) in faktorja vitkosti (L/d). Randolph in Clancy sta pokazala, da lahko normiran diferenčni posedek določimo kot funkcijo količine R .

Grafikon 5 in grafikon 6 prikazujeta diferenčne posedke normirane s povprečnim posedkom. V grafikonu 5 lahko odčitamo normirane diferenčne posedke za ploščo, medtem ko v grafikonu 6 za ploščo, podprto s piloti.

Diferenčne posedke (Δw) določimo tako, da iz diagrama odčitam normiran diferenčni posedek in ga množim s povprečnim posedkom (w_{avg}).

Diferenčne posedke pa lahko izračunamo iz sledečih enačb:

$$\frac{\Delta w}{w_{avg}} \approx f \frac{R}{4} \quad \text{za } R \leq 4$$

$$\frac{\Delta w}{w_{avg}} \approx f \quad \text{za } R > 4$$
(95)

kjer je $f=0,3$ za diferenčni posedek od sredine proti stranskemu robu in $f=0,5$ za diferenčni posedek od sredine proti vogalu plošče.

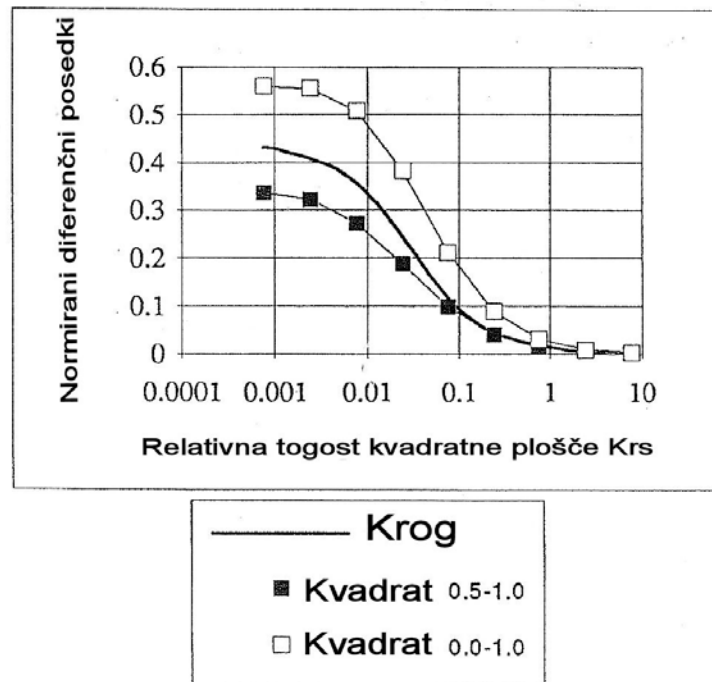
$$R = \sqrt{\frac{n \cdot s}{L}}$$
(96)

n ...število pilotov

s ...razmak med piloti

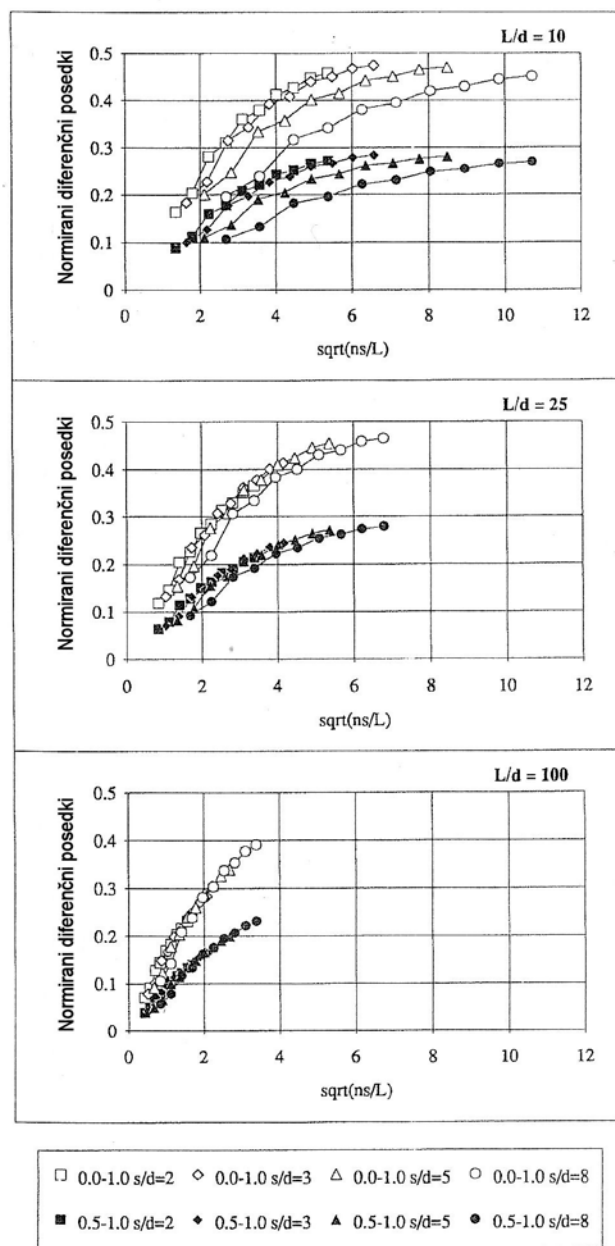
d ...premer pilota

L ...dolžina pilota



Grafikon 5: Normirani diferenčni posedki v odvisnosti od relativne togosti plošče.

(Randolph, M. F. 1994. Design methods for pile groups and piled rafts. Int. Conf. Soil. Mech. Foundn Engeng. New Delhi, 5: 61 – 82.)



Grafikon 6: Normirani diferenčni posedki za skupine pilotov, kot funkcija vrednosti R .
(Randolph, M. F. 1994. Design methods for pile groups and piled rafts. Int. Conf. Soil. Mech. Foundn Engng. New Delhi, 5: 61 – 82.)

5.5 Nosilnost pilota

5.5.1 Nosilnost v koherentnih tleh

5.5.1.1 Nosilnost pod konico

5.5.1.1.1 Nedrenirano stanje

$$q_b = c_u N_c \quad (97)$$

$$\frac{D}{B} \geq 3 \Rightarrow N_c = 9 \quad (98)$$

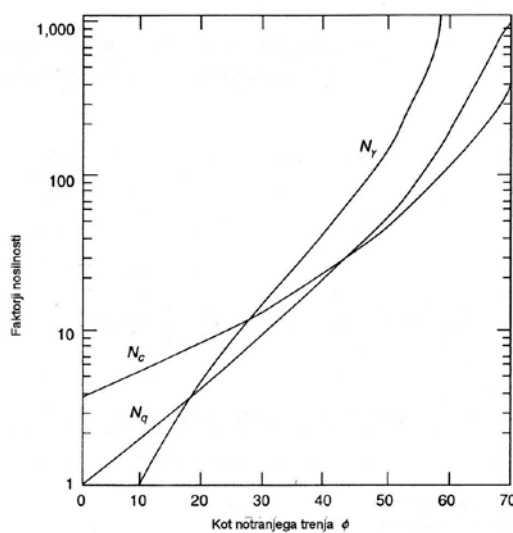
$$\frac{D}{B} = 0 \Rightarrow N_c = 6 \quad (99)$$

D...dolžina pilota, ki sega v nosilni sloj tal

B...premer pilota

5.5.1.1.2 Drenirano stanje

5.5.1.1.2.1 Kulhawy in Goodman (metoda velja za pilote zabite v kamnino)



Grafikon 7: Faktorji nosilnosti za temeljenje na skali

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 278)

$$Q_b = A_p \left[c \cdot N_c \cdot F_c + \bar{q} \cdot N_q + \frac{1}{2} \cdot \gamma' \cdot B \cdot N_\gamma \cdot F_\gamma \right] \quad (100)$$

c ...kohezija

N_c, N_q, N_γ ...odčitamo iz diagrama

$$\bar{q} = \gamma' \cdot D \quad (101)$$

$F_c=1,25$...za kvadraten pilot

$F_c=1,20$...za okrogel pilot

$F_\gamma=0,8$...za kvadraten pilot

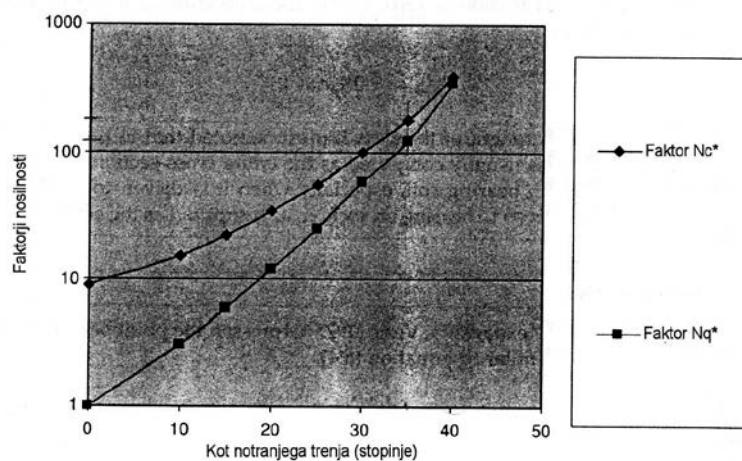
$F_\gamma=0,7$...za okrogel pilot

D ...globina

γ' ...efektivna prostorninska teža zemljine

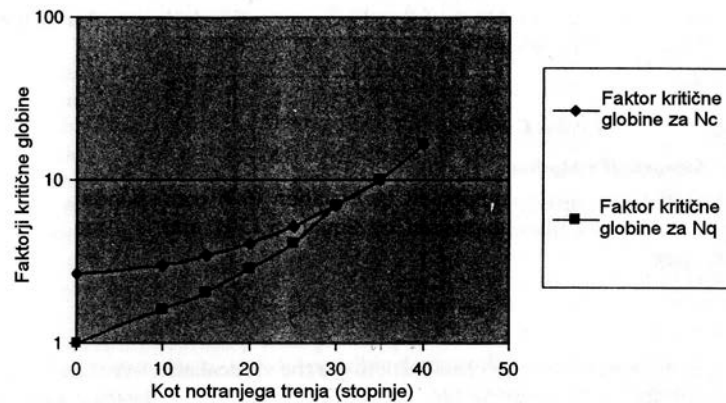
B ...najmanjša prečna dolžina prereza pilota

5.5.1.1.2.2 Meyerhof



Grafikon 8: Faktorji nosilnosti za globoko temeljenje

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 241)



Grafikon 9: Sprememba faktorja kritične globine s kotom notranjega trenja
(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 242)

$$Q_b = A_p [c \cdot N_c^* + \bar{q} \cdot (N_q^* - 1)] \quad (102)$$

c ...kohezija

N_c^* , N_q^* ...odčitamo iz diagrama

$$\bar{q} = \gamma' \cdot D \quad (103)$$

$$\left(\frac{L_b}{B} \right)_{cr} \dots \text{faktor kritične globine} \quad (104)$$

D ...globina

L_b ...globina konice v spodnjem sloju

γ' ...efektivna prostorninska teža zemljine

B ...najmanjša prečna dolžina prereza pilota

Maksimalne vrednosti N_c^* in N_q^* so običajno mobilizirane pri $0,5(L_b/B)_{cr}$.

Če je faktor globine manjši od $0,5(L_b/B)_{cr}$, moramo N_c^* in N_q^* interpolirati.

Primer:

$$Za \varphi = 38^\circ \text{ je } \left(\frac{L_b}{B} \right)_{cr} = 15 \quad (105)$$

$$\frac{L_b}{B} = 1/0,2 = 5 \quad (106)$$

$$5 < 7,5 \Rightarrow N_q^* = 300 \quad (107)$$

$$N_q = \left[\frac{L_b / B}{0,5(L_b / B)_{cr}} \right] \cdot N_q^* = \frac{5}{7,5} \cdot 300 = 208 \quad (108)$$

Maksimalna nosilnost pod konico pa znaša:

$$Q_b = 50 \cdot A_p \cdot N_q^* \cdot \tan \varphi \quad (109)$$

5.5.1.1.2.3 Vesič

$$Q_b = A_p [c \cdot N_c^* + \eta \cdot \bar{q} \cdot N_q^*] \quad (110)$$

$$\eta = \frac{1 + 2 \cdot K_0}{3} \quad (111)$$

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (112)$$

$$I_r = \frac{G_s}{c + q \cdot \tan \varphi} \quad (113)$$

G_s ...strižni modul zemljine

$$I_{rr} = \frac{I_r}{1 + I_r \varepsilon_v} \quad (114)$$

$\varepsilon_v = 0$ za peske in nedrenirane gline

Sedaj faktorje N_c^* in N_q^* odčitamo iz tabel!

Preglednica 14: Faktorji N_c^* za Vesičevo metodo izračuna nosilnosti

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 243)

Faktor N_c^* za Vesičevo metodo računa nosilnosti					
Φ (°)	I_{rr}				
	10	50	100	200	500
0	6.97	9.12	10.04	10.97	12.19
5	8.99	12.82	14.69	16.69	19.59
10	11.55	17.99	21.46	25.43	31.59
20	18.83	34.53	44.44	56.97	78.78
30	30.03	63.21	86.64	118.53	178.98
35	37.65	84.00	118.22	166.15	260.15
40	47.04	110.48	159.13	228.97	370.04
45	53.66	144.11	211.79	311.04	516.60

Preglednica 15: Faktorji N_q^* za Vesičevo metodo izračuna nosilnosti

(Manjriker, Gunaratne. 2006. The Foundation Engineering Handbook: str. 243)

Faktor N_q^* za Vesičevo metodo računa nosilnosti					
Φ (°)	I_{rr}				
	10	50	100	200	500
0	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5	1.79	2.12	2.28	2.46	2.71
10	3.04	4.17	4.78	5.48	6.57
20	7.85	13.57	17.17	21.73	29.67
30	18.34	37.50	51.02	69.43	104.33
35	27.36	59.82	83.78	117.34	183.16
40	40.47	93.70	134.53	193.13	311.50
45	59.66	145.11	212.79	312.04	517.60

5.5.1.2 Nosilnost po plašču

5.5.1.2.1 Nedrenirano stanje

$$q_s = \alpha \cdot c_u \quad (115)$$

$$\alpha \in [0,3;1,0] \quad (116)$$

$$\frac{c_u}{\sigma_v'} \leq 1 \Rightarrow \alpha = \left(\frac{c_u}{\sigma_v'} \right)_{n_c}^{0,5} \cdot \left(\frac{c_u}{\sigma_v'} \right)^{-0,5} \quad (117)$$

$$\frac{c_u}{\sigma_v'} > 1 \Rightarrow \alpha = \left(\frac{c_u}{\sigma_v'} \right)_{n_c}^{0,5} \cdot \left(\frac{c_u}{\sigma_v'} \right)^{-0,25} \quad (118)$$

$$\left(\frac{c_u}{\sigma_v'} \right)_{n_c} = \frac{\varphi'}{100} \quad (119)$$

5.5.1.2.2 Drenirano stanje

$$q_s = K \cdot \overline{\sigma_v'} \cdot \tan \delta \quad (120)$$

VTISNJENI (ZABITI) PILOTI

$$K = 1,5 \cdot k_0 \dots \text{trdnejše zemljine} \quad (121)$$

$$K = 1,0 \cdot k_0 \dots \text{mehke zemljine} \quad (122)$$

$$\delta = \frac{3}{4} \varphi \dots \text{za lesene in betonske pilote} \quad (123)$$

$$\delta = 20^\circ \dots \text{za jeklene pilote} \quad (124)$$

UVRTANI PILOTI

$$K = 1,0 \cdot k_0 \dots \text{normalno konsolidirane zemljine} \quad (125)$$

$$K = 0,8 \cdot k_0 \dots \text{prekonsolidirane zemljine} \quad (126)$$

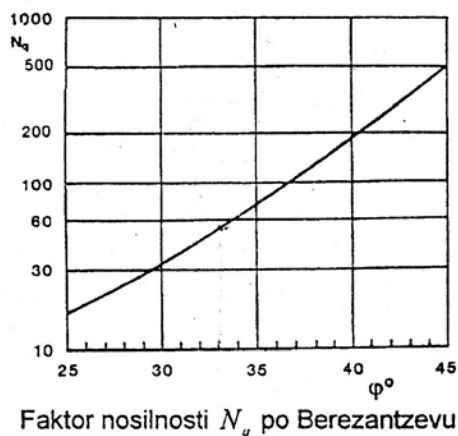
$$\delta = \frac{3}{4} \varphi \dots \text{za lesene in betonske pilote} \quad (127)$$

$$\delta = 20^\circ \dots \text{za jeklene pilote} \quad (128)$$

5.5.2 Nosilnost v nekoherentnih tleh

5.5.2.1 Nosilnost pod konico

5.5.2.1.1 Berezantzev



Grafikon 10: Faktor nosilnosti N_q po Berezantzevu
(Logar, Janko. Skripta: Globoko temeljenje: str. 13)

$$q_b = q \cdot N_q \quad (129)$$

$$N_q \Rightarrow \text{diagram} \quad (130)$$

$$p' = q \cdot \sqrt{N_q} \quad (131)$$

$$I_R = D_r \cdot \left(5,4 - \ln \frac{p'}{p_a} \right) \quad (132)$$

$$p_a = 100 \text{ kPa} \quad (133)$$

$$\varphi' = \varphi'_{cv} + 3I_R \rightarrow N_q \quad (134)$$

$$\max q_b < 11 - 15 \text{ MPa} \quad (135)$$

5.5.2.2 Nosilnost po plašču

$$q_s = K \cdot \overline{\sigma'_v} \cdot \tan \delta \quad (136)$$

VTISNJENI (ZABITI) PILOTI

$$K \approx \frac{N_q}{50} \quad (137)$$

$$\delta = \varphi'_{cv} \quad (138)$$

φ'_{cv} ...strižni kot pri konstantnem volumnu

UVRTANI PILOTI

K je odvisen od metode vgradnje kola:

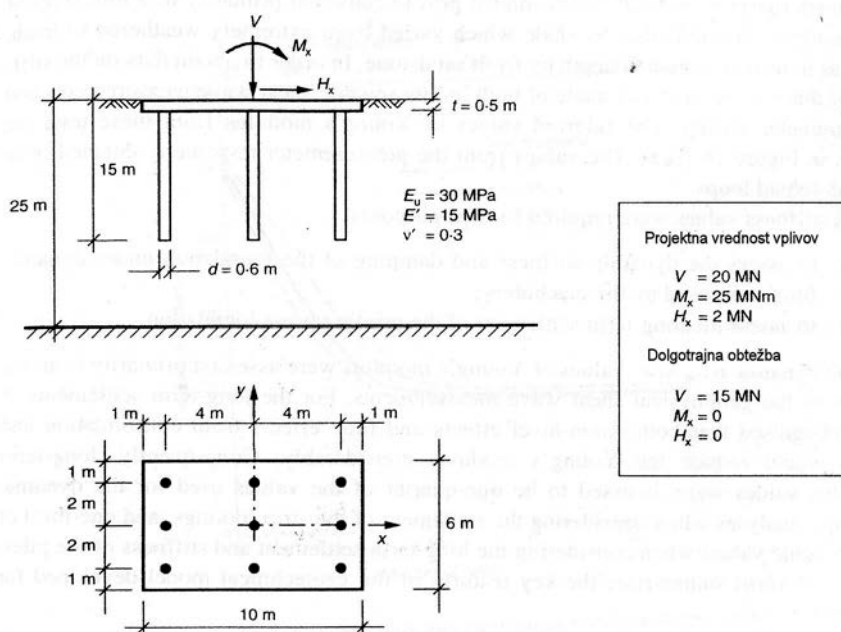
$$K = 0,7 \quad \dots \text{običajne metode vgradnje} \quad (139)$$

$$K = 0,9 \quad \dots \text{za spiralni izkop v peskih in gramozih} \quad (140)$$

$$K = 0,6 \quad \dots \text{za spiralni izkop v meljih in meljastih peskih} \quad (141)$$

$$\delta = \varphi' \quad (142)$$

6 PRIMER ANALITIČNEGA RAČUNA



Slika 31: Primer temeljenja

(Hemsley, J. A. 2000. Design applications of raft foundations: str. 459)

V tem računskem primeru smo uporabili kriterij globalne varnosti.

V obravnavanem primeru moramo zadostiti naslednjim kriterijem:

- Minimalni faktor globalne varnosti znaša 2,5
- Maksimalni povprečni dolgoročni posedki naj ne presegajo 50 mm, maksimalni diferencialni posedki pa znašajo 10 mm.

Računali smo za dva primera:

1. Klasičen račun, pri katerem vso obtežbo prevzamejo piloti.
2. Temeljenje na plošči, podprti s piloti, kjer upoštevamo skupen vpliv, kot smo opisali v predhodnih poglavjih.

6.1 Klasičen pristop k projektiranju

Klasičen projektni pristop, kjer celotno obtežbo prevzamejo piloti ni tako ekonomičen, kot če uporabimo naprednejši pristop, kjer k vertikalni odpornosti prispeva tudi plošča. Pri

klasičnem pristopu potrebujemo trikrat več pilotov za zagotovitev kriterija globalne varnosti, v primerjavi s pristopom, ko k nosilnosti prispeva tudi plošča. Zaradi tega dejstva, imamo pri klasičnem pristopu velike rezerve v varnosti, ki jo prispeva plošča.

6.1.1 Ocena vertikalne nosilnosti

Povprečna vrednost mejnega trenja po plašču znaša 60 kPa v tlaku in 42 kPa v nategu. Nosilnost pod konico pa znaša 900 kPa. Iz tega izračunamo mejno osno nosilnost, ki v tlaku znaša 1,95 MN in v nategu 1,20 MN.

Pri klasičnem pristopu, kjer celotno obtežbo prevzamejo piloti, bi potrebovali $20/1,95 \cdot 2,5 = 26$ pilotov samo za zadostitev kriteriju minimalne globalne varnosti 2,5. Vendar zaradi razporeditve pilotov v rastru 6 x 5 pilotov uporabimo 30 pilotov. Enačba (143) pokaže kolikšen je faktor globalne varnosti za vertikalno obtežbo pri klasičnem pristopu s 30 piloti.

$$\frac{n_p \cdot V_{u1}}{V} = \frac{30 \cdot 1,95}{20} = 2,925 \quad (143)$$

6.1.2 Momentna nosilnost

Momentna nosilnost skupine pilotov:

$$M_{up} = \sum_{i=1}^{30} P_{ui} |x_i| = 1,20 \cdot 2 \cdot (3,75 \cdot 5 + 2,25 \cdot 5 + 0,75 \cdot 5) = 81 \text{ MNm} \quad (144)$$

Globalna varnost znaša:

$$M_{up} / M_x = 81 / 25 = 3,24 \quad (145)$$

6.1.3 Mejna bočna nosilnost

Mejna bočna nosilnost pilotov znaša 18,3 MN. Iz tega sledi faktor globalne varnosti 9,15.

6.1.4 Posedki

V primeru, da računamo s klasičnim pristopom, kjer vso obtežbo prevzamejo piloti znaša posedek pri dolgotrajni obtežbi 15mm. V tem primeru imamo skupino 30 pilotov.

Predpostavimo lahko, da so končni konsolidacijski posedki enaki razliki med končnimi elastičnimi posedki (drenirano stanje) in trenutnimi elastičnimi posedki (nedrenirano stanje) pri striktno elastični analizi. Končni konsolidacijski posedki znašajo:

$$S_{CF} = 15 \cdot \left(\frac{1}{668} - \frac{1}{1188} \right) = 0,0098 \text{ m} \quad (146)$$

Sedaj lahko izračunamo ocenjene končne posedke:

$$S_i + S_{CF} = 0,015 + 0,0098 = 0,025 \text{ m} = 25 \text{ mm} \quad (147)$$

Ta posedek zadosti projektnemu kriteriju, ki pravi, da lahko maksimalni končni posedki znašajo 50 mm.

6.2 Primer računa plošče, podprte s piloti

Vseh 9 prefabriciranih pilotov premera 0,6 m je uvrtno 15 m globoko. Povprečna vrednost mejnega trenja po plašču znaša 60 kPa v tlaku in 42 kPa v nategu. Nosilnost pod konico pa znaša 900 kPa. Iz tega izračunamo mejno osno nosilnost, ki v tlaku znaša 1,95 MN in v nategu 1,20 MN.

6.2.1 Ocena vertikalne nosilnosti

Za ploščo je mejna nosilnost ocenjena na $6c_u=0,6$ MPa, kjer je c_u nedrenirana strižna trdnost zemljine. Celotna nosilnost plošče:

$$V_{uR} = L \cdot B \cdot 6c_u = 10 \cdot 6 \cdot 0,6 = 36 \text{ MN} \quad (148)$$

Če seštejemo nosilnost plošče in pilotov, dobimo skupno nosilnost temeljenja (v tlaku):

$$V_u = V_{uR} + V_{uP} = 36 + (9 \cdot 1,95) = 53,55 \text{ MN} \quad (149)$$

Upoštevati moramo tudi nosilnost kocke, ki vsebuje ploščo in pilote, ob predpostavki, da se porušitev po plašču pojavi na zunanjem obroču okoli skupine pilotov. Prišteje se tudi nosilnost plošče zunaj obroča. Nosilnost kocke znaša:

$$\begin{aligned} V_{uB} &= 2 \cdot (8,6 + 4,6) \cdot 0,100 \cdot 15 + 8,6 \cdot 4,6 \cdot 0,900 + (10 \cdot 6 - 8,6 \cdot 4,6) \cdot 0,6 = \\ &= 39,60 + 35,60 + 12,60 = 87,46 \text{ MN} \end{aligned} \quad (150)$$

Ta vrednost presega vsoto nosilnosti plošče in pilotov, zato je mejna nosilnost temeljenja 53,55MN. Faktor varnosti znaša $53,55/20=2,67$ in ustreza projektneemu kriteriju.

6.2.2 Momentna nosilnost

Maksimalna momentna nosilnost tal:

$$M_m = \frac{p_{ur} B L^2}{8} = \frac{0,6 \cdot 6 \cdot 10^2}{8} = 45 \text{ MNm} \quad (151)$$

Mejna momentna nosilnost plošče:

$$M_{ur} = M_u \frac{27}{4} \frac{V}{V_u} \left[1 - \left(\frac{V}{V_u} \right)^{1/2} \right] = 45 \cdot \frac{27}{4} \cdot \frac{20}{53,55} \left(1 - \sqrt{\frac{20}{53,55}} \right) = 44,1 \text{ MNm} \quad (152)$$

Upoštevamo še prispevek pilotov:

$$M_{up} = \sum_{i=1}^9 P_{ui} |x_i| = 1,20 \cdot (3 \cdot 4 + 3 \cdot 4 + 3 \cdot 0) = 28,8 \text{ MNm} \quad (153)$$

Skupna momentna nosilnost znaša:

$$M_u = M_{ur} + M_{up} = 44,1 + 28,8 = 72,9 \text{ MNm} \quad (154)$$

Sedaj moramo preveriti še momentno nosilnost kocke, ki vsebuje pilote in zemljino. Dolžina kocke je 2,5 krat večja od širine zato je povprečni mejni bočni pritisk kocke približno:

$$\bar{p}_u = (B_B + 2r) c_u = 4,5 \cdot 0,1 = 0,45 \text{ MPa} \quad (155)$$

$$M_{uB} = \alpha_B \bar{p}_u B_B D_B^2 = 0,25 \cdot 0,45 \cdot 6 \cdot 15^2 = 151,9 \text{ MNm} \quad (156)$$

Vrednost iz enačbe (156) presega 72,9 MNm. Faktor varnosti znaša:

$$M_u / M_x = 72,9 / 25 = 2,92 \quad (157)$$

6.2.3 Mejna bočna nosilnost

Rešitve za izračun mejne bočne nosilnosti da Brooms (Brooms, B. B. Lateral resistance of piles in cohesive soils. J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 1964, 90, 2, 27-63.). Glava pilota se obravnava kot fiksna. Za kratke pilote daje Bromsova teorija mejno bočno nosilnost 7,6 MN za pilot. Za dolge pilote je upogibni moment pilota 0,45 MNm, mejna bočna nosilnost pilota pa znaša 0,61 MN. Za devet pilotov skupna bočna nosilnost znaša 5,49 MN. Ta vrednost je nižja kot pri kocki. Faktor varnosti pa znaša:

$$P_{up} / H_x = 5,49 / 2,0 = 2,74 \quad (158)$$

Mejno nosilnost P_u in M_{max} za kratke pilote neposredno odčitamo iz grafikona 1 ali jih izračunamo.

$$P_u = 9c_u D(L - 1,5D) = 9 \cdot 0,1 \cdot 0,6 \cdot (15 - 1,5 \cdot 0,6) = 7,6 \text{ MN} \quad (159)$$

$$M_{max} = P_u (0,5L + 0,75D) = 7,6 \cdot (0,5 \cdot 15 + 0,75 \cdot 0,6) = 60,42 \text{ MNm} \quad (160)$$

Za dolge pilote pa P_u očitamo iz grafikona 1, nato pa iz enačbe (163) določimo vrednost f . Ta nam določa globino na kateri se pilot plastificira.

$$M_y = W_b \cdot \alpha f_{yc} = \frac{\pi \cdot 0,6^3}{32} \cdot 0,85 \cdot 25 = 0,45 \text{ MNm} \quad (161)$$

$$\frac{M_y}{c_u D^3} = \frac{0,45}{0,1 \cdot 0,6^3} = 20,8 \Rightarrow \frac{P_u}{c_u D^2} = 17 \Rightarrow P_u = 17 \cdot 0,1 \cdot 0,6^2 = 0,61 \text{ MN} \quad (162)$$

$$P_u = \frac{2M_y}{1,5D + 0,5f} \Rightarrow f = \frac{2M_y - 1,5P_u D}{0,5P_u} = \frac{2 \cdot 0,45 - 1,5 \cdot 0,61 \cdot 0,6}{0,5 \cdot 0,61} = 1,151 \text{ m} \quad (163)$$

Za srednje dolge pilote pa lahko uporabimo sledeče enačbe:

$$f = \frac{P_u}{9c_u D} \quad (164)$$

$$M_y = 2,25c_u Dg^2 - 9c_u Df(1,5D + 0,5f) \quad (165)$$

$$L = g + 1,5D + f \quad (166)$$

če rešimo enačbe (164) – (166) za naše podatke:

$$P_u = 2,88 \text{ MN}$$

$$g = 8,76 \text{ m}$$

$$f = 5,34 \text{ m}$$

6.2.4 Obnašanje obtežba – posedki

Izvedeni so sledeči izračuni

- Nelinearna analiza s katero določimo zvezo med obtežbo in trenutnimi posedki
- Linearna analiza tako nedreniranega in dreniranega stanja. Iz tega določimo konsolidacijske posedke

Povprečna osna togost plošče je ocenjena iz elastičnih rešitev, ki jih podata Poulos in Davis, za togo okroglo ploščo na sloju končne debeline. Postopek je razložen v poglavju 5.2. Uporabimo enako ploščino kroga kot imamo ploščino pravokotnika. Vrednosti za togost plošče dobimo na sledeči način:

Nedrenirano stanje:

$$r = \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10}{3,14}} = 4,37 \text{ m} \quad (167)$$

Vrednost I_p odčitamo iz grafikona 3:

$$\left. \begin{array}{l} E_u = 30 \text{ MPa} \\ \nu_u = 0,5 \\ \frac{r}{h} = \frac{4,37}{25} = 0,175 \end{array} \right\} \Rightarrow I_p = 0,98 \quad (168)$$

$$p_{av} = \frac{20}{\pi \cdot 4,37^2} = 0,3334 \text{ MN/m}^2 \quad (169)$$

$$\rho_z = \frac{0,3334 \cdot 4,37}{30} \cdot 0,98 = 0,04759 \text{ m} \quad (170)$$

$$K_{ri} = \frac{P}{\rho_z} = \frac{20}{0,04759} = 420 \text{ MN/m} \quad (171)$$

Drenirano stanje:

$$r = \sqrt{\frac{a \cdot b}{\pi}} = \sqrt{\frac{6 \cdot 10}{3,14}} = 4,37 \text{ m} \quad (172)$$

Vrednost I_ρ odčitamo iz grafikona 3:

$$\left. \begin{array}{l} E = 15 \text{ MPa} \\ \nu = 0,3 \\ \frac{r}{h} = \frac{4,37}{25} = 0,175 \end{array} \right\} \Rightarrow I_\rho = 1,22 \quad (173)$$

$$p_{av} = \frac{15}{\pi \cdot 4,37^2} = 0,2500 \text{ MN/m}^2 \quad (174)$$

$$\rho_z = \frac{0,2500 \cdot 4,37}{15} \cdot 1,22 = 0,0888 \text{ m} \quad (175)$$

$$K_{ri} = \frac{P}{\rho_z} = \frac{15}{0,0888} = 169 \text{ MN/m} \quad (176)$$

Rešitve za določitev togosti posameznega pilota podata Randolph in Wroth (Randolph, M. F., Wroth, C. P. 1978. Analysis of deformation of vertically loaded piles. J. Geotech. Engineering Div., ASCE, 104,12:1465 – 1488). Teoretični postopek je opisan v poglavju 5.3. Togost pilota v nedreniranem stanju znaša 217 MN/m, v dreniranem pa 122 MN/m. Skupinski faktor se upošteva v obliki $\sqrt{n_p}$ (n_p je število pilotov). Dobimo sledeče togosti pilotov:

Nedrenirano stanje: $K_{pi}=651 \text{ MN/m}$

Drenirano stanje: $K_{pi}=366 \text{ MN/m}$

Togost pilotov izračunamo na sledeči način (prikazan je izračun za nedrenirano stanje, v primeru dreniranega samo zamenjamo vrednosti za E in ν):

PILOTI:

$r_0 = 0,3$ m ... radij plašča pilota

$r_b = 0,3$ m ... radij konice pilota

$l = 15$ m ... dolžina pilota

$E_p = 30000$ MPa ... Youngov modul pilota

$E_p = (E \cdot A)_p / (\pi \cdot r_0^2)$... Youngov modul za okrogel pilot (177)

$n_p = 9$... število pilotov

LASTNOSTI TAL:

$E_{s(l/2)} = 30$ MPa ... Youngov modul tal na globini $l/2$

$E_{s(l)} = 30$ MPa ... Youngov modul tal na globini l

$E_{s(b)} = 30$ MPa ... Youngov modul pod konic

$\nu_{(l/2)} = 0,5$... Poissonov količnik tal na globini $l/2$

$\nu_{(l)} = 0,5$... Poissonov količnik tal na globini l

$\nu_b = 0,5$... Poissonov količnik tal pod konico

$$G_{s(l/2)} = \frac{E_{s(l/2)}}{2(1 + \nu_{(l/2)})} = 10,0067 \text{ MPa} \dots \text{strižni modul tal na globini } l/2 \quad (178)$$

$$G_{s(l)} = \frac{E_{s(l)}}{2(1 + \nu_{(l)})} = 10,0067 \text{ MPa} \dots \text{strižni modul tal na globini } l \quad (179)$$

$$G_{s(b)} = \frac{E_{s(b)}}{2(1 + \nu_b)} = 10,0067 \text{ MPa} \dots \text{strižni modul tal pod konico} \quad (180)$$

IZRAČUN PARAMETROV:

$$\eta_r = \frac{r_b}{r_0} = 1,0 \quad (181)$$

$$\xi = G_{s(l)} / G_{s(b)} \quad (182)$$

$$\rho = G_{s(l/2)} / G_{s(l)} \dots \text{vpliv spodnjega sloja na togost} \quad (183)$$

$$r_m = 0,25 \cdot l + (2,5 \cdot l \cdot \rho \cdot (1 - \nu) - 0,25 \cdot l) \cdot \xi = 18,7875 \dots \text{oddaljenost od pilota pri kateri so strižne napetosti zanemarljive} \quad (184)$$

$$\zeta = \ln(r_m / r_0) = 4,1372 \quad (185)$$

$$\lambda = E_p / G_{s(l)} = 2998 \quad (186)$$

$$\mu l = \sqrt{2 / (\zeta \cdot \lambda)} \cdot (l / r_0) = 0,6349 \quad (187)$$

TOGOST POSAMEZNEGA PILOTA:

$$k = G_{s(l)} \cdot r_0 \cdot \frac{\left[\frac{4 \cdot \eta_r}{\xi \cdot (1 - \nu)} + \frac{2 \cdot \pi}{\zeta} \cdot \rho \cdot \frac{l}{r_0} \cdot \frac{\tanh(\mu l)}{\mu l} \right]}{\left[1 + \frac{4 \cdot \eta_r}{\xi \cdot (1 - \nu)} \cdot \frac{1}{\pi \cdot \lambda} \cdot \frac{l}{r_0} \cdot \frac{\tanh(\mu l)}{\mu l} \right]} = 217 \text{ MN/m} \quad (188)$$

TOGOT SKUPINE PILOTOV:

$$\omega = \omega_0 \cdot \omega_r \cdot \omega_s \cdot \omega_p \cdot \omega_v \quad (189)$$

$$k_p = n_p^\omega \cdot k = 9^{0,5} \cdot 217 = 651 \text{ MN/m} \quad (190)$$

Vrednosti $\omega_0, \omega_r, \omega_s, \omega_p, \omega_v$ odčitamo iz grafikona 4 v poglavju 5.3. Znano je, da vrednost ω za trenjske pilote v glini znaša 0,5 za trenjske pilote v pesku pa 0,33.

Togost temeljenja znaša:

$$K_{pri} = XK_{pi} \quad (191)$$

Za nedrenirano stanje:

$$X = \frac{1 - 0,6(420 / 651)}{1 - 0,64(420 / 651)} = 1,044 \quad (192)$$

$$K_{ue} = 1,044 \cdot 651 = 680 \text{ MN/m} \quad (193)$$

Za drenirano stanje:

$$X = \frac{1 - 0,6(169/366)}{1 - 0,64(169/366)} = 1,026 \quad (194)$$

$$K'_e = 1,026 \cdot 366 = 375 \text{ MN/m} \quad (195)$$

Izračunajmo še delež obtežbe, ki jo nosijo piloti β_p :

Nedrenirano stanje:

$$\alpha = \frac{0,2}{1 - 0,8 \cdot 420/651} \cdot \frac{420}{651} = 0,267 \quad (196)$$

$$\beta_p = 1/1,267 = 0,79 \quad (197)$$

Drenirano stanje:

$$\alpha = \frac{0,2}{1 - 0,8 \cdot 169/366} \cdot \frac{169}{366} = 0,146 \quad (198)$$

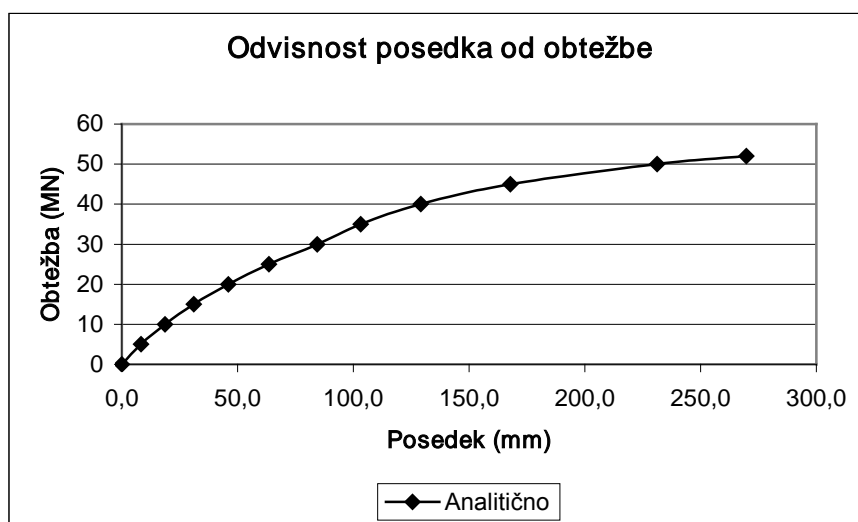
$$\beta_p = 1/1,146 = 0,87 \quad (199)$$

Za nedrenirano stanje je tabelirana nelinearna analiza po postopku opisanem v poglavju 4.3.2. Predpostavljeni hiperbolični faktorji znašajo $R_{fr}=0,75$ in $R_{fp}=0,5$. Za vsako obtežbo so uporabljene vrednosti β_p in X iz prejšnje vrednosti obtežbe. Začnejo se z vrednostmi za prvo obtežbo.

Preglednica 16: Izračun krivulje obtežba-posedek za zgornji primer (nedrenirano stanje)

V (MN)	X	α	β_p	V_p (MN)	V_r (MN)	K_r (MN/m)	K_p (MN/m)	V_A (MN)	S_A (m)	S (mm)	V>V _A
0	1,044	0,267	0,789	0,00	0,00	420,0	651,0	22,2	0,0654	0,0	Ne
5	1,044	0,267	0,789	3,95	1,05	410,8	577,8	22,2	0,0654	8,3	Ne
10	1,052	0,330	0,752	7,52	2,48	398,3	511,5	23,3	0,0681	18,6	Ne
15	1,062	0,413	0,708	10,62	4,38	381,6	454,1	24,8	0,0717	31,1	Ne
20	1,073	0,513	0,661	13,22	6,78	360,7	405,8	26,6	0,0760	45,9	Ne
25	1,082	0,615	0,619	15,48	9,52	336,7	363,9	28,3	0,0804	63,5	Ne

30	-	-	-	17,55	12,45	311,1	325,5	28,3	0,0804	85,8	Da
35	-	-	-	17,55	17,45	267,3	325,5	28,3	0,0804	105,3	Da
40	-	-	-	17,55	22,45	223,6	325,5	28,3	0,0804	132,6	Da
45	-	-	-	17,55	27,45	179,8	325,5	28,3	0,0804	173,1	Da
50	-	-	-	17,55	32,45	136,1	325,5	28,3	0,0804	239,6	Da
52	-	-	-	17,55	34,45	118,6	325,5	28,3	0,0804	280,0	Da



Grafikon 11: Krivulji obtežba-posedek (nedrenirano stanje)

Vidimo, da posedek izračunan analitično pri dolgotrajni obtežbi 15 MN znaša 31 mm.

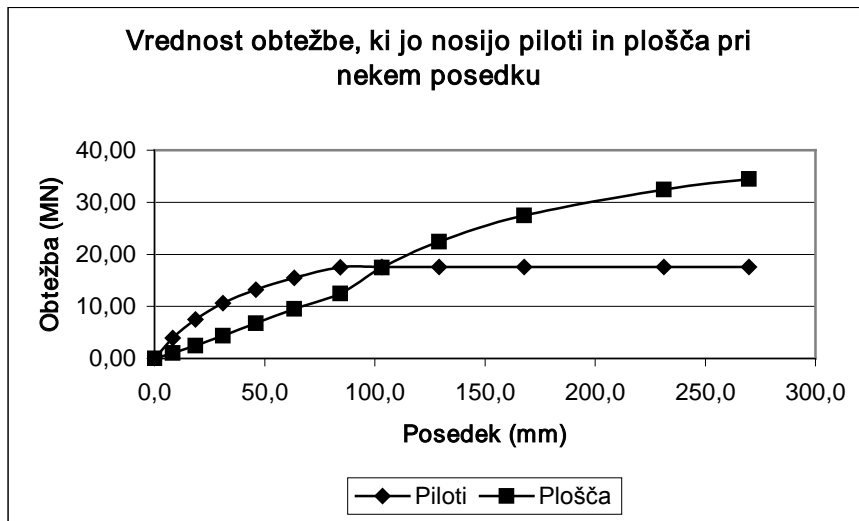
Predpostavimo lahko, da so končni konsolidacijski posedki enaki razliki med končnimi elastičnimi posedki (drenirano stanje) in trenutnimi elastičnimi posedki (nedrenirano stanje) pri striktno elastični analizi. Končni konsolidacijski posedki znašajo:

$$S_{CF} = \frac{V}{K_e} - \frac{V}{K_{ue}} = 15 \cdot \left(\frac{1}{375} - \frac{1}{680} \right) = 0,0179 \text{ m} \quad (200)$$

Sedaj lahko izračunamo ocenjene končne posedke:

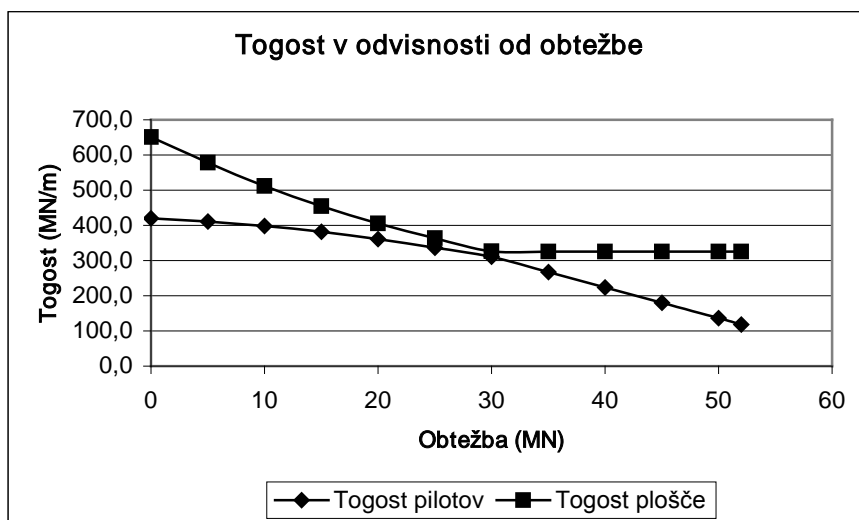
$$S_i + S_{CF} = 0,0311 + 0,0179 = 0,0490 \text{ m} = 49 \text{ mm} \quad (201)$$

Ta posedek zadosti projektному kriteriju, ki pravi, da lahko maksimalni končni posedki znašajo 50 mm.



Grafikon 12: Graf prikazuje, kako se spreminja vrednost obtežbe, ki jo prevzame plošča in piloti pri različnih posedkih.

Z povečevanjem obtežbe delež obremenitve, ki pade na pilote pada. Ko piloti dosežejo svojo nosilnost ne morejo prevzeti dodatne obtežbe. Vso ostalo obtežbo prevzame plošča. Obremenitev plošče narašča dokler še ta ne doseže svoje nosilnosti.



Grafikon 13: Grafikon prikazuje spreminjanje togosti plošče in pilotov pri povečevanju obtežbe.

Togost pilotov se niža dokler ne dosežejo vrednosti svoje nosilnosti. Ko obremenitev pilotov doseže vrednost nosilnosti se trend padanja togosti pri plošči poveča. Razlog za to je v

nelinearnosti krivulje obtežba-posedek. Iz krivulje vidimo, da posedek raste hitreje kot obtežbe (nelinearen odnos), zato se tudi togost hitreje zmanjšuje.

6.2.5 Diferenčni posedki

Diferenčne posedke lahko samo grobo ocenimo. Ob predpostavki, da je obtežba enakomerno porazdeljena, lahko diferenčne posedke določimo po metodi Randolpha (poglavje 5.4) za pravokotno ploščo. Togost plošče in zemljine je definirana z enačbo:

$$K_{rs} = 5,57 \frac{E_r (1 - \nu_s^2)}{E_s (1 - \nu_r^2)} \left(\frac{B}{L} \right)^{1/2} \left(\frac{t}{L} \right)^3 \quad (202)$$

$E_r = 30000$ MPa ... Youngov elastični modul plošče

$E_s = 15$ MPa ... Youngov elastični modul zemljine

$\nu_s = 0,3$... Poissonovo število zemljine

$\nu_r = 0,2$... Poissonovo število plošče

$B = 6$ m ... širina plošče

$L = 10$ m ... dolžina plošče

$t = 0,5$ m ... debelina plošče

$K_{rs} = 1,022$... relativna togost plošče

Iz grafikona 6 v poglavju 5.4 odčitamo delež, ki ga predstavlja diferenčni posedek v primerjavi s celotnim posedkom. Ta delež znaša 0,22. Torej maksimalni diferenčni posedek iz centra proti vogalu znaša:

$$s = \sqrt{4^2 + 2^2} = 4,47 \text{ m} \quad (203)$$

$$R = \sqrt{\frac{n \cdot s}{L}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 4,47}{15}} = 1,64 \quad (204)$$

$$L/d = 15/0,6 = 25 \quad (205)$$

Odčitam vrednost normiranega diferenčnega posedka, ki znaša 0,22.

$$0,22 \cdot 0,049 = 0,011 \text{ m} \quad (206)$$

Ta vrednost minimalno presega predpisano vrednost 10 mm. Zato moramo povečati debelino plošče iz 0,5 na 0,52 m.

6.2.6 Sile v pilotih

Da lahko projektiramo pilote, moramo določiti maksimalne in minimalne osne sile. Projektna obtežba znaša 20 MN. Delež, ki jo nosijo piloti, znaša $\beta_p=0,661$.

$$P_{\max} = \frac{20 \cdot 0,661}{9} + \frac{25 \cdot 4}{96} = 1,47 + 1,04 = 2,51 \text{ MN} \quad (207)$$

$$P_{\min} = 1,47 - 1,04 = 0,43 \text{ MN} \quad (208)$$

Maksimalna sila v pilotu presega mejno nosilnost pilota 1,95 MN. To pomeni, da so nosilnosti zunanjih pilotov polno izkoriščene. Pilote je potrebno projektirati tako, da prenesejo maksimalno določeno obremenitev.

6.3 Račun s programom MPILE

Sedaj izračunamo posedke s programom MPile. Dobimo sledeče rezultate:

Preglednica 17: Posedki izračunani s programom MPile

V (MN)	S (mm)
0	0
5	8,87
10	17,75
15	27,93

6.4 Primerjava rezultatov

Preglednica 18: Primerjava rezultatov

Metoda	Št. pilotov	Nosilnost (MN)	Posedki (mm)
Klasičen pristop	30	58,5	15
Plošča podprta s piloti	9	53,55	31
MPile	9	53,55	28

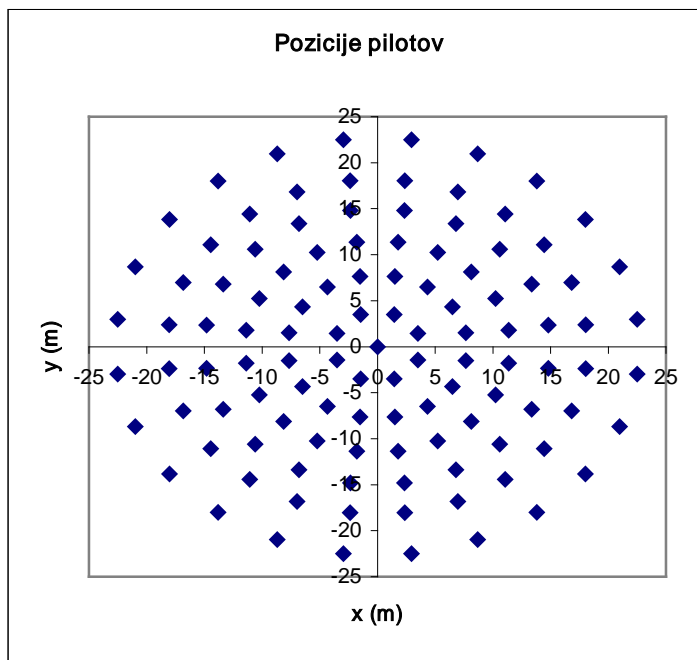
Razlika med posedki izračunanimi analitično z metodo računa plošče, podprete s piloti, in računom z računalniškim programom je minimalna.

Posedek pri klasičnem pristopu je za polovico manjši. Razlog za to je več kot trikrat večje število pilotov. Vprašanje je, če se uporaba trikrat večjega števila pilotov ekonomsko splača ob ne toliko manjšem računskem posedku.

Izračunana nosilnost je pri vseh projektnih pristopih podobna. Opozoriti pa je treba, da tudi pri klasičnem pristopu plošča prispeva k nosilnosti in zmanjšanju posedkov, le v računu se ne upošteva. Zato lahko rečemo, da imamo v plošči rezervo nosilnosti.

7 REZERVOAR TEMELJEN NA PLOŠČI PODPRTI S PILOTI

Temeljenje je sestavljeno iz okrogle plošče premera 49,2 m in debeline 1 m. To ploščo podpira 113 jeklenih pilotov dolžine 30m in premera 0,8125m. Debelina stene pilota znaša 0,0125m. Plošča je obremenjena s površinsko obtežbo 145 kPa.



Grafikon 14: Raster pilotov

7.1 Ocena vertikalne nosilnosti

7.1.1 Ocena vertikalne nosilnosti pilotov

Preglednica 19: Izračun nosilnosti pod konico pilota

Podatki	
$\phi=$	35 °
$\gamma' =$	11 kN/m ³
$c =$	0 kPa
$c_u =$	0 kPa
$L_b =$	2,5 m
$B =$	0 m
$d =$	0,8128 m
$A_p =$	0,52 m ²

koherentna tla			
$q =$	334,27 kPa	$N_c =$	9
$G_s =$	30770 kPa		
$D =$	30	$Q_b =$	0 kN

Kulhawy in Goodman		Meyerhoff		Vesič		Berezatzev	
Odčitamo:		Odčitamo:		Izračunamo:		Odčitamo:	
N_c =	18	N_q^* =	150	K_0 =	0,426	N_q =	70
N_q =	15	N_c^* =	200	η =	0,618		
N_γ =	28			I_r =	131,5		
Izračunamo:		Izračunamo:		I_{rr} =	131,5		
F_c =	1,2	L_b/B =	3,076	Odčitamo			
F_γ =	0,7	Odčitamo:		N_q =	132		
		$(L_b/B)_{cr}$ za N_q =	10	N_c =	94		
		$(L_b/B)_{cr}$ za N_c =	10				
Q_b [kN]=	2647			Q_b [kN]=	14140	Q_b [kN]=	12141
		N_q =	92				
		N_c =	123				
		Q_b [kN]=	15831				
		$_{max}Q_b$ [kN]=	1676				

Ocenjena nosilnost pod konico Q_b pilota znaša 1676 kN.

Preglednica 20: Nosilnost po plašču za nedrenirano stanje

z	σ_v	c_u	c_u/σ_v'	ϕ'	$(c_u/\sigma_v')_{nc}$	α	q_s	Q_s
0	1,00	0,00	0,00	35,00	0,35	0,00	0,00	0,00
1	10,50	0,00	0,00	35,00	0,35	0,00	0,00	0,00
2	22,00	0,00	0,00	35,00	0,35	0,00	0,00	2,72
2	14,00	10,56	0,75	20,00	0,20	0,51	5,44	6,35
3	21,56	12,24	0,57	20,00	0,20	0,59	7,26	8,16
4	29,50	13,91	0,47	20,00	0,20	0,65	9,06	9,96
5	37,81	15,58	0,41	20,00	0,20	0,70	10,86	11,76
6	46,50	17,26	0,37	20,00	0,20	0,73	12,67	13,59
7	55,56	18,93	0,34	20,00	0,20	0,77	14,50	15,44
8	65,00	20,61	0,32	20,00	0,20	0,79	16,37	17,31
9	74,81	22,28	0,30	20,00	0,20	0,82	18,26	19,22
10	85,00	23,95	0,28	20,00	0,20	0,84	20,18	21,16
11	95,56	25,63	0,27	20,00	0,20	0,86	22,13	23,12
12	106,50	27,30	0,26	20,00	0,20	0,88	24,11	20,88
12	73,05	27,30	0,37	15,63	0,16	0,65	17,65	
13	81,01	28,98	0,36	15,94	0,16	0,67	19,34	20,21
14	89,25	30,65	0,34	16,25	0,16	0,69	21,08	21,98
15	97,78	32,32	0,33	16,56	0,17	0,71	22,88	23,80
16	106,60	34,00	0,32	16,88	0,17	0,73	24,73	25,68
17	115,71	35,67	0,31	17,19	0,17	0,75	26,63	27,61
18	125,10	37,35	0,30	17,50	0,18	0,77	28,59	29,60

19	134,78	39,02	0,29	17,81	0,18	0,78	30,61	31,64
20	144,75	40,69	0,28	18,13	0,18	0,80	32,67	33,74
21	155,01	42,37	0,27	18,44	0,18	0,82	34,80	35,89
22	165,55	44,04	0,27	18,75	0,19	0,84	36,97	38,09
23	176,38	45,72	0,26	19,06	0,19	0,86	39,21	40,35
24	187,50	47,39	0,25	19,38	0,19	0,88	41,49	42,66
25	198,91	49,06	0,25	19,69	0,20	0,89	43,83	45,03
26	210,60	50,74	0,24	20,00	0,20	0,91	46,23	47,45
27	222,58	52,41	0,24	20,31	0,20	0,93	48,68	49,93
28	234,85	54,09	0,23	20,63	0,21	0,95	51,18	52,46
29	247,41	55,76	0,23	20,94	0,21	0,96	53,74	54,39
29,5	253,79	56,60	0,22	21,09	0,21	0,97	55,04	27,52
29,5	324,49	0,00	0,00	34,00	0,34			
30	334,27	0,00	0,00	34,86	0,35	0,00	0,00	0,00

Σ 818 kN/m

Q_s 2087 kN

Vrednost Q_{sg} predstavlja nosilnost po plašču, ki se mobilizira v glinenih slojih.

Preglednica 21: Nosilnost po plašču za drenirano stanje

	$\sigma_{v,avg}$	ϕ_{avg}	k_0	K	q_s	Δh	Q_s (kN)	q_s (kN/m)
Umetni nasip	11,17	35,00	0,43	0,43	1,73	2	9	3,47
Reful	57,44	20,00	0,66	0,66	13,76	10	351	137,55
Q_{2g}	158,98	18,43	0,68	0,68	39,57	17,5	1768	692,49
Q_{1g+p}	329,38	34,43	0,43	0,43	52,10	0,5	66	26,05

Sedaj lahko ocenimo celotno odpornost pilota po plašču. Odpornosti v glinenih slojih Q_{sg} prištejem odpornosti umetnega nasipa in sloja Q_{1g+p} . Skupna ocenjena odpornost po plašču Q_s znaša 2162 kN.

Ocenimo celotno nosilnost pilota, ki znaša:

$$Q_{ult1} = Q_s + Q_b = 1676 \text{ kN} + 2162 \text{ kN} \approx 3,8 \text{ MN} \quad (209)$$

Nosilnost vseh pilotov pa je:

$$Q_{ultP} = 113 * 3,8 = 429,4 \text{ MN} \quad (210)$$

7.1.2 Mejna nosilnost plošče

Celotna nosilnost plošče je ocenjena na:

$$6 c_u = 6 * 33,7 = 202 \text{ kPa} \quad (211)$$

$$Q_{ultR} = \frac{\pi \cdot 49,2^2}{4} \cdot 0,202 = 384 \text{ MN} \quad (212)$$

7.1.3 Vertikalna nosilnost temeljenja

$$Q_{ult} = 384 + 429,4 = 813,4 \text{ MN} \quad (213)$$

7.1.4 Vertikalna nosilnost »kocke«

$$\underbrace{847,52}_{\text{nosil. po plaščl}} \cdot \pi \cdot d + \underbrace{3223,1}_{\text{nosil. pod konico}} \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4} + \left(\frac{\pi \cdot D^2}{4} - \frac{\pi \cdot d^2}{4} \right) \cdot \underbrace{202}_{\text{nosil. ploščl}} = \quad (214)$$

$$= 120,88 + 5217,66 + 57,03 = 5395,6 \text{ MN}$$

$$d = 45,4 \text{ m}$$

$$D = 49,2 \text{ m}$$

7.1.5 Mejna nosilnost temeljenja

$$Q_{ult} = 813,4 \text{ MN} \quad (215)$$

Obtežba pa znaša:

$$V = 145 \text{ kPa} \cdot \frac{\pi \cdot 42,67^2}{4} + 87 \frac{\text{kN}}{\text{m}} \cdot \pi \cdot 45,57 + G_{\text{ploščl}} = \quad (216)$$

$$= 207,35 + 12,46 + 53,23 = 273,04 \text{ MN}$$

$$G_{\text{ploščl}} = \frac{\pi \cdot 49,2^2}{4} \cdot 1 \cdot 28 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3} = 53,23 \text{ MN} \quad (217)$$

Varnost znaša:

$$F = \frac{Q_{ult}}{V} = 2,98 \quad (218)$$

7.2 Obnašanje obtežba – posedki

7.2.1 Togost plošče

Nedrenirano stanje:

$$r = 24,6 \text{ m}$$

$$\left. \begin{array}{l} E_u = 4,25 \text{ MPa} \\ \nu_u = 0,5 \\ \frac{r}{h} = \frac{24,6}{30} = 0,85 \end{array} \right\} \Rightarrow I_\rho = 0,41 \quad (219)$$

$$p_{av} = \frac{273,04}{\pi \cdot 24,6^2} = 0,14362 \text{ MN/m}^2 \quad (220)$$

$$\rho_z = \frac{0,14362 \cdot 24,6}{4,25} \cdot 0,41 = 0,3408 \text{ m} \quad (221)$$

$$K_{ri} = \frac{P}{\rho_z} = \frac{273,04}{0,3408} = 801,1 \text{ MN/m} \quad (222)$$

Drenirano stanje:

$$r = 24,6 \text{ m}$$

$$\left. \begin{array}{l} E = 3,68 \text{ MPa} \\ \nu = 0,3 \\ \frac{r}{h} = \frac{24,6}{30} = 0,85 \end{array} \right\} \Rightarrow I_\rho = 0,65 \quad (223)$$

$$p_{av} = \frac{273,04}{\pi \cdot 24,6^2} = 0,14362 \text{ MN/m}^2 \quad (224)$$

$$\rho_z = \frac{0,14362 \cdot 24,6}{3,21} \cdot 0,65 = 0,6240 \text{ m} \quad (225)$$

$$K_{ri} = \frac{P}{\rho_z} = \frac{273,04}{0,6240} = 437,5 \text{ MN/m} \quad (226)$$

7.2.2 Togost pilotov

Preglednica 22: Togost skupine pilotov v nedreniranih pogojih

Karakteristike pilotov		
r_0	0,8125	m
r_b	0,8125	m
L	30	m
E_p	2428,15	MPa
n_p	113	

Lastnosti tal		
$E_{s(L/2)}$	21,000	MPa
$E_{s(L)}$	21,000	MPa
$E_{s(b)}$	79,999	MPa
$v_{(L/2)}$	0,500	
$v_{(L)}$	0,500	
$v_{(b)}$	0,300	
v	0,500	
$G_{s(L/2)}$	7,000	MPa
$G_{s(L)}$	7,000	MPa
$G_{s(b)}$	30,769	MPa

Izračun parametrov	
η_r	1
ξ	0,227502
ρ	1
r_m	14,32505
ζ	2,869649
λ	346,8786
μ_L	1,655045

Izračunamo povprečno vrednost za ω	
ω_{avg}	0,503

Togost posameznega pilota		
k_1	275	MN/m

Togost skupine pilotov znaša		
k_p	2956	MN/m

Preglednica 23: Togost skupine pilotov v dreniranih pogojih

Karakteristike pilotov		
r_0	0,8125	m
r_b	0,8125	m
L	30	m
E_p	2428,15	MPa
n_p	113	

Lastnosti tal		
$E_{s(L/2)}$	18,200	MPa
$E_{s(L)}$	18,200	MPa
$E_{s(b)}$	79,999	MPa
$v_{(L/2)}$	0,300	
$v_{(L)}$	0,300	
$v_{(b)}$	0,300	
v	0,300	
$G_{s(L/2)}$	7,000	MPa
$G_{s(L)}$	7,000	MPa
$G_{s(b)}$	30,769	MPa

Izračun parametrov	
η_r	1
ξ	0,227502
ρ	1
r_m	17,73758
ζ	3,083325
λ	346,8786
μ_L	1,596668

Izračunamo povprečno vrednost za ω

ω_{avg}	0,503
----------------	-------

Togost posameznega pilota

k_1	261	MN/m
-------	-----	------

Togost skupine pilotov znaša

k_p	2815	MN/m
-------	------	------

7.2.3 Izračun togosti temeljenja

Nedrenirano stanje:

$$X = \frac{1 - 0,6 \cdot (801,1 / 2956)}{1 - 0,64 \cdot (801,1 / 2956)} = 1,0131 \quad (227)$$

$$K_{ue} = X \cdot K_{pi} = 1,0131 \cdot 2956 = 2995 \frac{\text{MN}}{\text{m}} \quad (228)$$

Drenirano stanje:

$$X = \frac{1 - 0,6 \cdot (437,5 / 2815)}{1 - 0,64 \cdot (437,5 / 2815)} = 1,0069 \quad (229)$$

$$K_e' = X \cdot K_{pi} = 1,0069 \cdot 2815 = 2834 \frac{\text{MN}}{\text{m}} \quad (230)$$

7.2.4 Izračun deleža obtežbe, ki ga nosijo piloti

Nedrenirano stanje:

$$\alpha = \frac{0,2}{1 - 0,8 \cdot 801,1 / 2956} \cdot \frac{801,1}{2956} = 0,0692 \quad (231)$$

$$\beta_p = \frac{1}{1,0692} = 0,935 \quad (232)$$

Drenirano stanje:

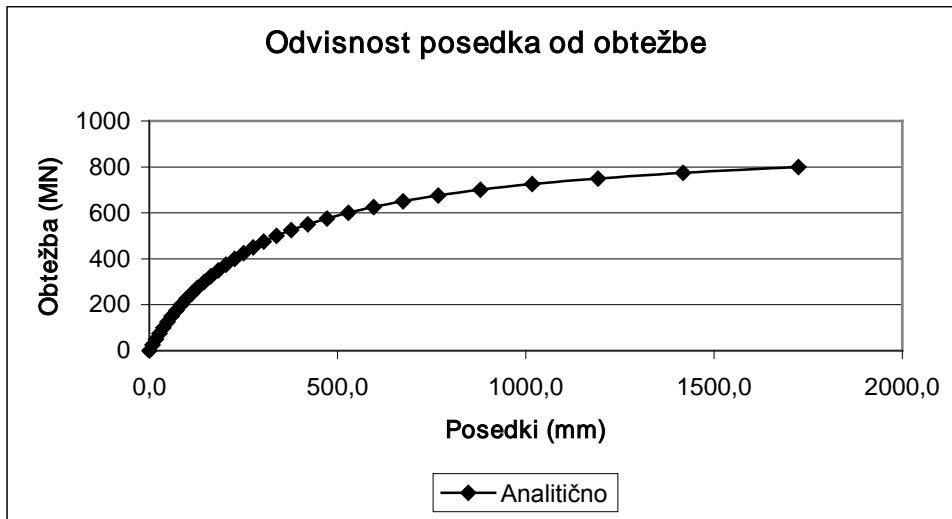
$$\alpha = \frac{0,2}{1 - 0,8 \cdot 437,5 / 2815} \cdot \frac{437,5}{2815} = 0,0355 \quad (233)$$

$$\beta_p = \frac{1}{1,0355} = 0,966 \quad (234)$$

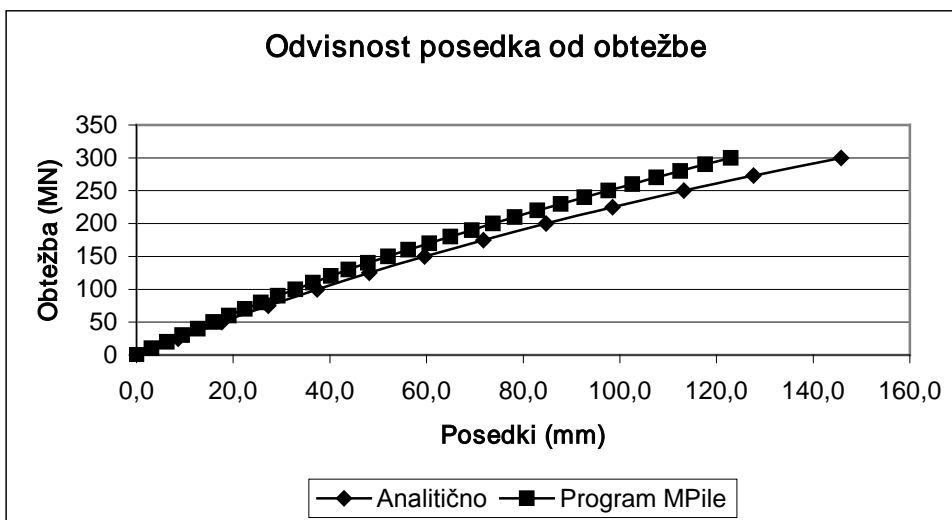
7.2.5 Tabela in diagram obtežba – posedek

Preglednica 24: Izračun krivulje obtežba-posedek za primer rezervoarja za gorivo (nedrenirano stanje)

V (MN)	X	α	β_p	V_p (MN)	V_r (MN)	K_r (MN/m)	K_p (MN/m)	V_A (MN)	S_A (m)	S (mm)	$V > V_A$
0	1,013	0,069	0,935	0,00	0,00	801,1	2956,0	459,1	0,3066	0,0	Ne
25	1,013	0,069	0,935	23,38	1,62	798,6	2875,5	459,1	0,3066	8,6	Ne
50	1,014	0,071	0,933	46,67	3,33	795,9	2795,4	460,1	0,3071	17,6	Ne
75	1,014	0,074	0,931	69,85	5,15	793,0	2715,6	461,1	0,3077	27,2	Ne
100	1,014	0,076	0,929	92,92	7,08	790,0	2636,2	462,1	0,3082	37,4	Ne
125	1,015	0,079	0,927	115,87	9,13	786,8	2557,2	463,3	0,3089	48,2	Ne
150	1,015	0,082	0,925	138,68	11,32	783,4	2478,7	464,5	0,3095	59,6	Ne
175	1,016	0,085	0,922	161,35	13,65	779,7	2400,6	465,7	0,3102	71,8	Ne
200	1,016	0,088	0,919	183,86	16,14	775,9	2323,1	467,1	0,3109	84,7	Ne
225	1,017	0,091	0,916	206,21	18,79	771,7	2246,2	468,5	0,3117	98,5	Ne
250	1,018	0,095	0,913	228,36	21,64	767,2	2170,0	470,1	0,3126	113,2	Ne
273	1,018	0,099	0,910	248,50	24,50	762,8	2100,7	471,7	0,3134	127,6	Ne
300	1,019	0,102	0,907	272,15	27,85	757,5	2019,3	473,4	0,3143	145,8	Ne
325	1,020	0,107	0,903	293,53	31,47	751,9	1945,7	475,4	0,3154	163,8	Ne
350	1,021	0,112	0,899	314,78	35,22	746,0	1872,5	477,4	0,3165	183,2	Ne
375	1,021	0,117	0,895	335,73	39,27	739,7	1800,4	479,6	0,3177	203,9	Ne
400	1,022	0,122	0,891	356,38	43,62	732,9	1729,3	482,0	0,3190	226,3	Ne
425	1,023	0,128	0,886	376,70	48,30	725,5	1659,4	484,5	0,3203	250,3	Ne
450	1,024	0,134	0,881	396,66	53,34	717,6	1590,7	487,1	0,3218	276,2	Ne
475	1,025	0,141	0,876	416,23	58,77	709,2	1523,3	490,0	0,3233	304,1	Ne
500	-	-	-	429,40	70,60	690,6	1478,0	490,0	0,3233	337,8	Da
525	-	-	-	429,40	95,60	651,5	1478,0	490,0	0,3233	377,0	Da
550	-	-	-	429,40	120,60	612,4	1478,0	490,0	0,3233	421,3	Da
575	-	-	-	429,40	145,60	573,3	1478,0	490,0	0,3233	471,6	Da
600	-	-	-	429,40	170,60	534,2	1478,0	490,0	0,3233	529,2	Da
625	-	-	-	429,40	195,60	495,1	1478,0	490,0	0,3233	596,0	Da
650	-	-	-	429,40	220,60	455,9	1478,0	490,0	0,3233	674,2	Da
675	-	-	-	429,40	245,60	416,8	1478,0	490,0	0,3233	767,1	Da
700	-	-	-	429,40	270,60	377,7	1478,0	490,0	0,3233	879,3	Da
725	-	-	-	429,40	295,60	338,6	1478,0	490,0	0,3233	1017,3	Da
750	-	-	-	429,40	320,60	299,5	1478,0	490,0	0,3233	1191,4	Da
775	-	-	-	429,40	345,60	260,4	1478,0	490,0	0,3233	1417,9	Da
800	-	-	-	429,40	370,60	221,2	1478,0	490,0	0,3233	1724,4	Da



Grafikon 15: Krivulja obtežba-posedek za primer rezervoarja za gorivo (nedrenirano stanje)



Grafikon 16: Krivulja obtežba-posedek za primer rezervoarja za gorivo (nedrenirano stanje) izračunana analitično in s programom MPile

Iz tabele vidimo, da posedek pri obtežbi 145 kPa znaša približno 13 cm. Posedek izračunan s programom MPile pa 11 cm.

7.3 Končni in konsolidacijski posedki

Konsolidacijski posedki:

$$S_{CF} = \frac{V}{K_e'} - \frac{V}{K_{ue}} = 273 \cdot \left(\frac{1}{2834} - \frac{1}{2995} \right) = 0,0052 \text{ m} \quad (235)$$

Konsolidacijski posedki znašajo 0,5 cm. Iz tega sledi, da končni posedki znašajo 13,5 cm.

7.4 Sile v pilotih

Da lahko projektiramo pilote, moramo določiti maksimalne in minimalne osne sile. Projektna obtežba znaša 273,04 MN. Delež, ki jo nosijo piloti, znaša $\beta_p=0,910$.

$$P = \frac{273,04 \cdot 0,910}{113} = 2,2 \text{ MN} \quad (236)$$

8 DELOVANJE PROGRAMA MPiLE

Program Mpile omogoča trodimenzionalno analizo pilotov in skupin pilotov. V MPiLu je združeno več računskih metod. Vsaka od teh metod ima svoje prednosti in omejitve. Isti računski primer lahko izračunamo z različnimi metodami tako, da enostavno preklapljammo med njimi.

Vnos vhodnih podatkov je enostaven. Potrebujemo karakteristike tal in pilotov, določimo še nekaj računskih parametrov ter pozicije pilotov in pripravljeni smo za analizo.

Program pa vsebuje pomembno omejitev. Plošča s katero so piloti povezani v skupino, je absolutno toga.

8.1 Vzmeti kot nadomestilo za zemljino

Zvezo med piloti in sosednjo zemljino MPiLe opiše z uporabo horizontalnih in vertikalnih vzmeti ob pilotih. MPiLe določi nelinearno zvezo med silo in pomiki. To zvezo dobimo iz izbire projektnega kriterija (npr. API (American Petroleum Institute)). Uporabimo pa lahko zveze, ki jih uporabnik definira sam.

Pravila načrtovanja modela zahtevajo samo osnovne parametre za posamezen sloj. Vse lahko določimo iz CPT testa. Pravila načrtovanja modela se spreminjajo s tipom zemljine (pesek in glina).

Če je vključena plastifikacija zemljine, MPiLe upošteva histerezno obnašanje v zvezi obtežba-pomiki. To pomeni drugačno obnašanje pri ponovni obremenitvi.

8.2 Modeli interakcije zemljine

V MPiLu interakcija med piloti ni omejena na interakcijo po plošči, ampak upošteva tridimenzionalno interakcijo med piloti po zemljini. Vsi ti modeli interakcije temeljijo na linearni elastičnosti. Kombinirajo pa se lahko z zgoraj omenjenimi nelinearnimi zvezami med piloti in zemljino. S tem dobimo večjo natančnost rezultatov.

8.2.1 Model Poulosa

Predpostavi homogeno elastično zemljino in vertikalne pilote. Povzroči elastično interakcijo med vsemi piloti na nivoju glave pilota.

8.2.2 Model Plasti – Poulos

Vpelje nelinearno obnašanje v Poulosov model, kar pomeni zmanjšanje interakcijskih vplivov pri večji obtežbi.

8.2.3 Model z interakcijo plošče in zemljine (Cap soil interaction)

Temelji na Mindlinovi teoriji. Povzroči interakcijo po celotni dolžini pilota, ki predpostavlja homogena elastična tla z opcijo nagnjenih pilotov. Uporablja nelinearne horizontalne, vertikalne vzmeti ter vzmeti pod konico za togost zemljine in pilotov ter plastifikacijo.

8.2.4 Model z inter. plošče ter slojevitih tal (Cap layered soil interaction)

Uporablja metodo končnih elementov za analizo interakcije med piloti. Vsebuje razširitev Mindlinovega modela za upoštevanje interakcije v slojevitom elastičnem polprostoru.

8.3 Računski modeli in njihove prednosti

8.3.1 Model Poulosa

Enostaven elastičen model, ki ga lahko uporabimo za hitro analizo zelo velikih skupin pilotov. Uporablja Poulosovo teorijo interakcije glava pilota – zemljina – glava pilota.

8.3.2 Model Plasti – Poulos

Je razširitev Poulosovega modela. Potrebuje več vhodnih podatkov, da generira pravilne nelinearne vzmeti zemljine. Te uporablja za določitev nelinearnega obnašanja zveze obtežba-pomik glave pilota. Glavna prednost je, da modelira zmanjšanje interakcijskih vplivov pri velikih obtežbah. To lahko stori za velike skupine pilotov. Zaradi nelinearnosti zahteva daljši računski čas kot Poulosov model.

8.3.3 Model Cap

To je robusten in hiter model. Predstavlja klasično analizo pilotov, ki temeljijo na p-y, t-z krivuljah in na krivulji nosilnosti pod konico. Ne upošteva pa interakcije pilot-zemljina-pilot. Modelirana pa je interakcija med piloti preko plošče. Za določitev bočnih premikov zemljine in določitev negativnega trenja dovoljuje v naprej predpisane premike zemljine.

8.3.4 Model z interakcijo plošče in zemljine (Cap soil interaction)

Je razširitev modela Cap in vsebuje bolj sofisticiran model interakcije pilot-zemljina-pilot kot pa Poulosov in Plasti-Poulosov model. Ta model ni tako hiter kot prej omenjena modela. Omogoča nam uporabo površinskih obtežb. Poleg tega pa upošteva interakcijske vplive pravokotno na glavno obtežbo.

8.3.5 Model z interakcijo plošče ter slojevitih tal

Je močan računski model, ki temelji na metodi končnih elementov. Na žalost pa ta model občasno javlja nestabilnosti, zato tega modela trenutno ni v komercialni rabi programa MPile dokler se tega ne odpravi.

8.3.6 Dinamični model (Dynamic)

Namenjen je analizi trka ladje v ploščo.

8.4 Opcije v različnih modelih

Preglednica 25: Lastnosti računskih modelov v MPilu

Model	Plastifikacija zemljine	Slojevita tla	Pilot-zemljina-pilot interakcija	Dinamika	Površinska obtežba	Nagnjeni piloti	Maksimalno število pilotov
Model Poulosa	Ne	Ne	Da (2 sloja)	Ne	Ne	Ne	200
Model Plasti-Poulos	Da	Da	Da (2 sloja)	Ne	Ne	Ne	200
Model Cap	Da	Da	Ne	Ne	Ne	Da	≈75
Model z interakcijo plošče in zemljine	Da	Da	Da (1 sloj)	Ne	Da	Da	≈25
Model z interakcijo plošče ter slojevitih tal	Da	Da	Da (slojevit)	Ne	Ne	Da	≈25
Dinamični model	Da	Da	Ne	Da	Ne	Da	≈75

8.5 Kdaj uporabiti posamezen model

Statična obtežba

V primeru statične obtežbe lahko uporabimo vse modele razen dinamičnega. Izbira temelji na razdalji med piloti:

- Za analizo enega pilota ali skupine pilotov z velikimi razdaljami (večjimi od 10 do 12D v smeri pravokotno na obtežbo in večjimi od 4 do 6D v smeri obtežbe) je priporočljiv model Cap, ker ne upošteva interakcije.
- Za skupino pilotov z majhnimi medsebojnimi razdaljami (manjšimi od 6 do 8D v smeri pravokotno na obtežbo in večjimi od 3 do 4D v smeri obtežbe) uporabimo enega od sledečih modelov, odvisno od zelene natančnosti:
 - Model Poulosa, za prvo analizo, ko imamo na razpolago le nekaj podatkov, ko imamo majhno obtežbo in popolnoma v elastičnem območju
 - Model Plasti – Poulos, za bolj natančno analizo v primerjavi s Poulosovim modelom. V poštev pride, ko večja vsiljena obtežba začne kazati nelinearne učinke in možno porušitev pilotov.
 - Model z interakcijo plošče in zemljine, za natančnejšo analizo od zgoraj navedenih modelov. Uporabimo lahko različne pilote znotraj interakcije. Uporabimo ga, ko želimo določiti sile po dolžini pilota.
 - Model z interakcijo plošče ter slojevitih tal, uporabimo, ko želimo določiti togost posameznega sloja, ki sodeluje v interakciji.

8.6 Metode analize v MPilu

8.6.1 Model Cap

V tem modelu so piloti povezani s ploščo, vendar ni interakcije pilot-zemljina-pilot. Upošteva se samo odpornost zemljine za vsak pilot posebej. Interakcijo imamo samo med glavami pilotov. Interakcija pilot-zemljina je elasto-plastična.

8.6.2 Model Poulosa

Izvede se popolnoma elastična analiza z interakcijo pilot-zemljina-pilot.

Poulosov model je najpreprostejše orodje v programu, ker vsebuje popolnoma elastično analizo. Zemljino upošteva kot homogen elastičen pol prostor. Interakcijski faktorji med glavami pilotov so izpeljani iz preprostih analitičnih formul. Upošteva interakcijo samo v smeri obremenjevanja. Se pravi, da je interakcija pravokotno na smer obremenjevanja enaka nič.

V tem modelu se upošteva, da so lastnosti tal po celotni dolžini pilota enake. Rezultati, ki jih da analiza, pa veljajo samo za vrh pilota.

Uporabnik mora definirati Youngove module (E) in Poissonov količnik (ν), ki so ustrezni za obravnavana tla.

8.6.3 Model Plasti – Poulos

Temu modelu bom posvetil posebno pozornost, saj sem ga uporabljal za računanje svojih primerov.

8.6.3.1 Predstavitev

To je pogosto uporabljena analiza za določanje učinkovitosti skupine pilotov in porazdelitve obtežbe. V tej metodi je interakcija pilot-zemljina-pilot popolnoma elastična.

Za male skupine pilotov in nizko obtežbo daje metoda sprejemljive rezultate. V primeru, ko je obtežba zelo velika, je izračunana interakcija prevelika. Rezultat tega je slaba učinkovitost skupine pilotov.

Model vsebuje vpliv plastifikacije s pomočjo katerega dobi realnejše rezultate za skupino pilotov.

8.6.3.2 Plastifikacija in obnašanje pilota

Prvotna elastična togost tal je zelo visoka. Z upoštevanjem plastifikacije se togost znižuje z večanjem obtežbe.

Predstavitev plastifikacije v Poulosovem modelu

Faktorje plastifikacije lahko določimo za vsako obtežbo iz krivulje obtežba-pomik. Faktor določa koliko večji je pomik pilota, v primerjavi z elastičnim pomikom. Zmanjša elastično togost tal.

V Poulosovem modelu je matrika interakcije skupine pilotov oblikovana tako, da vsebuje tako komponente togosti posameznega pilota, kot komponente, ki opisujejo vpliv (elastične) interakcije.

Za običajne razmake med piloti in zniževanje obremenitve se območje plastifikacije tal nahaja ob pilotu in tako ne vpliva na interakcijo med piloti. Vpliv plastifikacije lahko opišemo kot zniževanje togostne komponente posameznega pilota (odvisno od deleža obtežbe, ki pade na

pilot). Matrika, ki opisuje interakcijo pilot-zemljina-pilot, ostane v tem primeru nespremenjena.

V primeru zelo majhnega razmaka med piloti in veliki obremenitvi pilota, območja plastifikacije presegajo območja enega pilota in tako vplivajo eden na drugega. Pristop, ki ga obravnavamo, v tem slučaju ni primeren.

8.6.3.3 Implementacija v MPilu

Ker je v analizo vključena plastifikacija, moramo podati dodatne podatke o zemljini.

V modelu Plasti – Poulos ne potrebujemo samo interakcijskega profila (model Poulosa), ampak tudi posamezne sloje zemljine in prereze.

Model Plasti – Poulosa vsebuje dodatno opcijo *Faktorji plastifikacije*. Te MPile izračuna avtomatično za izbran tip pilota. Faktorji plastifikacije se uporabijo v zaključni fazi analize. Na začetku se izvede konvencionalna Poulosova analiza. Z rezultirajočo silo v pilotu, se določi faktor plastifikacije za vsak pilot posebej. Togostna matrika je prilagojena in sedaj upošteva faktorje plastifikacije. Sedaj se izvede nova analiza. Razlika je vidna v drugačni porazdelitvi obtežbe.

Določiti maramo tudi natančnost analize. V iteracijskem postopku računa se analiza ustavi, ko je dosežena ta natančnost.

8.6.4 Model z interakcijo plošče in zemljine (Cap soil interaction)

Temelji na Mihdlinovi elastični rešitvi za napetosti in pomike v homogenem elastičnem polprostoru, ki jih povzroči točkovna sila.

Ta metoda je temelj Poulosovega modela in bi zato morala dati podobne rezultate. Znotraj nje pa lahko uporabimo elemente kot je plastifikacija, interakcija med piloti različnih dimenzij. Uporabimo lahko tudi pilote v naklonu. Vključena je tudi interakcija, ki deluje normalno na obtežbo.

Metoda upošteva interakcijo med vertikalnimi in nagnjenimi piloti. Interakcija je omejena na samo en sloj zemljine.

8.7 Primerjava rezultatov metod

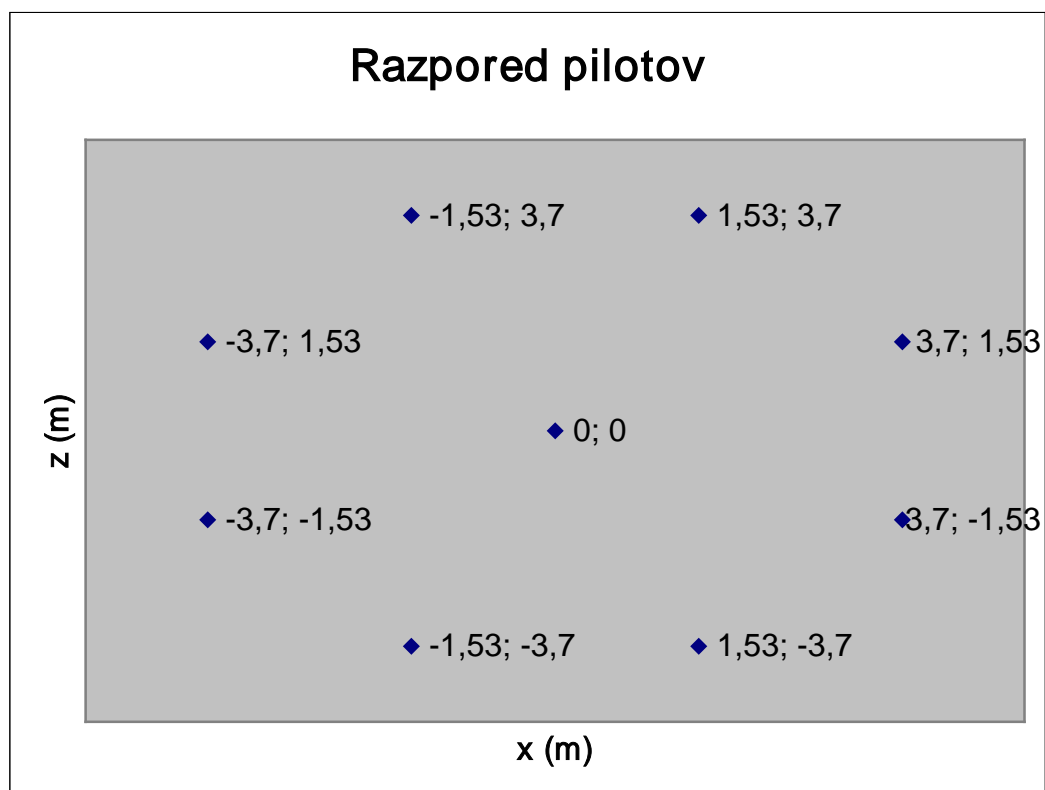
Rezultate primerjam na poljubno izbranem primeru. Tla so sestavljena enako kot v primeru rezervoarjev za gorivo v Luki koper. Uporabljeni so jekleni piloti premera 0,8125 m, s steno debeline 0,0125 m dolžine 30 m.

Preglednica 26: Lastnosti sestave tal na lokaciji Rezervoarja za gorivo in skladišča avto pločevine (navedene so karakteristike slojev, ki jih potrebujemo v MPilu):

Sloj	Umetni nasip	Reful	Q2g	Q1p+g	Q1p	Q1g
Globina sloja (m)	0	2,8	11,4	29,5	33,9	40,4
Specifična teža na vrhu (kN/m ³)	20,0	17,0	15,8	20,0	20,0	20,9
Specifična teža na dnu (kN/m ³)	21,0	18,5	18,1	22,0	22,0	20,9
φ na vrhu (°)	35	-	-	28	28	-
φ na dnu (°)	35	-	-	40	40	-
C_u na vrhu (kPa)	-	10	20	-	-	107
C_u na dnu (kPa)	-	25	55	-	-	107
Odpor pod konico q_c na vrhu (kN/m ²)	50	-	-	1800	1800	-
Odpor pod konico q_c na dnu (kN/m ²)	50	-	-	3000	3000	-
K_0	0,50	-	-	0,50	0,50	-
dz pri 100% (m)	0,0025	0,008	0,008	0,0025	0,0025	0,008
Trenje med pilotom in zemljino na vrhu (°)	20	-	-	20	20	-
Trenje med pilotom in zemljino na dnu (°)	20	-	-	20	20	-
J	-	0,25	0,25	-	-	0,25
ε_{50}	-	0,02	0,01			0,005
α	-	0,74	0,82	-	-	-

*Voda se nahaja na globini 4,15 m

Za poljuben primer izberem okroglo ploščo premera 8 m, ki je podprta z devetimi piloti.



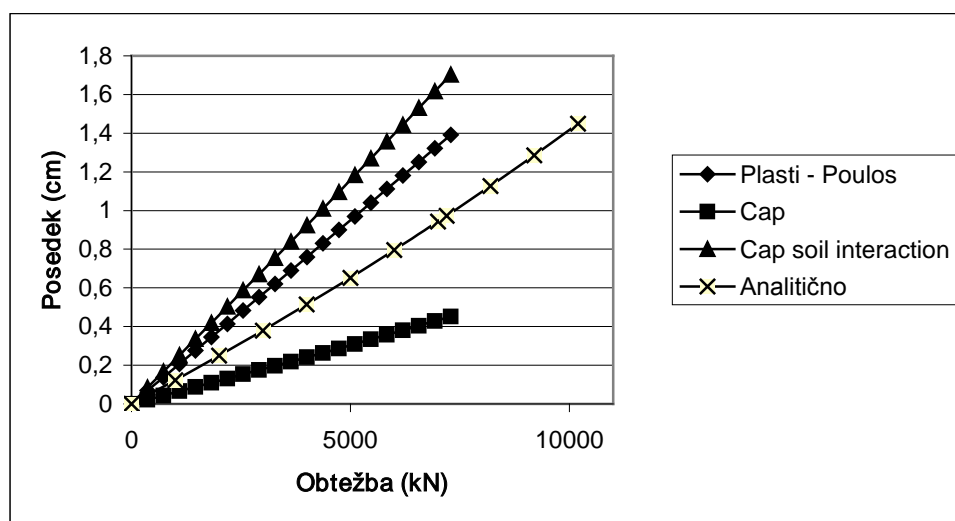
Grafikon 17: Prikaz položaja pilotov za poljuben primer v koordinatnem sistemu x, y

Preglednica 27: Računski posedki in osne sile v pilotih za poljuben primer plošče podprte z devetimi piloti

Model	Posedk na vrhu (cm)	Osna sila v srednjem pilotu (kN)	Osna sila v krajnem pilotu (kN)
Model Poulosa	1,381	198,6	886,2
Model Plasti - Poulos	1,392	256,1	879
Model Cap	0,451	809,8	809,8
Model z interakcijo plošče in zemljine	1,703	693,1	824,4
Analitično	0,97	803,3	803,3

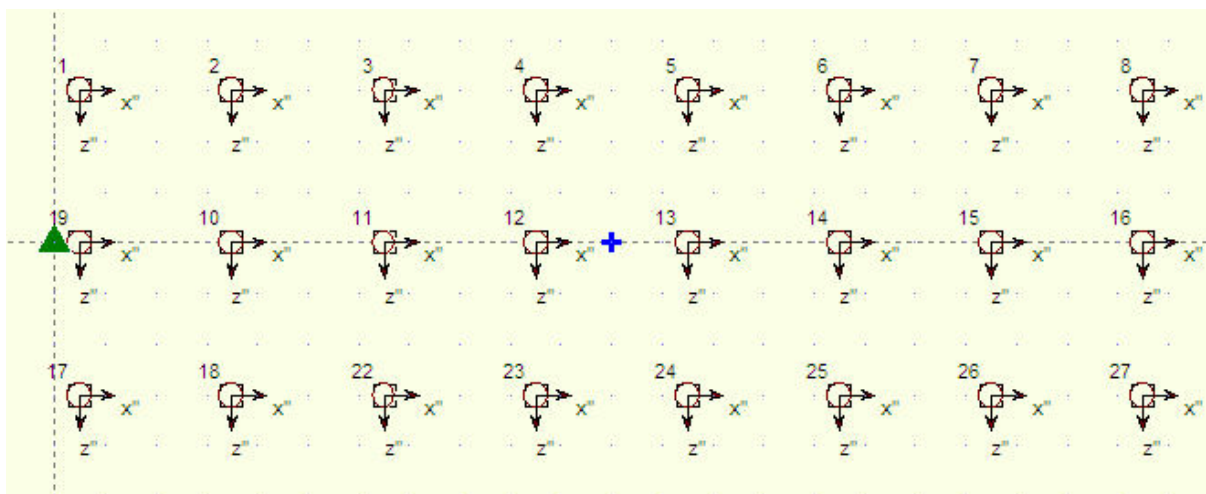
Rezultati so naj natančnejši v primeru modela Plasti – Poulos in modela z interakcijo plošče in zemljine. Model Poulosa ne upošteva plastifikacije zemljine zato je analiza popolnoma elastična in posledično rezultati osnih sil v pilotih previsoki, posedki pa prenizki. Model Plasti – Poulos upošteva plastifikacijo zemljine, posledično so posedki nekoliko večji kot v primeru modela Poulosa. Potek napetosti po plošči se bolj približa realnemu, posledično je tudi osna sila v centralnem pilotu večja. Model cap ne upošteva interakcije pilot-zemljina-pilot, zato so osne sile v vseh pilotih enake in posedki prenizki. Model z interakcijo plošče in zemljine prikaže najbolj realen potek napetosti pod ploščo in posledično osne sile v pilotih. Posedki so nekoliko previsoki, saj v modelu interakcije upošteva samo en sloj zemljine. Ta sloj ima slabše lastnosti, kot so v dejanskem stanju. Zaradi tega dobimo za posedek točnejše rezultate s Plasti - Poulosovim modelom, ki upošteva še en sloj pod konico pilota.

Razlog, da sem se odločil za to, da bom različne parametre, ki vplivajo na obnašanje pilotnega temeljenja preverjal s Plasti – Poulosovim modelom, je v tem, da ta omogoča analizo veliko večje skupine pilotov kot vsi ostali modeli.



Grafikon 17: Naraščanje posedka z večanjem obtežbe pri različnih modelih analize

9 RAČUNSKI PRIMER – PARAMETRIČNA ŠTUDIJA



Slika 32: Primer skupine pilotov iz programa MPile

V tem poglavju prikažemo, kako lahko s spreminjanjem lastnosti temeljenja vplivamo na poseke in na maksimalno osno silo v pilotu. Te lastnosti so premer pilota, razdalja med piloti (manjšanje števila pilotov) pri enaki površini in povečevanje razdalje med piloti pri enakem številu pilotov.

Parametrično študijo izvedemo na primeru temeljne plošče skladišča podprte s piloti. Plošča je dimenzij 194 m x 60 m. Ker program MPile ne omogoča uporabe več kot 502 pilota, moram najti primeren pomanjšan model s pomočjo katerega lahko ocenim vrednosti za dejanski posedek.

Poleg omejitve v številu pilotov, program upošteva ploščo kot absolutno togo. Posledica tega so previsoke osne sile v robnih pilotih in prenizke na sredini plošče. Posedki so konstantni po površini plošče, kar v naravi ne velja, saj pri podajni plošči dobimo na sredini le te večje posedke kot na robu. Prav tako so napetosti enakomerneje razporejene po plošči, kot v primeru toge plošče, kjer se zelo zvišajo na robovih plošče.

Model, ki ga uporabim za analizo, se imenuje Plasti – Poulosov. Razlog za uporabo tega modela je možnost uporabe večjega števila pilotov, saj pri ostalih modelih uporaba več kot 30 pilotov predstavlja zelo dolgotrajno analizo. Ta model upošteva plastifikacijo zemljine in interakcijo med piloti. Za račun potrebuje Youngov elastični modul in Poissonovo število

sloja ob pilotu, ter Youngov elastični modul sloja pod konico pilota. Youngov elastični modul ob pilotu izračuna sam iz podatkov o slojih tal. Youngov elastični modul pod konico pilota pa določim sam.

Blizu lokacije skladišča so bili zgrajeni rezervoarji za gorivo. Na podlagi rezultatov meritev posedkov rezervoarjev določim model tal, ki pri enaki obremenitvi pokaže posedke enake izmerjenim. Te lastnosti tal uporabim za analizo posedkov skladišča.

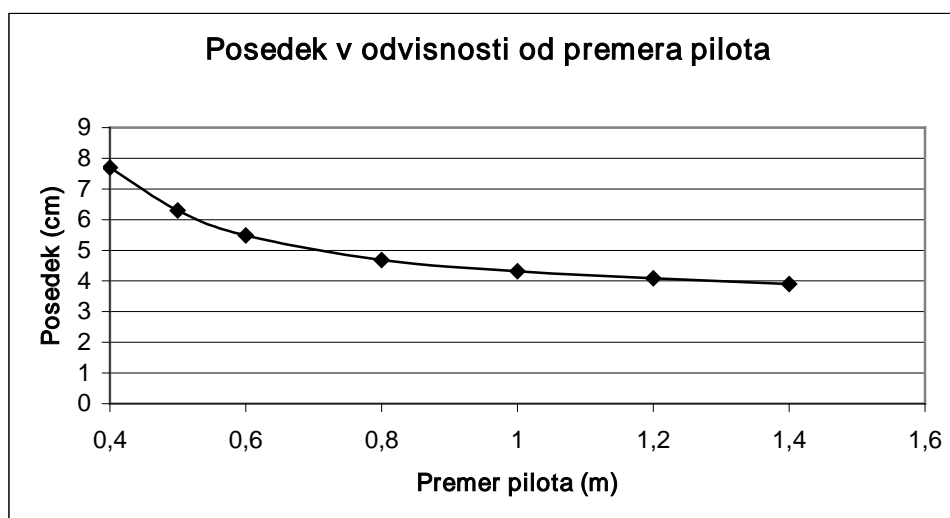
9.1 Posedki v odvisnosti od prereza pilota

Vzamemo ploščo dimenzij 25 m x 76 m. Stranice te plošče so v enakem razmerju kot pri dejanski plošči, le pomanjšane. Piloti so medsebojno oddaljeni 3m. Absolutno toga plošča ima površino 1900 m² in je obremenjena z obtežno silo 228 MN.

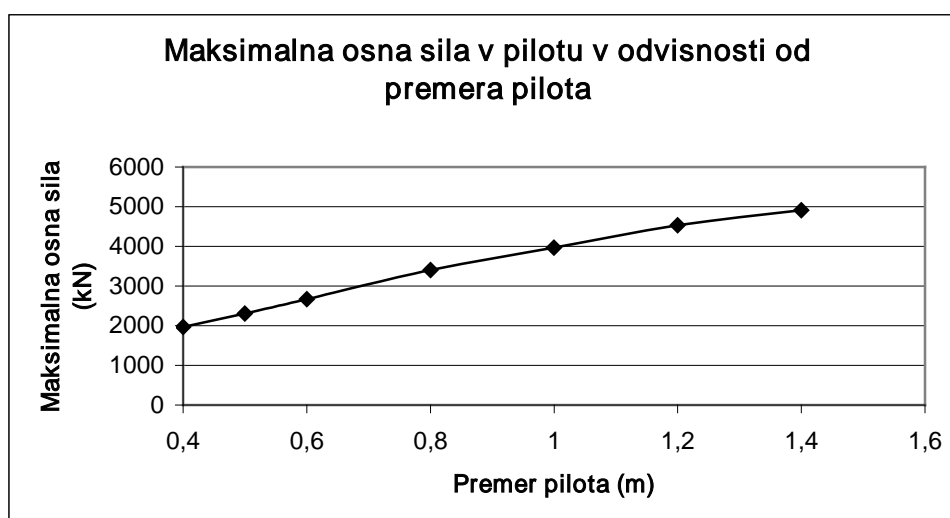
Cilj te študije je ugotoviti, kako se spreminja maksimalna osna sila v pilotu in posedek v odvisnosti od premera pilota.

Preglednica 28: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih v odvisnosti od premera pilota

D (cm)	Posedek (cm)	Max. osna sila (kN)
40	7,698	1967,7
50	6,298	2302,8
60	5,488	2667,7
80	4,684	3403,1
100	4,315	3970,8
120	4,083	4532,2
140	3,900	4911,9



Grafikon 19: Računski posedki v odvisnosti od premera pilota



Grafikon 20: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od premera pilota

Razlog za neenakomerno manjšanje posedkov pri povečevanju prereza pilota je v interakciji pilot – zemljina – pilot. Večji kot je premer pilota pri enaki razdalji med piloti, manjši je sloj zemljine med piloti. Zaradi manjšega sloja zemljine ima pilot manjši odpor po plašču, kljub temu, da je površina plašča večja. Posledično se posedki pri povečevanju premera pilota manjšajo počasneje.

Maksimalna osna sila v robnem pilotu se povečuje z večanjem premera pilota. Razlog za to je večja nosilnost debelejšega pilota.

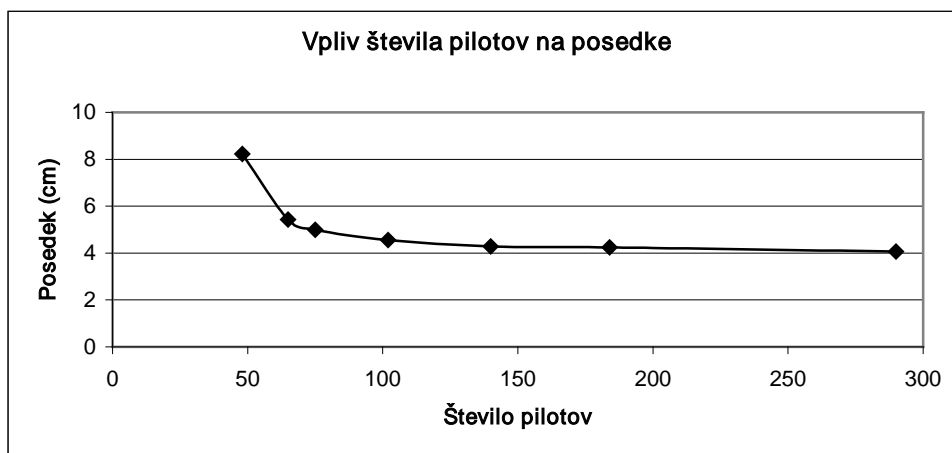
9.2 Vpliv števila pilotov pri enaki površini in obtežbi

Plošča ima stranici v enakem razmerju kot skladišče. Stranici merita 19 m x 58 m kar pomeni površino 1102 m². Obtežna sila znaša 132240 kN, kar pomeni 120 kPa površinske obtežbe.

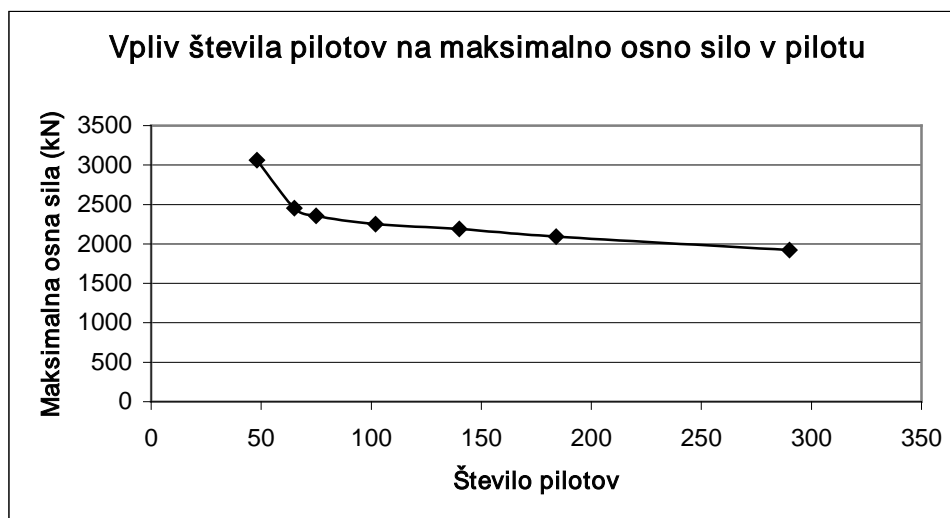
Preverim, kako vpliva manjšanje števila pilotov (povečuje se razdalja med piloti) pri konstantni obtežbi in površini plošče na posedke in osne sile v pilotih.

Preglednica 29: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih v odvisnosti števila pilotov (večja razdalja med piloti) pri konstantni površini plošče

Razdalja med piloti (m)	Število pilotov	Maks. osna sila (kN)	Posedek (cm)
2,0	290	1920,7	4,064
2,5	184	2092,3	4,237
3,0	140	2188,5	4,283
3,5	102	2250,4	4,551
4,0	75	2356,2	4,994
4,5	65	2453,9	5,423
5,0	48	3063,6	8,229



Grafikon 21: Računski posedki v pilotih v odvisnosti števila pilotov (večja razdalja med piloti) pri konstantni površini plošče



Grafikon 22: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od števila pilotov (večja razdalja med piloti) pri konstantni površini plošče

Iz zgornjih diagramov vidimo, da ob brezglavem povečevanju števila pilotov ne dosežemo veliko. Posedki se drastično zmanjšujejo ob povečevanju pilotov le do nekega števila pilotov, ko se trend spremeni. Ob drastičnem povečanju števila pilotov ne dosežemo sorazmerno manjših posedkov. Iz tega lahko zaključimo, da je pri projektiranju potrebno posebno pozornost posvetiti določitvi števila pilotov, da je temeljna konstrukcija bolj ekonomična.

Razlog za tako majhno zmanjševanje posedkov ob velikem povečanju števila pilotov leži v medsebojni razdalji. S povečevanjem števila se razdalja med piloti manjša, posledično se zmanjša plast zemljine med piloti. Ta zemljina predstavlja odpor, s katerim zmanjšujemo posedke. Vsak pilot ima neko vplivno okolico, na katero vpliva. Pri zmanjševanju razdalje med piloti pride do preseka v okolici dveh pilotov, pravimo da se zgodi interakcija med piloti. Posledično se zaradi delovanja več pilotov na sosednjo zemljino povečajo posedki.

Zmanjševanje maksimalne osne sile v pilotu ima podoben trend kot zmanjševanje posedkov ob povečevanju števila pilotov. Ob zmanjševanju števila pilotov se sila v pilotu povečuje, saj na posamezen pilot pade večji delež obtežbe. Ob povečevanju obremenitve, ki pade na posamezen pilot pride od plastifikacije zemljine. Zaradi tega se povečajo posedki in osne sile v pilotih.

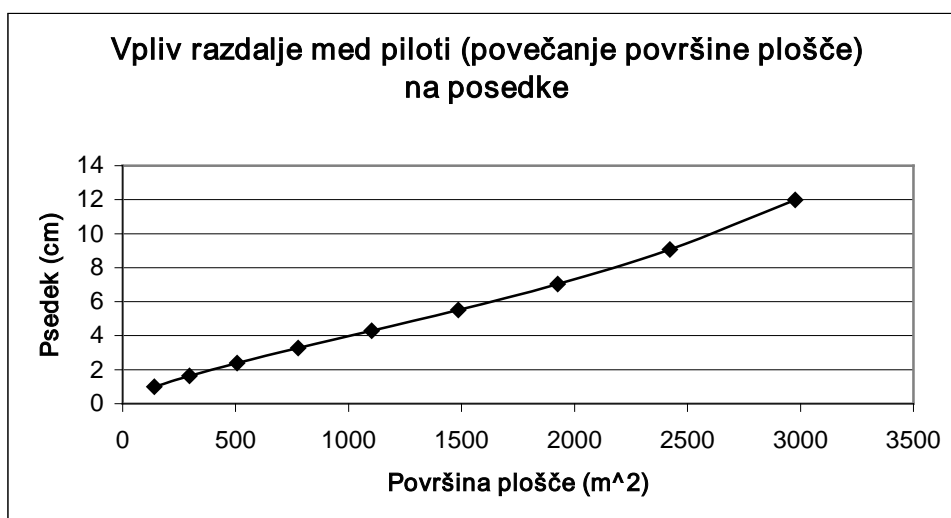
9.3 Vpliv razdalje med piloti ob konstantnem številu pilotov

Izberem ploščo, ki ima stranice v enakem razmerju, kot plošča skladišča, le krajše. Število pilotov je konstantno in sicer 140. Ob povečevanju razdalje med piloti se povečuje tudi površina plošče. Posledično se poveča obtežna sila pri konstantni površinski obtežbi 120 kPa. Piloti imajo raster 7 x 20.

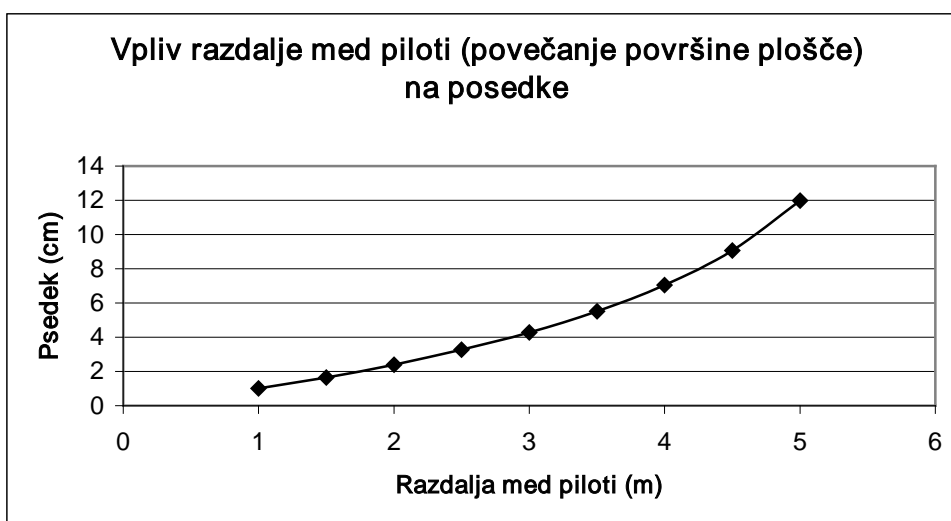
Cilj je ugotoviti kako povečevanje razdalje med piloti vpliva na posedke in osne sile med piloti.

Preglednica 30: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih v odvisnosti od površine plošče (večja razdalja med piloti) pri konstantnem številu pilotov

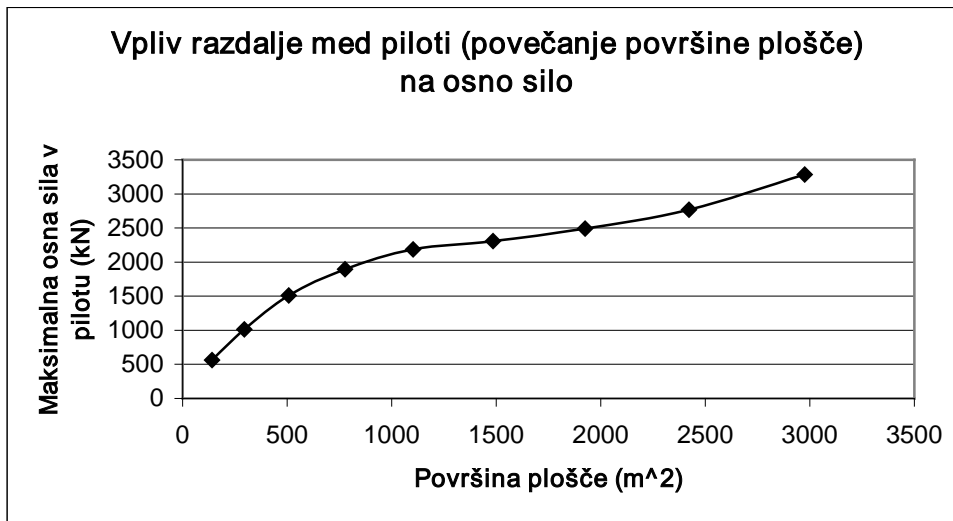
Dolžina ploče (m)	Širina plo. (m)	Površina (m ²)	Število pilotov	Razdalja med piloti (m)	V _{max} (kN)	Posedek (cm)
20	7	140	140	1,0	563,6	1,006
29,5	10	295	140	1,5	1015,6	1,645
39	13	507	140	2,0	1512,6	2,398
48,5	16	776	140	2,5	1897,2	3,267
58	19	1102	140	3,0	2188,5	4,283
67,5	22	1485	140	3,5	2309,7	5,512
77	25	1925	140	4,0	2492,6	7,047
86,5	28	2422	140	4,5	2768,4	9,068
96	31	2976	140	5,0	3285,7	11,984



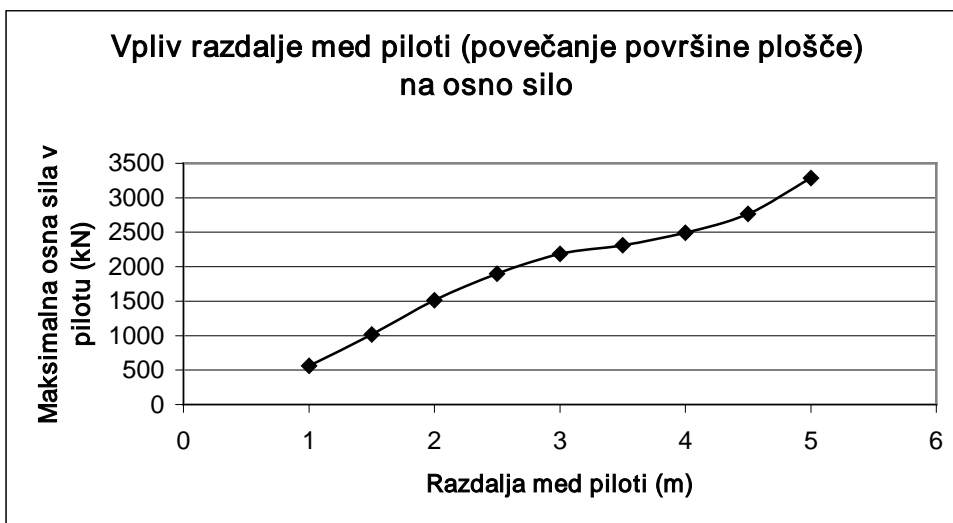
Grafikon 23: Računski posedki v odvisnosti od površine plošče (večja razdalja med piloti) pri konstantnem številu pilotov



Grafikon 24: Računski posedki v odvisnosti od razdalje med piloti pri konstantnem številu pilotov



Grafikon 25: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od površine plošče (večja razdalja med piloti) pri konstantnem številu pilotov



Grafikon 26: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od razdalje med piloti pri konstantnem številu pilotov

Trend naraščanja maksimalne osne sile na začetku pada, kasneje pa se ta trend obrne. Osnna sila v maksimalno obremenjenem pilotu na začetku strmo narašča s povečevanjem obtežbe in oddaljenosti od središča plošče. Kot že vemo, je robni pilot maksimalno obremenjen. Z večanjem obtežbe prihaja do plastifikacije zemljine ob in pod pilotom. V tem je razlog, da se trend povečevanja osne sile skoraj umiri. Ker pa se s povečevanjem osne sile povečuje

razdalja med piloti se vpliv plastifikacije zmanjša (ni plastificirana celotna zemljina) in se maksimalna sila v pilotu znova začne povečevati.

Posedki s povečevanjem obtežbe (povečuje se razdalja med piloti) naraščajo vse hitreje.

9.4 Razlika med kvadratno in pravokotno ploščo

Povečujem dimenzije kvadratne plošče in pravokotne. Razmak med piloti se ohranja pri vseh primerih in znaša 3 m. Povečuje se površina in s tem obtežna sila, sicer je površinska obtežba konstantna 120 kPa.

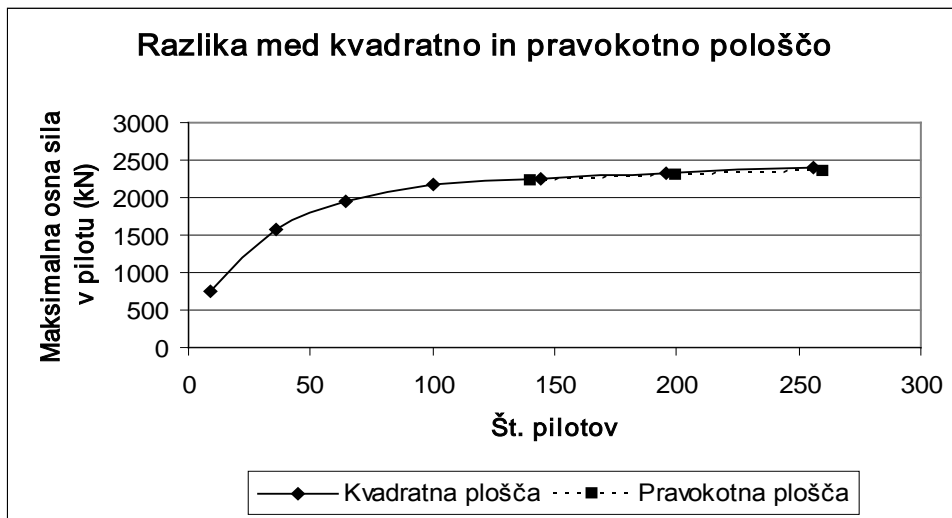
Pri pravokotni plošči povečujemo eno stranico plošče 28 m x 28 m, in opazujemo kaj se dogaja s posedki in osnimi silami.

Preglednica 31: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih pri kvadratnih ploščah različnih velikosti

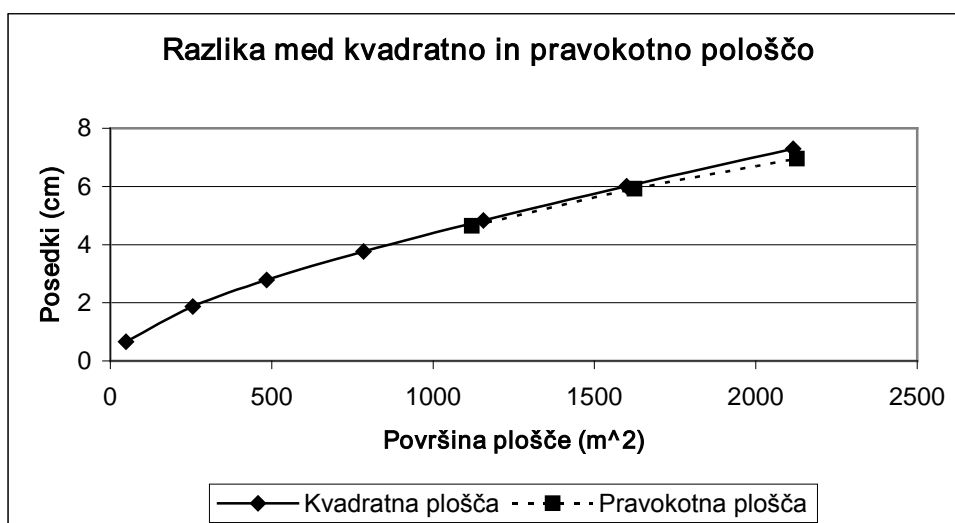
Piloti	Število pilotov	Dolžina plošče (m)	Širina plošče (m)	Površina plošče (m ²)	Obtežna sila (kN)	V _{max} (kN)	Posedek (cm)
3 x 3	9	7	7	49	5880	745,3	0,662
6 x 6	36	16	16	256	30720	1581,5	1,868
8 x 8	64	22	22	484	58080	1942,9	2,779
10 x 10	100	28	28	784	94080	2179,5	3,760
12 x 12	144	34	34	1156	138720	2251,0	4,828
14 x 14	196	40	40	1600	192000	2319,0	6,007
16 x 16	256	46	46	2116	253920	2390,1	7,299

Preglednica 32: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih pri pravokotnih ploščah različnih velikosti

Piloti	Število pilotov	Dolžina plošče (m)	Širina plošče (m)	Površina plošče (m ²)	Obtežna sila (kN)	V _{max} (kN)	Posedek (cm)
10 x 14	140	28	40	1120	134400	2231,0	4,639
10 x 20	200	28	58	1624	194880	2289,8	5,916
10 x 26	260	28	76	2128	255360	2344,7	6,959



Grafikon 27: Računski posedki v odvisnosti od števila pilotov pri kvadratni in pravokotni plošči



Grafikon 28: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od števila pilotov pri kvadratni in pravokotni plošči

Pri pravokotni plošči so posedki in maksimalna osna sila nekoliko nižji kot v primeru kvadratne plošče. Razlog za to lahko iščemo v večji oddaljenosti robnih pilotov pri pravokotni plošči. Zaradi večje medsebojne razdalje nimajo takšnega vpliva (interakcije) drug na drugega. Zaradi tega imamo malenkost nižje posedke. Enako velja za maksimalno osno silo, kljub temu, da bi pričakovali zaradi večje oddaljenosti od središča plošče večjo osno silo v pilotu, kot pri kvadratni plošči.

9.5 Plošča v realnem razmerju

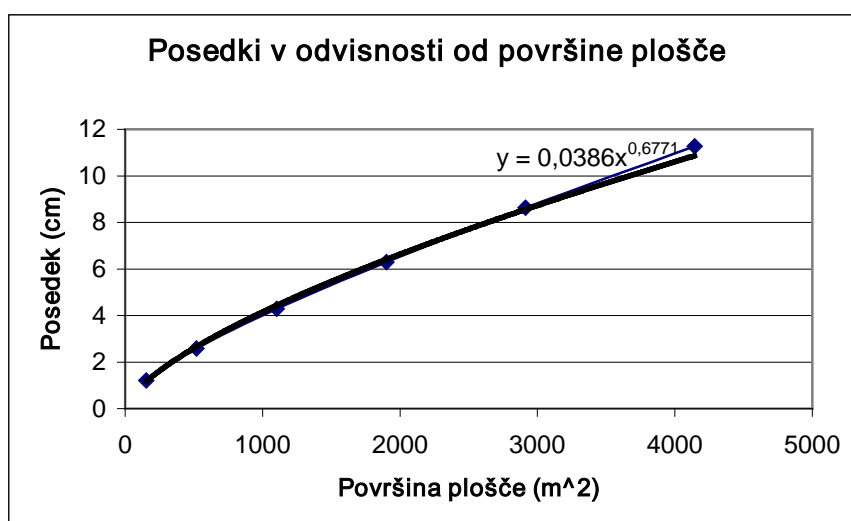
Obravnavamo plošče, ki imajo stranice v enakem razmerju. Razmak med piloti je v vseh primerih 3 m.

Ta analiza je pomembna zato, ker v programu ne moremo modelirati večjega števila pilotov od 500, a pri dejanskem modelu včasih potrebujemo več pilotov.

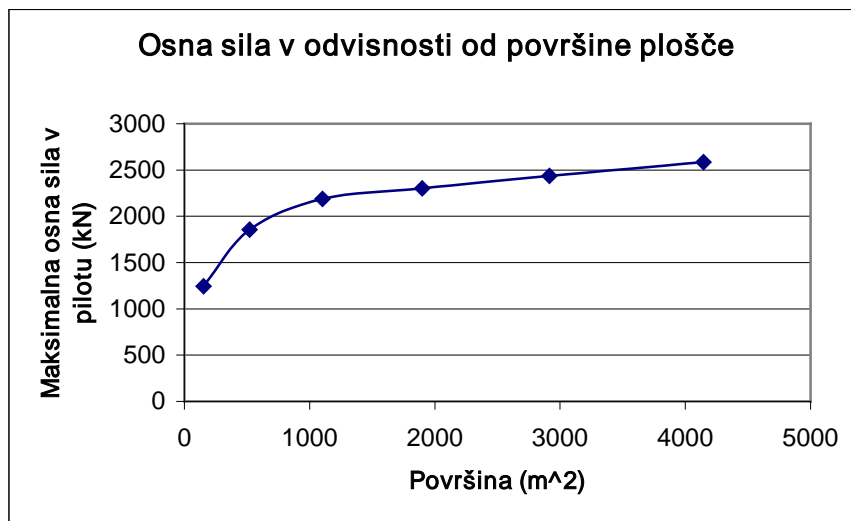
Upoštevamo trend posedkov in poskušamo ugotoviti kakšen je računski posedek za ploščo dejanskih dimenzij.

Preglednica 33: Računski posedki in maksimalne osne sile v pilotih pri plošči s stranicami v dejanskem razmerju

Raster pilotov	Število pilotov	Dolžina plošče (m)	Širina plošče (m)	L/B	Površina plošče (m ²)	Obtežna sila (kN)	Vmax (kN)	Posedek (cm)
3 x 7	21	7	22	3,14	154	18480	1245,2	1,211
5 x 14	70	13	40	3,07	520	62400	1855,9	2,587
7 x 20	140	19	58	3,05	1102	132240	2188,5	4,283
9 x 26	234	25	76	3,04	1900	228000	2302,9	6,298
11 x 32	352	31	94	3,03	2914	349680	2435,6	8,631
13 x 38	494	37	112	3,03	4144	597280	2585,2	11,271



Grafikon 29: Računski posedki v odvisnosti od površine plošče z dolžinami stranic v dejanskem razmerju. Trendu posedkov je dodana trendna črta z enačbo



Grafikon 30: Računska maksimalna osna sila v pilotu v odvisnosti od površine ploče z dolžinami stranic v dejanskem razmerju

S povečevanjem površine plošče (obtežne sile) se osna sila v maksimalno obremenjenem pilotu povečuje. Trend hitrosti povečevanja se zmanjša, ko se zemljina ob pilotu začne plastificirati.

Posedki s povečevanjem površin in s tem obtežne sile konvergirajo k neki vrednosti. Dejansko vrednost računskega posedka za konkreten primer določimo s pomočjo trendne črte. Če za površino vstavim vrednost površine skladišča, dobim posedek 22 cm.

10 ZAKLJUČEK

Namen diplomske naloge je bil podrobneje spoznati lastnosti in obnašanje plošč, podprtih s piloti.

V nalogi so predstavljene zahteve in priporočila standarda Evrokod 7 s poudarkom na poglavju o globokem temeljenju. Če hočemo projektirati temeljenje na pilotih, moramo poznati tudi osnove geotehničnega projektiranja.

Pri geotehnik in geotehničnem projektiranju igrajo pomembno vlogo izkušnje. Zato sem najprej analiziral obnašanje že obstoječih objektov, temeljenih na ploščah podprtih s piloti. S tem sem dobil boljšo predstavo o kritičnih vrednostih posedkov, diferenčnih posedkov ter notranjih sil. Pomembna je tudi delitev obtežbe med ploščo in piloti. Na že izvedenih objektih so bile izmerjene vrednosti deleža obtežbe, ki ga nosijo piloti in plošča, v različnih obdobjih gradnje objekta.

V diplomski nalogi sem želel predstaviti analitični postopek, po katerem lahko računamo različne količine v ploščah podprtih s piloti. Ta postopek spremljajo tudi navodila in nasveti pri projektiranju. Navedene so ugodne in neugodne razmere za takšno temeljenje.

Poleg analitične metod na kratko opišem še nekatere bolj natančne metode računalniške analize.

Posebno poglavje je namenjeno teoriji, ki jo potrebujemo za račun temeljev po analitičnem postopku. Predstavljena je Bromsova metoda določanja horizontalne nosilnosti pilotov. Za določitev posedkov temeljenja potrebujemo togosti temeljne plošče in skupine pilotov. Osno togost temeljne plošče ocenimo po metodi Poulosa in Davisa za togo okroglo ploščo na sloju končne debeline. Rešitve za togost posameznega pilota sta podala Randolph in Wroth. Iz vrednosti za posamezen pilot lahko izračunamo tudi togost skupine pilotov. Predstavljena je tudi metoda grobe ocene diferenčnih posedkov, ki jih jo predlagal Randolph. V tem teoretičnem poglavju so opisane tudi metode za določitev nosilnost pilota v različnih pogojih in tipih tal.

Izračunan je tudi izmišljen primer temeljenja po analitičnem postopku. V računu ocenimo vertikalne nosilnosti plošče in pilotov. Sledi določitev momentne in horizontalne nosilnosti. Nato izračunamo osno togost plošče in skupine pilotov. Iz teh vrednosti lahko izračunamo togost celotnega temeljenja in delež obtežbe, ki pade na pilote. Izračunamo krivuljo obtežba-

posedek za ta primer, kjer se vidi kako narašča posedek pri povečevanju obtežbe. Izračunamo še konsolidacijske posedke in ocenimo diferenčne posedke. Na koncu pa izračunamo še sile v pilotih. Pri računu sil v pilotih privzamemo, da je plošča absolutno toga. Posedki so izračunani tudi s programom MPile in so primerljivih vrednost s posedki, izračunanimi analitično.

Na tem izmišljenem primeru pokažemo tudi kakšna je razlika med bolj konvencionalnim pristopom k projektiranju, kjer celotno obtežbo prevzamejo piloti, in temeljenjem na plošči podprti s piloti. V primeru, da bi celotno obtežbo prevzeli piloti, bi potrebovali vsaj 26 pilotov za zadostitev minimalne globalne varnosti. V primeru, ko pa temeljimo na plošči podprti s piloti pa zadostimo temu kriteriju z 9 piloti. Iz tega sklepamo, da imamo pri bolj konvencionalnem pristopu veliko zalogo varnosti v plošči, ki je ne upoštevamo. Temeljenje na plošči podpreti s piloti je veliko bolj ekonomično.

Po enaki metodi je izveden račun rezervoarja za skladiščenje goriva. Tukaj gre za dejanski primer objekta.

Dobljene rezultate iz analitične metode sem preveril s pomočjo računalniškega programa MPile. Posebno poglavje je namenjeno opisu delovanja programa in razlogom za uporabo metod, ki jih vsebuje.

V zadnjem poglavju smo s programom MPile preverili vplivnost določenih lastnosti pilotov na posedke in osne sile. Kljub povečevanju prereza pilota se posedki umirijo pri neki vrednosti in se ne zmanjšujejo več. Če imamo konstantno obtežbo, manjšamo pa število pilotov, s čimer se povečuje razdalja med piloti, posedki in osne sile strmo padajo do neke vrednosti, kjer se umirijo. Povečevali smo tudi razdaljo med piloti in s tem tudi obtežbo pri konstantnem številu pilotov. Posedki skoraj enakomerno naraščajo s povečevanjem površine (obtežbe), kar pa ne moremo trditi za maksimalno osno silo. Prikazana je tudi razlika med kvadratno in pravokotno ploščo.

Na koncu smo skušali določiti posedek za skladišče v Luki Koper. Ker program ne omogoča uporabe tako velikega števila pilotov kot je za objekt predvideno, smo za račun uporabili manjšo ploščo z enakim razmerjem dolžin stranic in razdaljami med piloti. Za različne površine plošč dobimo vrednosti posedkov. Na koncu smo iz trendne črte ekstrapolirali posedek za dejansko površino skladišča.

VIRI

Bowles, J. E. 1996. *Foundation Analysis and Design*. New York, McGraw-Hill: 1175 str.

Broms, B. B. 1964. Lateral resistance of piles in cohesive soils. *J. Soil Mech. Foundn Div., ASCE*. 90, 2: 27 – 63.

Day, R. W. 1999. *Geotechnical and Foundation Engineering: Design and Construction*. New York, McGraw-Hill Professional: 750 str.

Gunaratne, M. 2006. *The foundation engineering handbook*. Boca Raton, CRC/Taylor & Francis: 608 str.

Hemsley, J. A. 2000. *Design applications of raft foundations*. London, Thomas Telford: 626 str.

Logar, J. *Zemeljska dela*. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 222 str.

Majes, B. *Mehanika tal*. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 248 str.

Majes, B. *Fundiranje*. Skripta. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 466 str.

Poulos, H. G., Davis, E. H. 1980. *Pile foundation analysis and design*. New York, John Wiley: 408 str.

Poulos, H. G., Davis, E. H. 1974. *Elastic solutions for soil and rock mechanics*. New York, John Wiley: 411 str.

Randolph, M. F. 1994. Design methods for pile groups and piled rafts. Int. Conf. Soil. Mech. Foundn Engng. New Delhi, 5: 61 – 82.

Randolph, M. F., Wroth, C. P. 1978. Analysis of deformation of vertically loaded piles. J. Geotech. Engineering Div., ASCE, 104,12:1465 – 1488.

Ramiah, B. K., Chikkanagappa, L. S. 1986. Soil Mechanics and foundation engineering. Rotterdam, A. A. Balkema: 672 str.

Smolczyk, U. 2002. Geotechnical engineering handbook. Vol. 1. Berlin, Ernst & Sohn: 787 str.

Smolczyk, U. 2003. Geotechnical engineering handbook. Vol. 2. Berlin, Ernst & Sohn: 679 str.

Smolczyk, U. 2003. Geotechnical engineering handbook. Vol. 3. Berlin, Ernst & Sohn: 679 str.

EVROKOD 7, Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila. SIST EN 1997 – 1, 2005.