

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



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

UNIVERZITETNI ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
PROMETNA SMER

Kandidat:

MIHA ERBEŽNIK

**PRIMERJAVA STATIČNEGA IN DINAMIČNEGA
OBREMENILNEGA PREIZKUSA TESTNEGA PILOTA V
BARJANSKIH TLEH**

Diplomska naloga št.: 3213/PS

**COMPARISON BETWEEN STATIC AND DYNAMIC
PILE LOAD TEST IN MARSH SOIL**

Graduation thesis No.: 3213/PS

Mentor:
izr. prof. dr. Janko Logar

Predsednik komisije:
doc. dr. Tomo Cerovšek

Ljubljana, 30. 3. 2012

IZJAVE

Podpisani Miha Erbežnik izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »Primerjava statičnega in dinamičnega obremenilnega preizkusa testnega pilota v barjanskih tleh«.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Ljubljana, 5.3.2012

Miha Erbežnik

BIBLIOGRAFSKO – DOKUMENTACIJSKA STRAN Z IZVLEČKOM

- UDK:** 624.131(043.2)
- Avtor:** Miha Erbežnik
- Mentor:** izr. prof. dr. Janko Logar
- Naslov:** Primerjava statičnega in dinamičnega obremenilnega preizkusa testnega pilota v barjanskih tleh
- Obseg in oprema:** 102 str., 19 pregl., 38 sl., 5 graf., 83 en.
- Ključne besede:** Dilatometer, statični obremenilni test, dinamični obremenilni test PDA, CAPWAP, mejna nosilnost pilota

Izveček:

Gradnja objektov se je v zadnjem desetletju izrazito povečala na območjih slabih temeljnih tal in s tem so se povečale potrebe po gradnji pilotov. Kakovost izvedbe pilotov je potrebno v skladu s standardi preverjati, za kar se uporablja preizkus zveznosti, pri zahtevnejših objektih pa je potrebno preveriti tudi nosilnost z uporabo statičnega ali dinamičnega obremenilnega testa. Izvedba testov in analiza rezultatov se med seboj zelo razlikujeta, a v splošnem velja, da je rezultat statičnega obremenilnega testa bolj zanesljiv, medtem ko je dinamični obremenilni test cenejši in bistveno hitrejši. V diplomski nalogi smo predstavili razlike med obema testoma ter rezultate obeh testov na testnem pilotu, zgrajenem v slabih barjanskih tleh. Ker temeljna tla bistveno vplivajo na nosilnost, smo temeljna tla primerno raziskali in na podlagi dobljenih karakteristik zemljine izračunali računsko nosilnost testnega pilota. V nadaljevanju smo podrobno predstavili oba obremenilna testa, tako izvedbo meritev, kakor tudi analizo le-teh. Rezultate meritev smo podrobno analizirali in jih prikazali s krivuljo v grafu obtežba – pomik. Iz rezultatov smo podali ugotovitve in zaključke o razlikah obeh obremenilnih testov, ugotovljenih na primerjavi rezultatov.

BIBLIOGRAPHIC – DOKUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 624.131(043.2)
Author: Miha Erbežnik
Supervision: izr. prof. dr. Janko Logar
Title: Comparison between static and dynamic pile load test in marsh soil
Notes: 102 p., 19 tab., 38 fig., 5 graf., 83 eq.
Key Words: Dilatometer, static pile load test, dynamic pile load test, PDA, CAPWAP

Abstract:

Construction of buildings has increased markedly over the past decades in areas of poor foundation soil, which led to increased need for construction of piles. In accordance with European standards, quality control of installed piles has to be done. Quickest and simplest test is low strain integrity test, but in cases of complex structures a static or dynamic pile load test must be made. Execution of tests and analysis of the results are very different, but the final results are the same. In general it is known that the static load test is more reliable, but the dynamic load test is more cost efficient and quicker. In the thesis we present the differences between these tests, and the results of both tests on a test pile built in marsh ground. Due to the fact, that the soil has a significant impact on ultimate pile bearing capacity, we properly investigated the soil, and from the results calculated the pile ultimate bearing capacity. In the following chapters we present in detail both tests. Measurement results are analyzed and shown by a load – settlement curve. From the results we present findings and conclusions about the difference found during the experiment.

ZAHVALA

Za uspešno izdelavo diplomske naloge se iskreno zahvaljujem staršema Cirilu in Joži Erbežnik, ki sta finančno podprla praktični del diplomske naloge in z nasveti pomagala pri celotni izdelavi eksperimenta na terenu. Iskreno se zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. Janku Logarju za strokovne nasvete tekom celotne izdelave diplomske naloge. Iskrena zahvala podjetjema I.C.Projekt d.o.o. in Geoinvest d.o.o. za opremo, potrebno za izvedbo meritev statičnega in dinamičnega obremenilnega testa podjetnikoma Branetu in Mitji Rakovec za zagotovitev lokacije vgradnje testih pilotov P1 in P2 ter aktivno pomoč tekom celotnega eksperimenta, podjetju Geokop d.o.o. za vgradnjo testnih pilotov, mag. Alenki Robas iz Fakultete za gradbeništvo in geodezijo ter podjetju ZRMK Holding d.o.o za izvedbo DMT meritve na lokaciji vgradnje pilotov.

Zahvala gre tudi puncu Gaji za podporo in spodbudo tekom celotnega študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
1.1	Ideja o diplomski nalogi	1
1.2	Izbira lokacije testnega pilota	1
1.3	Kdaj se uporablja obremenilna testa?	2
1.4	Razlika med obremenilnima testoma	4
2	TEMELJNA TLA	5
2.1	Lokacija testnega pilota	5
2.2	Terenska preiskava s ploskim dilatometrom	6
2.3	Popis izkopa vrtine pilota	8
2.4	Račun nosilnosti pilota iz podatkov terenskih preiskav temeljnih tal	9
2.4.1	Metoda modelnega pilota	10
2.4.2	Alternativna metoda	11
2.4.3	Enačbe za izračun karakteristične nosilnosti pilota v koherentnih tleh	11
2.4.3.1	Enačbe za izračun odpornosti zemljine pod konico pilota	12
2.4.3.2	Enačbe za izračun nosilnosti plašča pilota	12
3	STATIČNI OBREMENILNI TEST PILOTOV	14
3.1	Zgodovina	14
3.2	Postopek izvedbe statičnega obremenilnega testa	15
3.2.1	Izvedba statičnega obremenilnega testa po standardu ASTM 1143 – 43	15
3.2.1.1	Konstrukcija reakcijske sile	16
3.2.1.2	Aparature za merjenje pomikov	17
3.2.1.3	Oblike obremenjevanja	17
3.2.1.4	Zbiranje merjenih količin	20
3.3	Izračun nosilnosti iz grafa obtežba – pomik	21
3.3.1	Metoda Din 4026	21
3.3.2	Metoda Mastrontuomo	22
3.3.3	Metoda Davissona	23

3.3.4	Metoda Evrokoda	24
3.4	Karakteristična tlačna odpornost pilota po standardu SIST EN 1997-1:2005	24
4	DINAMIČNI OBREMENILNI TEST PILOTOV	26
4.1	Zgodovina	26
4.2	Izvedba dinamičnega obremenilnega testa	27
4.2.1	Mehanizem za nanos udarne sile	27
4.2.2	Merilci sil in hitrosti	28
4.2.3	Pripadajoča oprema za izvedbo	29
4.2.4	Analizator za beleženje signala merilcev in shranjevanje podatkov	29
4.3	Analizator PDA	30
4.4	Valovna analiza	30
4.4.1	Izpeljava valovne enačbe	31
4.4.2	Smithova rešitev valovne enačbe	37
4.5	CAPWAP analiza	39
4.5.1	CAPWAP-ov model pilota	40
4.5.2	CAPWAP-ov model tal	42
4.5.3	Statična analiza s programom CAPWAP	46
4.6	Karakteristična tlačna odpornost pilota po standardu SIST EN 1997-1:2005	47
5	ZASNOVA EKSPERIMENTA IN IZVEDBA MERITEV	49
5.1	Zasnova eksperimenta	49
5.2	Izvedba statičnega obremenilnega preizkusa	52
5.2.1	Predpriprava pilota na statični obremenilni test	53
5.2.2	Izdelava konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile	54
5.2.2.1	Izračun ravnotežja konstrukcije na računskem modelu	55
5.2.2.2	Izdelava konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile na terenu	57
5.2.3	Priprava merilnih inštrumentov	58
5.2.4	Obremenjevanje testnega pilota	59
5.2.5	Zapisovanje meritev	60
5.3	Izvedba dinamičnega obremenilnega testa	62
5.3.1	Priprava stolpa za dvig uteži	62

5.3.2	Namestitev merilnikov na pilot	64
5.3.3	Priprava podatkov v analizatorju PDA pred pričetkom meritve	65
5.3.4	Analiza v programu CAPWAP	68
6	REZULTATI	76
6.1	Rezultati DMT preiskav	76
6.2	Rezultati izračuna nosilnosti po principu modelnega pilota	79
6.2.1	Izračun po metodi modelnega pilota	79
6.3	Rezultat statičnega obremenilnega preizkus	80
6.3.1	Izračun mejne nosilnosti po metodi DIN 4026	81
6.3.2	Izračun mejne nosilnosti po metodi Davisson	82
6.4	Rezultati dinamičnega obremenilnega testa	84
6.5	Časovno zaporedje izvedbe eksperimenta ter trajanje posamezne izvedbe	91
7	INTERPRETACIJA REZULTATOV	95
7.1	Statični obremenilni test	95
7.2	Dinamični obremenilni test	95
7.3	Primerjava krivulj obremenitev – posedek	96
8	ZAKLJUČEK	98
VIRI		101

KAZALO SLIK

<i>Slika 1: Lokacija testnega pilota (Vir: http://www.geopedia.si)</i>	6
<i>Slika 2: Priprava na izvedbo dilatometerskega testa</i>	7
<i>Slika 3: Prikaz DMT preizkusa (Vir: http://www.marchetti-dmt.it)</i>	8
<i>Slika 4: Vzorci zemljin iz posameznih slojev tal</i>	9
<i>Slika 5: Preslikava hiperbolične krivulje v linearno premico</i>	23
<i>Slika 6: Pritrditev merilcev za izvedbo dinamičnega obremenilnega testa na pilot (Vir: Strniša, G. 1998. Pilotiranje, dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP)</i>	28
<i>Slika 7: Proporcionalnost (Vir: Strniša, G. 1998. Pilotiranje, dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP)</i>	32
<i>Slika 8: Potovanje valov po pilotu (Vir: Strniša, G. 1998. Pilotiranje, dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP)</i>	35
<i>Slika 9: Smithov model pilota za reševanje valovne enačbe (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland, Pdi)</i>	39
<i>Slika 10: Grafični prikaz model pilota v programu CAPWAP (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland, Pdi)</i>	41
<i>Slika 11: Grafični prikaz modela zemljine v programu CAPWAP (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland, Pdi)</i>	43
<i>Slika 12: Grafični prikaz statične odpornosti plašča pilota (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland, Pdi)</i>	44
<i>Slika 13: Grafični prikaz statične odpornosti pod nogo pilota (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland, Pdi)</i>	45
<i>Slika 14: Izkop vrtnice pilota z vrtalnim strojem Casagrande dne 19.8.2011</i>	49
<i>Slika 15: Armaturni koš pilota</i>	50
<i>Slika 16: Betoniranje pilota z mešalno žlico</i>	51
<i>Slika 17: Armiranje kape pilota dne 27.8.2011</i>	52
<i>Slika 18: Ročno odstranjevanje kape pilota</i>	54
<i>Slika 19: Shema konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile</i>	55
<i>Slika 20: Model konstrukcije za izračun statičnega ravnotežja</i>	56
<i>Slika 21: Izvedba konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile</i>	58
<i>Slika 22: Priprava merilnih inštrumentov pred izvedbo statičnega obremenilnega testa</i>	59
<i>Slika 23: Razpredelnica za vpisovanje meritev statičnega obremenilnega testa pilota</i>	61
<i>Slika 24: Izvedba stolpa za dvig uteži</i>	63
<i>Slika 25: Namestitev merilnikov na pilot pred pričetkom dinamičnega obremenilnega testa</i>	64
<i>Slika 26: Vnos podatkov v analizator PDA-L</i>	66
<i>Slika 27: PDA analizator</i>	67
<i>Slika 28: Prikaz rezultatov analizatorja PDA</i>	68

<i>Slika 29: Prikaz poteka sile in hitrosti, ki jih zaznajo merilci</i>	69
<i>Slika 30: Pogovorno okno za vpis informacij o projektu</i>	70
<i>Slika 31: Pogovorno okno za izdelavo modela pilota</i>	71
<i>Slika 32: Krivulje za analizo</i>	71
<i>Slika 33: Različne vrste analize za avtomatsko izboljšanje ujemanje krivulj</i>	72
<i>Slika 34: Pogovorno okno za spreminjanje parametrov pri analizi v programu CAPWAP</i>	73
<i>Slika 35: Grafični prikaz rezultatov DMT preiskave</i>	78
<i>Slika 36: Prikaz rezultatov analize CAPWAP</i>	85
<i>Slika 37: Mejna odpornost posameznega končnega elementa tal</i>	88
<i>Slika 38: Prikaz spreminjanja karakteristik po pilotu</i>	90

KAZALO PREGLEDNIC

<i>Preglednica 1: Korelacijski faktorji za izračun karakteristične odpornosti pilotov glede na rezultate terenski preiskav</i>	10
<i>Preglednica 2: Vrednostni faktorji nosilnosti N_c</i>	12
<i>Preglednica 3: Opis količin, nastopajočih v enačbi za izračun napetosti po plašču pilota</i>	13
<i>Preglednica 4: Korelacijski faktorji za izračun karakteristične vrednosti na podlagi statičnih obremenitvenih preskusov pilotov (n – število preskusnih pilotov)</i>	25
<i>Preglednica 5: Korekcijski faktorji ζ za izračun karakterističnih vrednosti na podlagi rezultatov terenskih preiskav (n - število dinamičnih preizkusov)</i>	48
<i>Preglednica 6: Meritve dinamičnega obremenilnega testa</i>	62
<i>Preglednica 7: Opis avtomatskih vrst analiz programa CAPWAP</i>	72
<i>Preglednica 8: Neznanke v programu CAPWAP</i>	74
<i>Preglednica 9: Prikaz rezultatov med postopkom izboljšave</i>	75
<i>Preglednica 10: Rezultati dilatometerske preiskave</i>	77
<i>Preglednica 11: Izračun nosilnosti pilota po plašču v koherentnih tleh iz rezultatov DMT</i>	79
<i>Preglednica 12: Rezultat statičnega obremenilnega testa</i>	80
<i>Preglednica 13: Rezultati dinamičnega obremenilnega preizkusa z analizo CAPWAP</i>	84
<i>Preglednica 14: Spreminjanje glavnih parametrov ter opazovanje vrednosti M_Q</i>	84
<i>Preglednica 15: Prevodi pomembnejših angleških izrazov iz tabele rezultatov analize CAPWAP</i>	86
<i>Preglednica 16: Tabela rezultatov analize CAPWAP (1)</i>	87
<i>Preglednica 17: Tabela rezultatov analize CAPWAP (2)</i>	89
<i>Preglednica 18: Časovni potek del</i>	91
<i>Preglednica 19: Pregled stroškov eksperimenta</i>	93

KAZALO GRAFOV

Graf 1: Prikaz izmerjene krivulje statičnega obremenilnega testa v grafu obremenitev pomik.....	81
Graf 2: Določitev nosilnosti po metodi DIN 4026 iz rezultatov statičnega obremenilnega testa	82
Graf 3: Določitev nosilnosti po Davissonovi metodi iz rezultatov statičnega obremenilnega testa	83
Graf 4: Prikaz krivulje v grafu pomik – obtežba, pridobljene z analizo CAPWAP.....	86
Graf 5: Primerjava krivulj dinamičnega in statičnega obremenilnega testa	97

1 UVOD

1.1 *Ideja o diplomski nalogi*

V podjetju I. C. Projekt d.o.o. so specializirani za geomehanske raziskave terena, med drugim se ukvarjajo tudi s preizkusi nosilnosti pilotov. V preteklosti so izvajali predvsem statične obremenilne preizkuse pilotov, vendar so pred dobrimi štirimi leti kupili opremo za izvajanje dinamičnega obremenilnega preizkusa. Ponudila se nam je ideja o izvedbi primerjave statičnega ter dinamičnega obremenilnega testa na poljubnem testnem pilotu. Statični in dinamični obremenilni test predstavljata osnovna načina kontrole nosilnosti vertikalno obremenjenih pilotov in sta v sedanjem času postala obvezna praksa pri gradnji objektov z globokim temeljenjem. Poglavitni cilj vseh investitorjev je hitra, ekonomična in varna gradnja. Zaradi tega je izbira testa pogojena s časom, denarjem, mehanizacijo, vrsto pilota in zahtevnostjo projektiranega objekta. Izvedba statičnega obremenilnega testa pilotov je draga in vzame veliko časa, vendar pa rezultat predstavlja osnovo za določitev nosilnosti pilota. Ravno želje po hitri in cenovno ugodni kontroli kvalitete gradnje so pripeljale inženirje do razvoja dinamičnega obremenilnega testa. Izvedba dinamičnega obremenilnega testa je v primerjavi z izvedbo statičnega obremenilnega testa pilotov veliko hitrejša in cenejša. Vendar pa mnogi inženirji ne zaupajo rezultatu dinamičnega testa.

V ta namen smo se tudi odločili, da določimo nosilnost testnega pilota tako s statičnim, kakor tudi z dinamičnim obremenilnim testom in primerjamo medsebojne rezultate. Preiskali smo tudi lastnosti temeljnih tal in iz lastnosti zemljin izračunati nosilnost pilota ter jo primerjati z rezultatoma obeh testov.

1.2 *Izbira lokacije testnega pilota*

Poiskati primerno lokacijo za gradnjo pilota je bila ključna naloga za uspešno izdelavo diplomske naloge. Zaradi velikih stroškov transporta opreme za izvedbo statičnega ter dinamičnega obremenilnega preizkusa in vrtalne garniture je bila želja po lokaciji v bližini mesta Ljubljana. Poleg tega pa je bilo potrebno iskati lokacijo s slabimi temeljnimi tlemi do

minimalne globine 10 metrov. Naslednji problem, ki ga je bilo potrebno upoštevati pri izbiri lokacije, je težka mehanizacija, ki se na mehkih tleh ugrezne in povzroči dodatne stroške. Predvsem je potrebno zagotoviti prostor transportnim sredstvom in sicer za raztovor potrebnega balasta za statični obremenilni preizkus in opreme za izvedbo dinamičnega obremenilnega preizkusa. K sreči je pomoč ponudil podjetnik Brane Rakovec, ki nam je odstopil del deponije za vgradnjo testnih pilotov P1 in P2. Deponija leži med krajinskim parkom Barje ter železniško progo Ljubljana–Koper. Deponija je v neposredni bližini glavne ceste, ki povezuje kraja Notranje Gorice in Podpeč, kar pomaga pri transportu. Deponija leži na pol metrskem platoju gramoza, s tem pa so bile težave po ugrezanju mehanizacije odpravljene.

Testni pilot se je vgradilo na južnem delu Ljubljanskega barja v naselju Notranje Gorice, ki so del občine Brezovica pri Ljubljani. Ljubljansko barje pokriva južni del ljubljanske kotline ter s tem pokriva velik del urbanega predela mestne občine Ljubljana. Seveda pa poleg glavnega mesta Slovenije na Ljubljanskem barju ležijo tudi manjša naselja in vasi, ki se s priseljevanjem večajo, s tem pa se gradnja izvaja tudi na manj primernih temeljnih tleh.

1.3 Kdaj se uporablja obremenilna testa?

Statični in dinamični obremenilni test se uporabljata za določitev končne nosilnosti vertikalno obremenjenega pilota. Časovno se uporaba obremenilnega testa izvaja pred in po opravljeni gradnji.

Pred pričetkom gradnje je uporaba obremenilnih testov povezana z zahtevami standarda SIST EN 1997-1:2005: Geotehnično projektiranje, ki projektantom predpisuje natančna navodila za projektiranje pilotov. In sicer je projektiranje pilotov mogoče na podlagi naslednjih metod:

- na podlagi rezultatov statičnih obremenilnih preizkusov, ki ne odstopajo pretirano od primerljivih statičnih preizkusov iz preteklosti,
- na podlagi empiričnih ali analitičnih računskih metod, katerih veljavnost se je dokazala s statičnimi obremenilnimi preizkusi v primerljivih temeljnih tleh,
- na podlagi rezultatov dinamičnih obremenilnih preizkusov, katerih veljavnost je bila dokazana s statičnimi obremenilnimi preizkusi v podobnih temeljnih tleh,

- na podlagi rezultatov opazovanja primerljivega temelja na pilotih, vendar le v primeru podrobne analize sestave in lastnosti temeljnih tal.

Pred pričetkom gradnje je v skladu s SIST EN 1997-1:2005: Geotehnično projektiranje, ki predpisuje projektantom natančna navodila za projektiranje pilotov, uporaba statičnega obremenilnega testa eksplicitno zahtevana v primerih:

- ko se uporablja vrsta pilota ali metoda vgradnje, za katero ni primerljivih izkušenj,
- če piloti niso bili preskušeni v primerljivih zemljinah in s primerljivimi obtežnimi pogoji,
- ko bodo piloti obremenjeni z obtežbo, za katero teorija in izkušnje za zanesljivo projektiranje ne obstajajo. Program obremenilnega preskusa mora v takšnih primerih predvidevati 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.

Statični ali dinamični obremenilni test se opravlja tako že pred pričetkom zahtevnejših objektov na testnih pilotih, ki so lahko enakih dimenzij ali za velike pilote tudi manjših dimenzij od projektiranih pilotov. Seveda je v primeru manjših testnih pilotov potreben preračun rezultatov na dejansko velikost pilotov. Izvedba meritev na manjših testnih pilotih je mogoča v primeru znane porazdelitve odpornosti tal po plašču in nogi (konic) pilota ter geometrijske lastnosti ne smejo biti manjše od 50 % dejanske vrednosti.

Izvedba obremenilnega testa po končani gradnji pilota se izvaja, da se preveri kakovost gradnje pilota in, če je nosilnost v okvirih projektiranih vrednosti. V primeru gradnje pilota z zabijanjem se z dinamičnim obremenilnim testom med gradnjo dodatno pridobiva podatke o:

- maksimalni tlačni in natezni sili v pilotu med zabijanjem,
- preneseni energiji zabijala v pilot,
- oceni o eventualnih poškodbah pilota.

Uporaba obremenilnih testov ni specifično uporabljena samo za ugotavljanje končne nosilnosti pilota, temveč tudi kot pomoč pri gradnji vtisnjenih pilotov.

1.4 Razlika med obremenilnima testoma

Statični in dinamični obremenilni test pilot se v mnogo stvareh razlikujeta, vendar je pri obeh testih končni rezultat enak. Prva pomembna razlika med obremenilnima testoma je v načinu izvedbe meritev, saj pri statičnem obremenilnem testu meritev poteka počasi po korakih, medtem ko se meritev dinamičnega obremenilnega testa izvede z merjenjem potovanja valov po pilotu, ki ga pred tem hipno obremenimo z udarcem zabijala ali s padcem uteži na glavo pilota. Ravno razlika v načinu obremenitve pilota je glavni razlog, da se pri statičnem obremenilnem pilotu aktivirajo zgolj statične odpornosti zemljine, medtem ko pri dinamičnem obremenilnem testu aktiviramo tudi dinamične odpornosti zemljine. Poleg tega pa lahko iz meritev dinamičnega obremenilnega testa z analizo CAPWAP pridobimo ločene podatke o nosilnosti plašča in noge pilota, brez dodatne vgradnje merilnikov sile vzdolž pilota.

Investitorji v splošnem namenljajo majhen procent celotne investicije v kontrolo gradnje in zaradi tega veliko vlogo igra cena posamezne preiskave oziroma meritve. S ceno pa je povezan tudi čas posamezne kontrole, saj je v procesu kontrole vstavljena gradnja ter ima s tem izvajalec gradnje izgubo. Iz teh predpostavk lahko izpeljemo trditev, da morajo biti meritve kontrole dobre, hitre in ekonomične. Tukaj pa velikokrat prihaja do razhajanja, saj so hitre in ekonomične kontrole v splošnem manj zanesljive od časovno daljših in dražjih meritev. Ta problem nastopa tudi v primeru obravnavanih kontrol. Dinamični obremenilni test je hiter, izvedba meritev je cenejša. Po drugi strani je statični obremenilni test časovno daljši, dražji, vendar ga standard obravnava kot osnovo pri določitvi nosilnosti. Zato bosta narejeni meritvi na istem testnem pilotu, da bodo ugotovljene razlike med testoma.

2 TEMELJNA TLA

2.1 Lokacija testnega pilota

Lokacija testnega pilota je v bližini naselja Notranje Gorice, v občini Brezovica pri Ljubljani, na območju južno zahodnega predela Ljubljanskega barja.

Ljubljansko barje predstavlja južni del Ljubljanske kotline ter se razprostira med pobočji Polhograjskega hribovja na severu in severozahodu, Posavskega hribovja na jugovzhodu ter dinarskimi planotami na jugu. Ljubljansko barje je ravninski svet na nadmorski višini 288–290 m s posameznimi osamelci. Temeljna tla Ljubljanskega barja sestavljajo barjanski sedimenti holocenskega izvora, ki ležijo na dolomitno apnenčasti podlagi. Zgodovina Ljubljanskega barja se prične pred približno dvema milijonoma let, kot posledica tektonskih prelomov ter s tem povezanim posedanjem tal, najintenzivnejše v času ledene dobe. Ob tektonskih prelomih je nastala večja kotlina, ki pa so jo vode sproti zasipale. V primeru, da je bilo posedanje tal hitrejše od nanosov rek, je prišlo do ojezeritve Barja (plasti šote). Temeljna tla sestavljajo barjanski sedimenti holocenskega izvora, ki pa so zelo heterogeni. Do globine 25 m so meljato glineni sedimenti holocenskega izvora ali tako imenovana polžarica z rastlinskimi ostanki šote, pod to plastjo pa so peščeno-prodnati vodonosniki pleistocenskega izvora, ločeni z vmesno neprepustno glino. Dno kotline sestavljajo predvsem triasni dolomiti in v manjšem deležu tudi apnenci.

Testni pilot se vgradi na obstoječi deponiji gradbenega materiala. Deponija leži na poplavnem območju reke Ljubljanice, v neposredni bližini pritoka Kušljanov graben. Zaradi poplavnega območja je nivo deponije dvignjen za približno 1 meter, tako da je vzporeden z nivojem državne ceste 742, imenovane Podpeška cesta. Nasuti plato sestavljajo mešanica gramozov, peskov in prodnikov. Deponija leži med glavno železniško progo Koper–Ljubljana ter državno cesto 742, s čimer je potrebno upoštevati pravila o oddaljenosti gradnje od povezovalnih poti ter pridobiti potrebna soglasja, ob tem pa je potrebno upoštevati še predpise Krajinskega parka Ljubljansko barje, saj deponija leži v 3. varstvenem območju. V 3.

varnostno območje spadajo naselja ter območja za namensko rabo. Slika 1 prikazuje lokacijo deponije, kjer se je vgradilo testni pilot.



Slika 1: Lokacija testnega pilota (Vir: <http://www.geopedia.si>)

2.2 Terenska preiskava s ploskim dilatometrom

Preiskava temeljnih tal s ploskim dilatometrom (v nadaljevanju DMT) je uvedel Marchetti ter se v svetu uporablja dobrih dvajset let. Preiskava je terenska in se izvaja v intaktnem okolju ter poteka kontinuirano in hitro. DMT meritev se izvaja z merjenjem tlakov pri dveh značilnih deformacijah merske membrane ter zapisovanjem odčitkov vrednosti tlakov vsakih 20 centimetrov globine, ko sonda v tleh miruje. Več podatkov o preiskavi najdete na <http://www.marchetti-dmt.it>. Na podlagi odčitkov se s pomočjo empiričnih enačb določijo količine:

- sestava tal,

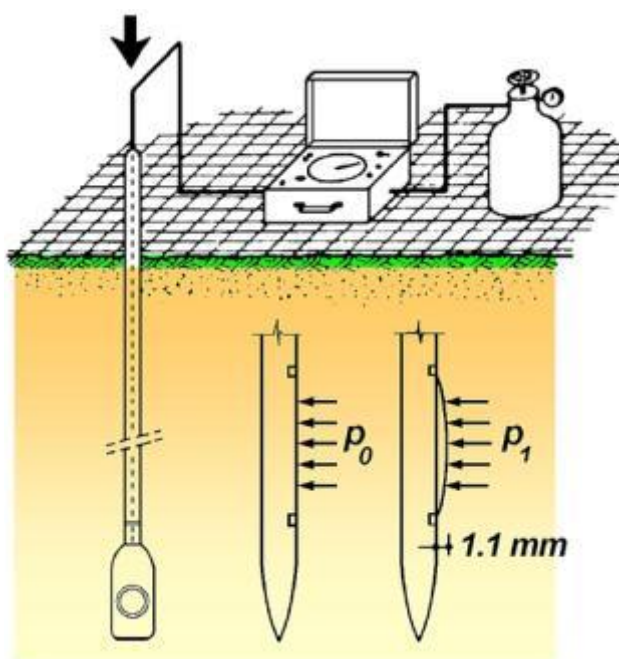
- nedrenirana strižna trdnost pri koherentnih zemljinah [c_u],
- koeficient mirnega zemeljskega pritiska [K_0],
- dilatometerski modul stisljivosti zemljine [E_d],
- efektivne vertikalne napetosti [σ'_v],
- strižni kot v primeru, da so temeljna tla iz peskov [φ].



Slika 2: Priprava na izvedbo dilatometerskega testa

DMT meritev se izvaja s ploščato sondo s pločevinasto membrano premera 60 mm in debelino 0,2 mm. Ploščato sondo se vtiska v tla z vrtnim drogovjem ali s CPT drogovjem. Za preizkus potrebujemo še jeklenko s plinom, cev za dovod plina iz jeklenke do ploščate sonde ter kontrolno enoto, s katero merimo tlake v temeljnih tleh.

Odčitek A je potreben tlak, da se membrana izravna, odčitek B je potreben tlak za premik membrane za 1,1 mm, odčitek C je tlak ob vrnitvi membrane na položaja pri odčitku A. Odčitek C ni bistven za izračun glavnih karakteristik, vendar pa poda oceno o prepustnosti temeljnih tal, predvsem peščenih temeljih tal.



Slika 3: Prikaz DMT preizkusa (Vir: <http://www.marchetti-dmt.it>)

2.3 *Popis izkopa vrtine pilota*

Pri ugotavljanju sestave temeljnih tal se poleg preliminarnih raziskav terena, kakršna je DTM, izvajajo tudi dodatne kontrole, s katerimi se poleg osnovnih karakteristik zemljine določajo morebitna presenečenja tal. V primerih izkopavanja vrtine pilota je izvedba dodatne kontrole enostavna in ne potrebuje dodatnih stroškov. Rezultati takšne kontrole niso v celoti točni, vendar odkrijejo morebitna presenečenja v sestavi temeljnih tal. Slojevitost temeljnih tal se določi glede na vidne ocene spremembe zemljine ter podatka strojnika, ki posreduje globino od kote nivoja tal do kote opravljenega izkopa vrtine.

Pri kontroli izkopa vrtine je bilo ugotovljeno, da do noge pilota temeljna tla sestavljajo trije pomembnejši sloji. Prvi sloj višine 1 m sestavlja nasipni material (GP), sledi sloj višine 4,5 m, sestavljen iz lahko gnetne nizko-plastične gline CI svetlo modre barve, s prisotnostjo šote. Po sloju mehke gline sledi meljnato glinen sloj s tankimi plastmi lahko gnetne svetlo modre gline ter s posameznimi prodniki premera do 25 mm. Vzorci zemljin iz posameznih slojev tal so predstavljeni s sliko 4.



Slika 4: Vzorci zemljin iz posameznih slojev tal

2.4 Račun nosilnosti pilota iz podatkov terenskih preiskav temeljnih tal

Rezultati statičnega in dinamičnega obremenilnega testa predstavljajo zanesljivo vrednost nosilnosti pilota, vendar je vrednost nosilnosti pilota brez podatkov o temeljnih tleh nezadostna. Nepoznavanje slojevitosti, globine nosilnega sloja tal in osnovnih karakteristik zemljine na lokaciji gradnje, kljub poznavanju rezultata testnega pilota, ne omogočajo predpisa mejne nosilnosti pilotov za celotno območje gradnje. Terenske preiskave so se v preteklosti razvile do te mere, da v sedanjem času ponujajo neposredni izračun nosilnosti pilotov glede na rezultate posamezne terenske preiskave. Izračun nosilnosti iz terenskih preiskav je določen v standardu EC 7-1. Iz podatkov o karakterističnih lastnosti zemljin in slojevitosti tal, izračunamo končno nosilnost vertikalno obremenjenega pilota. Standard navaja dve metodi za določitev karakteristične nosilnosti pilotov iz terenskih preiskav, in sicer:

- metoda modelnega pilota,
- alternativna metoda.

2.4.1 Metoda modelnega pilota

Bistvo metode modelnega pilota je izdelava nekega namišljenega pilota iz podatkov, pridobljenih s terensko preiskavo. Pomembna predpostavka je, da se modelni pilot izračuna za vsako izvedeno terensko preiskavo posebej, neodvisno od ostalih terenskih preiskav. Tako dobimo toliko računskih odpornosti modelnega pilota, kolikor terenskih preiskav je bilo na danem območju opravljenih. Torej, če imamo za določeno gradnjo opravljene štiri terenske meritve (npr. CPT1, CPT2, SPT, DMT), dobimo štiri računske odpornostne modele. Za vsak računski model se izračuna odpornost pilota $(R_{c;cal})_i$, kjer i predstavlja zaporedno številko terenske preiskave. Končno računsko karakteristično odpornost se izračuna z enačbo:

$$R_{s;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;cal})_{mean}}{\xi_3}, \frac{(R_{c;cal})_{min}}{\xi_4} \right\}, \quad (2-1)$$

$$(R_{c;cal})_{mean} = (\sum_{i=1}^n R_{c;cal;i}) / n, \quad (2-2)$$

$$(R_{c;cal})_{min} = \min \{ R_{c;cal;i} \}, \quad (2-3)$$

kjer ξ_3 in ξ_4 predstavljata korelacijska faktorja, ki sta odvisna od števila opravljenih terenskih preiskav. Standard SIST EN 1997-1:2005 predpisuje vrednosti korelacijskih faktorjev s preglednico A.10 iz dodatka A.

Preglednica 1: Korelacijski faktorji za izračun karakteristične odpornosti pilotov glede na rezultate terenski preiskav

	ξ za n=	1	2	3	4	5	7	10
Gibke konstrukcije	ξ_5	1,4	1,35	1,33	1,31	1,29	1,27	1,25
	ξ_6	1,4	1,27	1,23	1,2	1,15	1,12	1,08
Toge konstrukcij	ξ_5	1,27	1,23	1,21	1,19	1,17	1,15	1,14
	ξ_6	1,27	1,15	1,12	1,09	1,05	1,02	1,00

2.4.2 Alternativna metoda

Alternativna metoda izračuna karakteristične nosilnosti pilota uporablja pristop modela temeljnih tal, kjer se iz vseh znanih terenskih in laboratorijskih preiskav določijo materialne karakteristike posameznih slojev. Karakteristično nosilnost pilota se določi kot seštevek karakteristična odpornosti po plašču ($R_{S;k}$) in karakteristične odpornosti pod konico pilota ($R_{b;k}$). Splošne enačbe za izračun karakteristične vrednosti po alternativni metodi:

$$R_{c;k} = R_{b;k} + R_{S;k}, \quad (2-4)$$

$$R_{b;k} = A_b q_{b;k}, \quad (2-5)$$

$$R_{S;k} = \sum_i A_{S;i} q_{S;k;i}. \quad (2-6)$$

Kjer sta:

- A_b – prečni prerez konice pilota,
- A_s – obseg plašča pilota.

Iz enačb je razvidno, da v njih ne nastopajo korelacijski faktorji, zato je potrebno ustrezno varnost zagotoviti z varno izbiro karakterističnih vrednosti materialnih lastnosti ali z uporabo modelnega faktorja za alternativno metodo $\gamma_m = 1,30$. Alternativno metodo se lahko uporablja v primeru dveh ali več terenskih preiskav, kajti v primeru ene same terenske preiskave je metoda identična metodi modelnega pilota in modelni faktor $\gamma_m = 1,40$.

2.4.3 Enačbe za izračun karakteristične nosilnosti pilota v koherentnih tleh

Neodvisno od izbire metode izračuna končne nosilnosti pilota se v splošnem enačbe delijo na dva dela, in sicer na prvi del, s katerim zajamemo odpornost zemljine ob plašču pilota, ter drugi del, s katerim zajamemo odpornost zemljine na nogi (konici) pilota. Enačbe za izračun odpornosti zemljine po plašču in po nogi pilota bodo predstavljene zgolj za pilote vgrajene v že pripravljeno vrtino, tako imenovane uvtane pilote. Poleg tega pa zgolj za koherentne zemljine, saj temeljna tla na lokaciji testnega pilota v celoti sestavljajo koherentne zemljine.

2.4.3.1 Enačbe za izračun odpornosti zemljine pod konico pilota

Za izračun odpornosti pilota pod konico se uporablja enačba (2.5), kjer A_b predstavlja prečni prerez konice pilota in $q_{b;k}$ predstavlja tlačno napetost konice pilota. Prečni prerez konice pilota se izračuna glede na podano geometrijo pilota. Tlačno napetost konice pilota se izračuna s enačbo:

$$q_{b;k} = N_c c_u, \quad (2-7)$$

$$A_b = \pi R^2. \quad (2-8)$$

Enačba je produkt nedrenirane strižne trdnosti (c_u) in faktorja nosilnosti N_c . Faktor nosilnosti N_c upošteva, koliko je pilot vtisnjen v temeljna tla. Vrednost faktorja nosilnosti N_c je določena v preglednici 2.

Preglednica 2: Vrednostni faktorji nosilnosti N_c

N_c	Opis
6	Konica pilota se ne dotika nosilnega sloja temeljnih tal.
6 - 9	Konica pilota je malo vpeta v nosilni sloj temeljnih tal.
9	Konica pilota je vsaj za $3D$ vpeta v nosilni sloj temeljnih tal.

2.4.3.2 Enačbe za izračun nosilnosti plašča pilota

Za odpornost pilota po plašču se uporablja enačba (2-6). Enačba predstavlja vsoto vseh produktov napetosti ob plašču z obsegom pilota. Nosilnost pilota po plašču je razdeljena glede načina vgradnje ter vrste temeljnih tal. Omejil sem se le na koherentne zemljine ter uvtane pilote. V preteklosti se je uporabljala enačba oblike:

$$q_s = \alpha c_u, \quad (2-9)$$

$$A_s = 2 \pi R L. \quad (2-10)$$

Koeficient α predstavlja empirični koeficient, odvisen od vrste tal in vgradnje pilota, medtem ko c_u predstavlja nedrenirano strižno trdnost pilota. Vrednosti empiričnega koeficienta α se gibljejo od 0,3, za trdne do poltrdne gline, do 1 ali več za mehke gline. Zaradi velikega vpliva empiričnega koeficienta α na izračun končne vrednosti nosilnosti pilota po plašču se za uvertane pilote v koherentnih tleh uporablja enačba:

$$q_s = K_0 \sigma'_v \operatorname{tg} \varphi' \quad (2-11)$$

Preglednica 3: Opis količin, nastopajočih v enačbi za izračun napetosti po plašču pilota

Oznaka	Opis
K_0	Mirni zemeljski pritisk
σ'_v	Efektivna vertikalna napetost
φ'	Strižni kot zemljine

Za vtisnjene pilote v koherentna tla in prekonsolidirane gline se uporablja naslednje enačbe:

$$\left(\frac{c_u}{\sigma'_v}\right)_{nc} = \frac{\varphi'}{100}, \quad (2-12)$$

$$q_s = \left(\frac{c_u}{\sigma'_v}\right)_{nc}^{0.5} (c_u \sigma'_v)^{0.5}, \text{ če je } \frac{c_u}{\sigma'_v} \leq 1, \quad (2-13)$$

$$q_s = \left(\frac{c_u}{\sigma'_v}\right)_{nc}^{0.5} c_u^{0.75} \sigma'^{0.25}, \text{ če je } \frac{c_u}{\sigma'_v} \geq 1. \quad (2-14)$$

3 STATIČNI OBREMENILNI TEST PILOTOV

Statični obremenilni test se uporablja kot glavni in najpomembnejši preizkus vertikalne nosilnosti pilotov. Rezultat statičnega obremenilnega testa pilotov je krivulja sila – pomik, iz katere se z različnimi interpretacijami nato določi končna nosilnost pilota. Standard SIST EN 1997-1:2005 določa predpise za mejno tlačno odpornost pilotov iz rezultatov statičnih obremenilnih testov.

Izvedba statičnega obremenilnega preizkusa je določena s standardom oSIST prEN ISO 22477-1:2006 : Preizkušanje nosilnih pilotov s statično stiskalno obremenitvijo ter ameriškim standardom ASTM 1143 – 43: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load.

3.1 Zgodovina

Začetki testiranja pilotov glede nosilnosti se pričnejo s prelomom devetnajstega v dvajseto stoletje. V tistem času so se pojavile nove oblike vgradnje ter vrste pilotov, vendar pa niso poznali njihovega načina obnašanja. Zaradi nepoznavanja so se pričeli izvajati prvi statični obremenilni preizkusi. Prvotni statični obremenilni preizkusi so se izvajali s pomočjo žic oziroma vrvi. Žice so bile pritrjene na pilot ter napeljane na jermenice, na določeni točki žice med jermenicama je bil kazalec, ki je prikazoval pomik pilota na gosti mreži oznak. Z leti je potreba po statičnih obremenilnih preizkusih postajala čedalje večja, še posebno zaradi dejstva, da so se izračuni ter dejanske izmerjene vrednosti močno razlikovale. Glavni razlogi za popularizacijo so bili:

- raznolikost temeljnih tal,
- nezaupljivost gradbenih inženirjev v delo izvajalcev,
- neskladnost računskih ter merjenih rezultatov.

3.2 Postopek izvedbe statičnega obremenilnega testa

Izvedba statičnega obremenilnega preizkusa mora biti v skladu s standardom oSIST prEN ISO 22477-1:2006: Preizkušanje nosilnih pilotov s statično stiskalno obremenitvijo ali s standardom ASTM 1143 – 43: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load. V splošnem mora biti izvedba statičnega obremenilnega testa pilotov takšna, da je mogoče iz števila obremenilnih stopenj in trajanja le-teh, pridobiti podatke o deformacijah pri obremenjevanju, razbremenjevanju in lezenju pilota. Pred izvedbo testa morajo biti aparature ustrezno pregledane in umerjene, da ne pride do napak med meritvijo. Izvedba meritev poteka na delovnih ali preskusnih pilotih. Preskusni piloti so narejeni izključno za ustrezno potrditev projektne dokumentacije ali v primerih nepoznavanja temeljnih tal. Statične obremenilne teste na delovnih pilotih se izvaja za kontrolo vgrajenih pilotov, če dosegajo predpisane vrednosti nosilnosti.

3.2.1 Izvedba statičnega obremenilnega testa po standardu ASTM 1143 – 43

Standard je razdeljen na štiri pomembna področja, in sicer:

- izdelava konstrukcije za prevzem reakcijske sile,
- priprava in umeritev merilnih inštrumentov,
- opis različnih vrst obremenjevanja pilota,
- opis različnih metod zbiranja merjenih količin.

Splošna pravila, ki morajo biti izpolnjena pred pričetkom statičnega obremenilnega testa so:

- za izvedbo statičnega obremenilnega testa je potrebna dovolj velika reakcijska sila, da lahko s hidravlično stiskalko pilot obremenimo do porušitve temeljnih tal,
- hidravlična stiskalka naj bo nameščena centralno na os, da se prepreči ekscentričnost,
- glava pilota naj bo pred izvedbo preizkusa primerno obdelana, vodoravna ter brez poškodb, da se zmanjša vpliv ekscentričnosti pri nanosu obtežbe,

- na glavo pilota se položi tanka (minimalno 50 mm) jeklena plošča, ki povzroči, da se obtežba enakomerno porazdeli po premeru pilota ter zavaruje glavo pilota pred poškodbami zaradi hidravlične stiskalke,
- hidravlična stiskalka se položi med jekleno ploščo na spodnjem delu ter jekleno ploščo na zgornjem delu stiskalke.

3.2.1.1 Konstrukcija reakcijske sile

Pilot potiskamo v tla s silo F_{12} , ustvarjeno s hidravlično stiskalko, položeno na glavo pilota. Zakon o vzajemnem učinku (tudi 3. Newtonov zakon ali zakon o akciji in reakciji) pravi, da je vsota vseh sil enaka nič, torej je potrebno sili F_{12} zagotoviti ekvivalentno reakcijsko silo F_{21} . Reakcijsko silo se zagotovi ali z jeklenim nosilcem, pritrjenimi na sosednja sidrna pilota ter izboljšanim profilom na mestu obremenitve ali z veliko maso balasta, naloženega na nevtralne podpore nad glavo pilota. V primeru konstrukcije z jeklenim nosilcem so podane naslednje zahteve:

- pripraviti je potrebno zadostno število sidrnih pilotov, da se doseže potrebna reakcijska sila,
- odmik sidrnih pilotov od testnega pilota naj ne bo nikoli manjši od dveh metrov, običajna je petkratna širina testnega pilota,
- jekleni nosilec se postavi centralno na os pilota ter dodatno ojača, da se prepreči upogib,
- jekleni nosilec se enakomerno pritrdi na vse sidrane pilote, s tem reakcijska sila deluje na vse sidrne pilote enakomerno. Tako se prepreči prekomerno raztezanje pod maksimalno obremenitvijo.

Kadar se izvajajo meritve statičnega obremenilnega preizkusa na mestih, kjer ni izvedenih sidrnih pilotov, se postavi neodvisno konstrukcijo nad glavo pilota, na katero se naloži potrebna masa balasta. Pri postavitvi konstrukcije pa so določene nekatere zakonitosti:

- balast se postavi nad preizkusnim pilotom na platformo, narejeno iz jeklenih I nosilcev. Ta zagotavlja dovolj prostora, da se lahko namesti potrebna oprema za izvedbo statičnega obremenilnega preizkusa (hidravlična stiskalka, merilna oprema),
- balast je postavljen na lesene podstavke, ki morajo biti dovolj odmaknjeni od testnega pilota, najmanj 1,5 m ter dovolj trdni, da se ne deformirajo pod težo balasta,
- balast je lahko kateri koli material, pomembno je le, da je teža balasta od predvidene maksimalne obremenitve testnega pilota večja vsaj za 10 %.

3.2.1.2 Aparature za merjenje pomikov

Za merjenje pomikov se potrebuje pomožne nosilce, ki morajo biti samostojno podprti, neodvisno od podpor za reakcijsko silo. Pomožni nosilci naj bodo dovolj togi, da ne pride do premikov referenčnega nosilca. Merilne urice (kazalniki) naj imajo vsaj 50 mm pomičnega dela ter natančnost 0,25 mm. Vsa merilna oprema naj bo primerno označena in zavarovana pred temperaturnimi spremembami (izpostavljena soncu) ter dobro pritrjena na pilot.

3.2.1.3 Oblike obremenjevanja

Standard ASTM 1143 – 43 opisuje 7 različnih načinov obremenjevanja pilota. Vsak izmed načinov se v praksi lahko izvaja neodvisno od drugega. Oblike obremenjevanja so:

- standardni način obremenjevanja,
- ciklično obremenjevanje,
- obremenjevanje po že opravljenem standardnem načinu obremenjevanja,
- obremenjevanje v konstantnih časovnih intervalih,
- obremenjevanje s konstantno stopnjo penetracije,
- hitri obremenilni preizkus,
- obremenjevanje s konstantnimi prirastki posedkov za samostojne pilote.

Standardni način obremenjevanja je, ko se testni pilot obremeni v korakih po 25% pričakovane mejne obremenitve ter se ga obremenjuje do vrednosti, ki je enaka 200%

vrednosti pričakovane mejne obremenitve. Posamezna stopnja obremenitve se ne vzdržuje dokler posedki niso manjši od 0,25 mm/h, vendar nikoli več kakor 2 uri. V primeru, da ne pride do porušitve testnega pilota, ko nanj deluje zadnja stopnja obremenitve, se pusti takšno obremenitev na pilotu še 12 ur, če so pomiki manjši od 0,25 mm, drugače pa 24 ur. Nato pa se postopoma po korakih, vsako uro po 25 % maksimalne testne obtežbe, odstranjuje. V primeru, da nastopi porušitev, se obremenjevanje pilota nadaljuje do trenutka, ko je posedek enak vsaj 15% premera pilota.

Ciklično obremenjevanje poteka postopoma z bremenski stopnjami po 25 % mejne računske obremenitve pilota, vsakih 20 minut. V prvem koraku se pilot obremeni do vrednosti 50 % mejne računske vrednosti, maksimalna vrednost obremenitve (v tem primeru 50 % mejne računske vrednosti) naj deluje na pilot 1 uro, nato pa se pilot razbremeni z enakimi bremenskimi stopnjami vsakih 20 minut. V drugem koraku se vse ponovi, le da se pilot tokrat obremeni do vrednosti 100 % mejne računske obremenitve ter enako v tretjem koraku, kjer se pilot obremeni do vrednosti 150 % mejne računske obremenitve. Nato pa se pilot obremeni z bremenskimi stopnjami velikosti 50 % mejne računske vrednosti ter ponovi korake 1, 2 in 3.

Obremenjevanje po že opravljenem standardnem načinu obremenjevanja se izvede tako, da se pilot ponovno obremeni do predpisane testne obremenitve po korakih. V vsakem koraku se pilot obremeni s 50 % vrednostjo mejne predpisane računske obremenitve. Obremenitev v posameznem koraku se nanaša na pilot 20 minut. Po razbremenitvi se nato pilot obremeni s 60 % mejne računske vrednosti v vsakem koraku, ki traja 20 minut. Če ne pride do porušitve med preskusom, naj po zadnjem koraku maksimalna obtežba deluje na pilot še 2 uri, nato pa naj se pilot razbremeni v štirih enakomernih korakih, med katerimi naj preteče po 20 minut.

Obremenjevanje v konstantnih časovnih intervalih je enako kakor pri standardnem obremenilnem procesu, vendar se namesto 25 % mejne računske obremenitve, nanaša po 20 % mejne računske obremenitve, in sicer konstantno v eno urnem intervalu. Končna vrednost testne obremenitve je enaka 200 % računske mejne obremenitve. Razbremenjevanje poteka podobno obremenjevanju, in sicer po korakih z 20 % računske obremenitve v eni uri.

Obremenjevanje s konstantno stopnjo penetracije se izvaja samo z hidravličnimi stiskalkami, da je zagotovljena kontinuiteta. Pomični del hidravlične stiskalke mora biti dolg vsaj 25 % premera pilota. V primer video nadzora naj bo vsa merska oprema postavljena v objektiv kamere. Hidravlična stiskalka mora zagotavljati takšno obtežbo, da je penetracija pilota za koherentna tla med 0,25 in 1,25 mm/min ter za nekoherentna tla med 0,75 in 2,5 mm/min. Pilot se obremenjuje zvezno do trenutka, ko ni potrebno povečati obtežbe, da se doseže predpisana penetracija pilota.

Pri hitrem obremenilnem preizkusu za individualne pilote naj se uporablja le obremenilne sisteme s hidravlično stiskalko, da se lahko obtežbo (silo) nanaša enakomerno na pilot. Na pilot se v bremenskih stopnjah nanaša po 10 – 15 % računske nosilnosti pilotov v konstantnih časovnih intervalih velikosti dveh minut in pol. Meritev se izvaja do dosežene mejne obremenitve ali do trenutka, ko so dosežene mejne vrednosti obremenjevalnih aparatov, nato se obremenjevanje prekine. Obtežbo se po koncu obremenjevanja na pilotu zadrži 5 minut, nato pa se pilot razbremeni. Razbremenitev poteka v 4 enakomernih korakih s pet minutnimi intervali.

Obremenjevanje s konstantnimi prirastki posedkov za samostojne pilote je zadnji predpisani način obremenjevanja pilotov. Za dodajanje obtežbe naj se uporablja hidravlična stiskalka. Obtežba se nanaša v bremenskih stopnjah, in sicer tako, da bo povzročala premik noge pilota za 1 % premera pilota. Obtežbo se uravnava, da so posedki v vsakem koraku enakomerni, dodatno obtežbo se dodaja, ko je stopnja variacije obtežbe, ki zagotavlja enakomerno posedanje, manjša od 1 % skupne maksimalne obtežbe v eni uri. Pilot se obremenjuje dokler se ne doseže posedka velikosti vsaj 10 % premera pilota ali dokler niso dosežene mejne vrednosti naprav za obremenjevanje. Po končanem obremenjevanju se obremenitev odstrani v štirih enakomernih korakih. Po prvem koraku razbremenitve se nato počaka z naslednjim korakom, dokler ni stopnja dvigovanja pilota manjša od 0.3 % premera pilota.

Pozor:

- pri zabityh pilotih v koherentnih tleh naj bo čas med koncem zabijanja in pričetkom preskusa vsaj tolikšen, da se zmanjšajo pritiski porne vode ob pilotu,

- za pilote, betonirane na mestu, pa naj se preizkus naredi po pretečenem času, ki zagotavlja, da beton dobi potrebno trdnost.

3.2.1.4 Zbiranje merjenih količin

Odvisno od vrste obremenjevanja se tudi merjene količine zbirajo različno. Opisane so metode za zbiranje merjenih podatkov pri:

- standardnem obremenilnem testu,
- obremenjevanju z metodo konstantne stopnje penetracije,
- hitrem obremenilnem testu,
- obremenjevanju s konstantnimi prirastki posedkov za samostojne pilote.

Pri standardnem obremenilnem testu se zbira merjene podatke časov, posedkov in obremenitve pred in po nanosu posamezne bremenske stopnje, tako pri obremenjevanju, kakor pri razbremenjevanju preskusnega pilota. Med obremenjevanjem se dodatno zbirajo merjeni podatki, s katerimi spremljamo možno porušitev nosilnosti, in sicer sprva na vsakih 10 minut, po 30 minutah, pa na vsakih 20 minut. Po nanosu maksimalne obremenitve se merjene podatke zapisuje vsakih 20 minut znotraj prvih dveh ur, nato pa na 1 uro. Po preteku 12 ur od nanosa maksimalne obtežbe se merjene podatke zapisuje na vsake 2 uri. Ob porušitvi se zapišejo končni merjeni podatki, nato se prične razbremenjevanje. Med razbremenjevanjem se merjeni podatki zapisujejo na vsakih 20 minut. Zadnji podatki se zapišejo 12 ur po končanem testu.

Pri obremenjevanju s konstantno penetracijo se meritve podatkov časa, posedka in obtežbe zapisuje na vsakih 30 sekund, da se določi kolikšna stopnja penetracije je bila dosežena. Ko je dosežena predpisana stopnja penetracije se merjene podatke zbira še do konca obremenjevanja, da se določi maksimalna obtežba. Po razbremenitvi se zapišejo meritve časa, obtežbe in dvižkov. Končni zapis meritev se opravi eno uro po končanem preizkusu.

Pri hitrem obremenilnem testu za individualne pilote se zapisuje meritve o času, obtežbi in posedku pred in po vsaki bremenski stopnji ter dodatno še med bremenskimi stopnjami. Po nanosu zadnje bremenske stopnje se zapišejo končne meritve ter čas, kdaj se obremenjevanje ustavi. Po ustavitvi obremenjevanja se merjene podatke zapiše še po dveh minutah in pol ter po 5 minutah od zaustavitve obremenjevanja. Ob razbremenitvi pilota se zapišejo dvižki in čas razbremenitve.

Pri obremenjevanju s konstantnimi prirastki posedkov za samostojne pilote se merjene podatke o času, obtežbi in posedkih zapisuje pred in po vsaki spremembi posedka. Posebna merjenja se izvajajo med posameznimi koraki, in sicer se določi spreminjanje obremenitve, ki je potrebna za enakomerno posedanje. Enako se zapisujejo merjeni podatki o času, obtežbi in dvižkih med razbremenjevanjem pilota. Končni zapis merjenih podatkov se opravi 12 ur po končanem testu.

3.3 Izračun nosilnosti iz grafa obtežba – pomik

Za določitev mejne nosilnosti iz krivulje obtežba – pomik so v preteklosti različni avtorji razvili več pristopov. Omejili smo se na najpomembnejše štiri kriterije, ki so:

- DIN 4026,
- Mastronuomo,
- Davisson (ASTM predpisi),
- metoda Evrokoda.

3.3.1 Metoda DIN 4026

Nosilnost se določi iz grafa obtežba – pomik, kamor se nanese krivulja, dobljena iz obremenilnega testa. Mejna nosilnost po tej metodi se smatra tista, ki opravi stalni (plastični) posedek v velikosti $0,025 D$, kjer je D premer pilota, oziroma dolžina stranice kvadratnega pilota.

$$\rho_n = 0.025 D \quad (3-1)$$

Mejna nosilnost se na krivulji, pridobljeni med obremenilnim testom določi tako, da se poišče tista obremenitev, ki bi ji v prej omenjeni krivulji ustrezal trajni (neelastični) posedek v velikosti 0,025 D.

3.3.2 Metoda Mastrontuomo

Metoda temelji na predpostavki, da je krivulja v grafu obtežba – pomik, dobljena pri obremenilnem preskusu, takšna, da ustreza hiperbolični povezavi. Takšna zakonitost pogosto velja med napetostmi in deformacijami valjastih vzorcev, ki jih preiskujemo v triosnih aparatih:

$$\sigma_1 - \sigma_3 = \frac{\varepsilon_1}{a + b \varepsilon_1}. \quad (3-2)$$

Po analogiji velja:

$$P = \frac{u}{a + b u}, \quad (3-3)$$

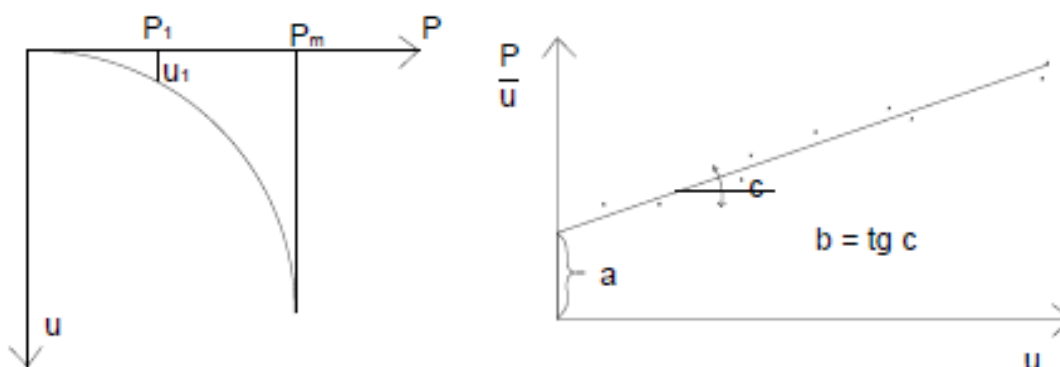
$$\sigma = \frac{P}{A'}, \quad (3-4)$$

$$\varepsilon = \frac{u}{L'}, \quad (3-5)$$

$$\sigma = E \varepsilon, \quad (3-6)$$

kjer sta a in b konstanti.

Če krivuljo narišemo tako, da na eno os nanašamo posedek u, na drugo os pa količnik P/u, se hiperbolični odnos med P in u preslika v linearno razmerje med P/u in u.



Slika 5: Preslikava hiperbolične krivulje v linearno premico

Ko je dosežena porušitev temeljnih tal, začno naraščati posedki pri nespremenjeni obremenitvi s pospeškom. Če enačbo (3-3) delimo s posedkom u in upoštevamo neskončno vrednost za posedek dobimo:

$$P_{max} = \frac{\frac{u_{max}}{u_{max}}}{\frac{a}{u_{max}} + \frac{b u_{max}}{u_{max}}} = \frac{1}{b} \quad (3-7)$$

3.3.3 Metoda Davissona

Določi se (elastična) premica pilota z enačbo:

$$u_{ul} = \frac{P L}{A E'} \quad (3-8)$$

kjer so P poljubna sila, L dolžina pilota, A prečni prerez in E elastični modul pilota. Premica se v grafu obtežba - pomik vzporedno premakne za posedek, ki se ga določi z enačbo:

$$u_{ult} = 0,15 + 0,1 D. \quad (3-9)$$

Pomembno je, da se enote za premer pilota podaja v angleških enotah »feet«, rezultat za u_{ult} pa je podan v angleških enotah »inches« in velja:

1 foot = 12 inches = 30,479 cm,

1 inch = 2,53995 cm.

Nosilnost je določena s presečiščem za predpisani premik premaknjeno »elastično premico« s krivuljo dobljeno med meritvijo $u = u(P)$.

3.3.4 Metoda Evrokoda

Z metodo Evrokoda mejno nosilnost pilota iz rezultatov statičnega obremenilnega testa določimo iz grafa obtežba – pomik, in sicer je mejna nosilnost enaka pomiku $D/10$, kjer je D premer pilota.

3.4 Karakteristična tlačna odpornost pilota po standardu SIST EN 1997-1:2005

Standard SIST EN 1997-1:2005: Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – 1. del: Splošna pravila, v poglavju 7.6.2.2: Mejna tlačna odpornost iz statičnih obremenilnih testov natančno opredeljuje pravila izračuna karakteristične tlačne odpornosti. S statičnim obremenilnim testom izmerimo mejno vrednost tlačne odpornosti in jo označimo z $R_{c,m}$. Karakteristično tlačno odpornost pilota se določi po enačbi:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mean}}{\xi_1}, \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_2} \right\}, \quad (3-10)$$

$$(R_{c,m})_{mean} = (\sum_{i=1}^n R_{c,m;i})/n, \quad (3-11)$$

$$(R_{c,m})_{min} = \min \{R_{c,m;i}\}. \quad (3-12)$$

Enačbi (3-11) in (3-12) predstavljata srednjo in najmanjšo vrednost iz statičnih obremenilnih preizkusov na lokaciji. Korelacijska faktorja ξ_1 in ξ_2 sta odvisna od števila statičnih obremenilnih preizkusov na lokaciji. Vrednosti korelacijskih faktorjev so določene v standardu SIST EN 1997-1:2005 v tabeli A.9. Preglednica 5 prikazuje korelacijski faktorje za

primer gibkih konstrukcij. Če so objekti togi, se lahko korelacijske faktorje deli z vrednostjo 1,1. Pomembno je le, da korelacijski faktorji niso nikoli manj kot 1,0.

Preglednica 4: Korelacijski faktorji za izračun karakteristične vrednosti na podlagi statičnih obremenitvenih preskusov pilotov (n – število preskusnih pilotov)

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

4 DINAMIČNI OBREMENILNI TEST PILOTOV

Dinamični obremenilni test je alternativa statičnemu obremenilnemu testu, saj končni rezultat predstavlja statično nosilnost testiranega pilota. Izvedba dinamičnega obremenilnega testa je razdeljena na dve fazi. Prva faza je izvedba meritev z analizatorjem PDA (Pile Dynamic Analyzer) med udarcem pilota z utežjo. Na podlagi rezultatov analizatorja PDA sledi druga faza, to je določitev statične nosilnosti pilota z računalniškim programom CAPWAP (CAsE Pile Wave Analysis Program). Standard SIST EN 1997-1:2005 navaja predpise za mejno tlačno odpornost pilotov iz rezultatov dinamičnih obremenilnih testov. Izvedba dinamičnega obremenilnega preizkusa je določena s standardom ASTM D4945, Standard Test Method for High – Strain Dynamic Testing of Piles.

4.1 Zgodovina

S pričetkom gradnje pilotov se je pričelo zanimanje inženirjev za določitev obnašanja pilota pred in med samim procesom vgradnje. Prvotni izračuni nosilnosti pilota so temeljili na osnovnih Newtonovih enačbah, kar pa ni omogočalo natančne določitve nosilnosti. Uporabo enodimenzionalne valovne enačbe za določitev obnašanja pilota je prvi predstavil St. Venant, kasneje pa sta Isaacs in Fox predstavila rešitve enodimenzionalne valovne enačbe za posamezne primere pilotov. Vendar splošne rešitve ni bilo lahko določiti zaradi zapletenih vhodnih in robnih podatkov. V petdesetih letih dvajsetega stoletja so digitalni računalniki omogočili reševanje enodimenzionalne valovne enačbe. Leta 1960 je E.A. Smith za zabite pilote predstavil algoritem oziroma računalniško kodo, poznano pod imenom »wave equation analysis«. Algoritem predstavlja osnovo za kasnejši razvoj dinamičnega obremenilnega preizkusa.

Prve meritve valovanja v pilotih je leta 1938 izvajal Glanville, in sicer s piezoelektričnimi merilci sile za določitev napetosti betonskega pilota med vgradnjo z zabijalom. Podrobnejši razvoj dinamičnega obremenilnega preizkusa se je leta 1960 pričel v Združenih državah Amerike, in sicer zaradi želje po poznavanju uspešnosti zabijalnega mehanizma. Leta 1964 je bil na Case Institute of Tehnology, ki se nahaja v mestu Cleveland, v zvezni državi Ohio,

ZDA, ustanovljen raziskovalni program z namenom izdelave ekonomično-praktičnega prenosljivega sistema za določitev končne statične nosilnosti pilota, iz merjenih podatkov sile in hitrosti ob udarcu zabijala na pilot. Rezultat raziskav je tako imenovana metoda Case Method, ki se jo na terenu izvaja s opremo Pile Driving Analyzer (PDA). Med to raziskavo je bila razvita tudi programska oprema CAPWAP. Programska oprema CAPWAP analizira merjene terenske podatke, tako da jih združi s primerno valovno enačbo ter izračuna končno nosilnost pilota, porazdelitev odpornosti zemljine po plašču in dinamično odzivnost pilota.

4.2 Izvedba dinamičnega obremenilnega testa

Izvedba dinamičnega obremenilnega testa je določena s standardom ASTM D4945, Standard Test Method for High – Strain Dynamic Testing of Piles, ki ga upošteva tudi evropski standard Evrokod 7-1. Standard opisuje inštrumente za izvedbo testa in način pritrditve merilcev na pilot, medtem ko je sama meritev hipna in posneta z analizatorjem PDA. Za izvedbo dinamičnega obremenilnega testa so potrebni štiri različni mehanizmi, to so:

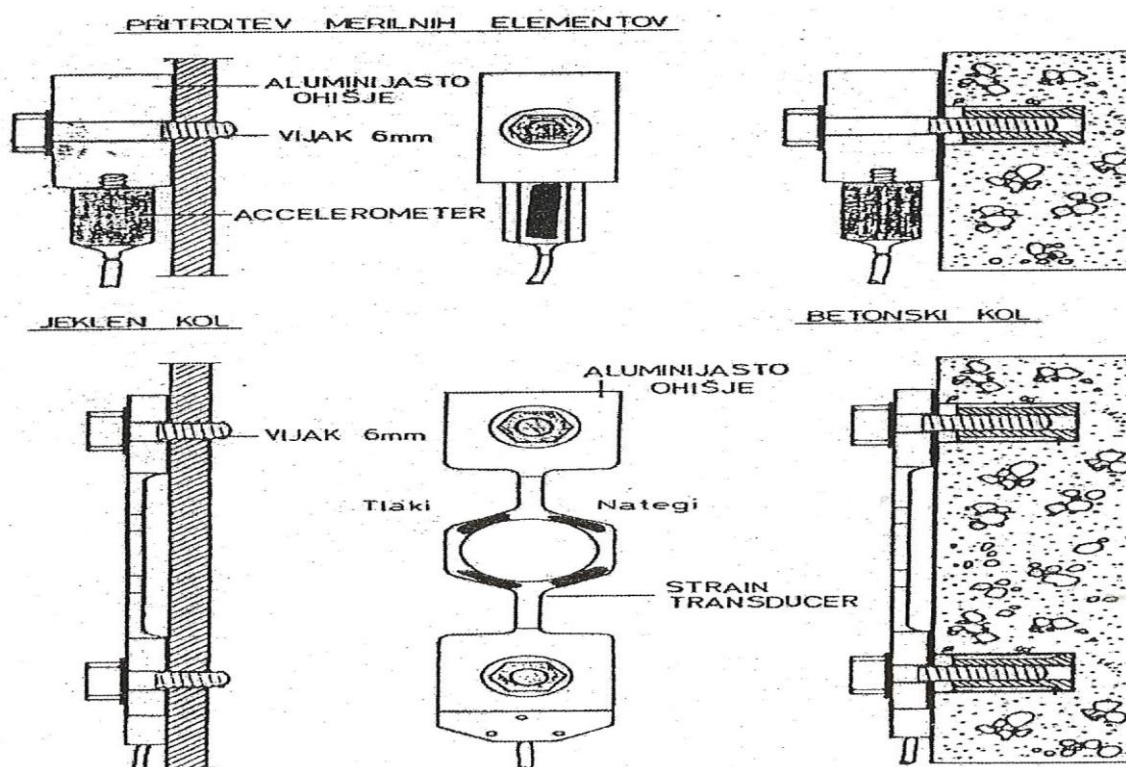
- mehanizem za nanos udarne sile,
- merilci sil in hitrosti ob udarcu uteži na pilot,
- pripadajoča oprema za izvedbo,
- analizator za beleženje signala merilcev in shranjevanje podatkov.

4.2.1 Mehanizem za nanos udarne sile

Mehanizem za nanos udarne sile je lahko delovni stroj, uporabljen za vtiskanje pilota v temeljna tla ali posebni mehanizem, narejen zgolj za udarec pilota z udarno utežjo. Zabijalni bagri so lahko dizelski ali hidravlični, vendar ne smejo biti vibracijski. V primeru, da zabijalnega stroja ni na gradbišču, se uporabljajo samostojni mehanizmi za nanos udarne sile. Samostojni mehanizmi morajo biti narejeni tako, da je padeč uteži centralen na os pilota ter je med vodilom in drogovjem ničelno ali minimalno trenje. Zabijalo ali utež mora zagotoviti zadostno silo, takšno, da je sposobna zagotoviti zadostno mrežo merljivih penetracij kola.

4.2.2 Merilci sil in hitrosti

Na pilot se namesti dve vrsti merilnikov, in sicer merilnike deformacij ter merilnike pospeškov v odvisnosti od časa. Na pilot se merilnike pritrди tako, da so preprečeni morebitni zdrsi, najbolj zanesljivi načini pritrditve so varjenje, vijachenje, lepljenje merilnikov na pilot. Na pilot se pritrди minimalno po dva merilnika pospeškov in sile, in sicer na vsako stran pilota en merilnik pospeškov in en merilnik deformacij. Pritrditev merilnikov prikazuje slika 6.



Slika 6: Pritrditev merilcev za izvedbo dinamičnega obremenilnega testa na pilot (Vir: Strniša, G. 1998. Pilotiranje , dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP)

Merilniki naj bodo pritrjeni na enaki razdalji od jedra pilota na nasprotnih straneh in na enaki razdalji od osi pilota, da meritve upoštevajo upogibanje kola. Odmik od vrha pilota naj bo vsaj za višino premera in pol pilota. Merilniki morajo biti dobro pritrjeni na pilot, da ne bo zdrsov ter slabih meritev. Kalibrirani naj bodo na 3 % natančnosti. Če se med testom pričakuje poškodovanje, naj se kalibracija po testu ponovi.

Merilniki sile naj imajo linearen rezultat za vse možne različne pomike. Ko so priključeni na pilot, naj bo njihova naravna frekvenca v območju okoli 2000 Hz. Izmerjen pomik se preračuna v silo z uporabo prečnega prereza (A) in dinamičnega modula elastičnosti na izmerjeni lokaciji. Dinamični modul elastičnosti naj bo v razponu med 200 do 207 GPa za jeklo. Modul elastičnosti za beton, les ali jeklo se izračuna po enačbi:

$$E = c^2 \rho, \quad (4-1)$$

kjer je:

- E - modul elastičnosti pilota,
- c – valovna hitrost pilota,
- ρ - gostota pilota.

Merilniki pospeškov merjeni signal prenesejo v aparat, namenjenem za zbiranje podatkov in analiziranje. Pospeškometer naj bosta linearna vsaj do 1000 g in 1000 Hz za zadovoljive rezultate na betonskih kolih. Za jeklene kole pa je smotrno uporabiti merilnike, ki so linearni do vrednosti 2000 g in 2000 Hz

4.2.3 Pripadajoča oprema za izvedbo

Dobrodošla je neodvisna oprema za merjenje posedka glave pilota. V splošnem se uporablja nivelir, ki meri pomik glave pilota. V ta namen se na glavo pilota prilepi ali nariše milimetrsko mrežo. Test je dobrodošlo spremljati tudi z video nadzorom. Bistvena pripadajoča oprema so kabli, ki povezujejo merilnike in analizator. Kable je potrebno ustrezno zaščititi pred tresljaji, ki nastopijo ob udarcu zabijala.

4.2.4 Analizator za beleženje signala merilcev in shranjevanje podatkov

Analizator mora zagotavljati spremembo linearnih merjenih podatkov v analogne podatke ter jih sproti prikazati na zaslonu. V primeru eksperimenta se je uporabila merilna oprema ameriškega proizvajalca PDI, in sicer analizator PDA (Pile Driver Analayze).

4.3 Analizator PDA

Analizator PDA je napreden elektronski inštrument, izdelan v podjetju Pile Dynamics. Inc., s sedežem v mestu Cleveland, ZDA. Je bistven za določevanje, obdelavo in shranjevanje merjenih podatkov po udarcu uteži. Analizator PDA se deli na PDA-L in PDA-R. PDA-L je kratica, ki pomeni, da je analizator nameščen na prenosni napravi PAX, ki je sestavljena iz elektronskih ojačevalcev, elektronskih filtrov, analogno digitalnih pretvornikov ter računalnika s trdim diskom in dodanim operacijskim sistemom Windows XP. Analogna signala deformacij in pospeškov se v prenosni napravi PAX elektronsko ojačata, filtrirata ter v primeru analognega signala pospeškov še integrirata. Ko je proces končan, se analogni signali digitalizirajo, frekvenco digitalizacije se določi pred izvedbo testa. Frekvenca je odvisna od tipa in dolžine pilota, giblje se med razponom 4000 do 20000 Hz. Drugi način namestitve analizatorja je na prenosni računalnik, ki je brezžično povezan s prenosno napravo PAX.

Analizator prikaže ob vsakem udarcu zabijala takojšen poteka sile in hitrosti merskega mesta v odvisnosti od časa. Prikaže tudi velikost in obliko gor in dol potujočega vala v pilotu. Poleg tega analizator poda še nekatere pomembne rezultate, vendar so omejeni na mersko mesto. Pomembnejši rezultati so:

- maksimalna sila,
- maksimalni hitrost,
- maksimalni pomik,
- maksimalna prenesena energija,
- maksimalna tlačna napetost,
- maksimalna natezna napetost.

4.4 Valovna analiza

Valovna analiza predstavlja osnovno teoretično ozadje za analizo dinamičnega obremenilnega testa. Valovna enačba izračuna končno nosilnost pilota iz meritev potovanja valov po pilotu povzročenih ob udarcu uteži. Z uporabo valovne enačbe za izračun nosilnosti pilota se je davnega leta 1960 pričel ukvarjati E.A. Smith.

4.4.1 Izpeljava valovne enačbe

Izpeljava osnovne valovne enačbe na prosti palici, brez upoštevanja odpornosti:

$$F = m a, \quad (4-2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial x} dx = m \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}, \quad (4-3)$$

$$F = \sigma A = \varepsilon E A = \frac{\partial u}{\partial x} E A, \quad (4-4)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} E A dx = A \rho \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} dx, \quad (4-5)$$

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}. \quad (4-6)$$

Kjer so:

- u – pomik točke,
- E – modul elastičnosti zemljine,
- ρ – gostota zemljine,
- a – pospešek,
- m – masa,
- ε – deformacija,
- t – čas,
- x – koordinata točke .

Ob upoštevanju odpornosti tal R_d zapišemo splošno valovno enačbo v naslednji obliki:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + R_d = 0. \quad (4-7)$$

Valovna enačba je sestavljena iz parcialnih odvodov in rešitev je oblike:

$$u = g(x - ct) + f(x + ct), \quad (4-8)$$

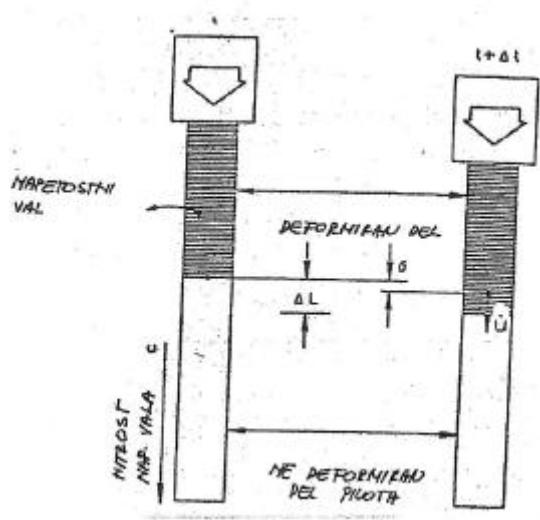
kjer $g(x - ct)$ predstavlja pozitivno potujoč val po pilotu navzdol ter $f(x + ct)$ predstavlja negativni val, ki potuje po pilotu navzgor. Val po pilotu potuje z valovno hitrostjo c , ki je v celoti odvisna od materialnih lastnosti pilota.

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (4-9)$$

kjer je:

- E - elastični modul materiala,
- ρ - gostota materiala.

Ob poznavanju valovne hitrosti lahko določimo sile dol in gor potujočih valov. To lahko naredimo s pomočjo proporcionalnosti:



Slika 7: Proporcionalnost (Vir: Strniša, G. 1998. Pilotiranje, dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP)

$$\Delta L = c \Delta t, \quad (4-10)$$

$$\varepsilon = \frac{\delta}{\Delta L} = \frac{\delta}{c \Delta t}. \quad (4-11)$$

Velja:

$$\frac{\delta}{\Delta t} = \dot{u}, \quad (4-12)$$

$$\sigma = E \epsilon, \quad (4-13)$$

$$F = A \sigma. \quad (4-14)$$

Če vstavimo enačbo (4-11) v enačbo (4-10) ter nato enačbo (4-10) v enačbo (4-12) in le to v enačbo (4-13), dobimo enačbo, s katero izrazimo silo gor in dol potujočih napetostnih valov:

$$F = \frac{EA}{c} \dot{u} = Z \dot{u}. \quad (4-15)$$

Faktor Z , ki nastopa v enačbi (4-14), predstavlja impedanco ali valovno odpornost materiala. Prvi odvod pomika \dot{u} predstavlja hitrost gibanja delcev v pilotu. Dol potujoči val potuje s silo F_{dol} , medtem ko gor potujoči val potuje s silo F_{gor} .

$$Z = EA/c, \quad (4-16)$$

$$F_{dol} = Z v/2, \quad (4-17)$$

$$F_{gor} = -Z v/2, \quad (4-18)$$

kjer je:

- v – hitrost gibanja delcev v pilotu.

Skupna sila ali hitrost na kateri koli točki pilota je rezultat superpozicije dol in gor potujočih valov.

$$F = F_{dol} + F_{gor} \quad (4-19)$$

$$v = v_{dol} + v_{gor} \quad (4-20)$$

Iz enačb (4-17) do (4-20) dobimo enačbi za sile v gor in dol potujočih napetostnih valovih, $F_{dol}(t)$ in $F_{gor}(t)$, v končnem elementu i .

$$F_{dol,i}(t) = (F_i(t) + Z_i v_i(t))/2 \quad (4-21)$$

$$F_{gor,i}(t) = (F_i(t) - Z_i v_i(t))/2 \quad (4-22)$$

Povedano z besedami, če poznamo hitrost in silo v vsaki točki pilota, lahko določimo sile dol in gor potujočih valov.

V primeru, da na pilot ne deluje nobena odpornostna sila R in je pilot enoten po celotni globini, velja:

$$F_{gor,i}(t+1) = F_{gor,i+1}(t), \quad (4-23)$$

$$F_{dol,i}(t+1) = F_{dol,i-1}(t). \quad (4-24)$$

V primeru različnih prečnih premerov končnih elementov i to vpliva na impedanco Z , pri tem je potrebno upoštevati odboje valov zaradi spremembe prečnega prereza:

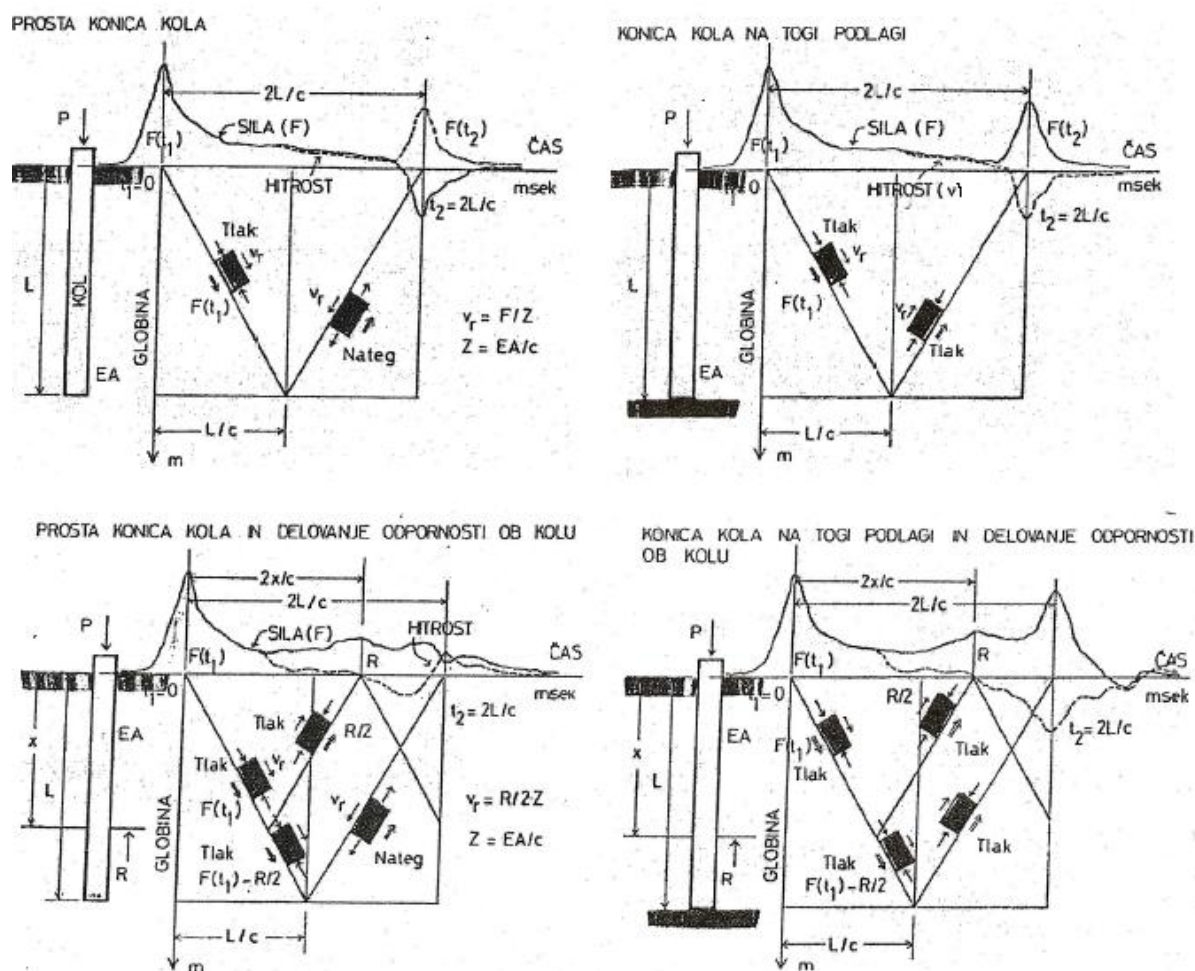
$$Z_{a,i} = \frac{Z_i}{(Z_i + Z_{i+1})}, \quad (4-25)$$

$$Z_{b,i-1} = \frac{Z_i}{(Z_i + Z_{i-1})}. \quad (4-26)$$

Končne enačbe za sile napetostnih valov v končnem elementu i , v primeru neenotnega pilota in delovanju odpornostne sile R , so oblike:

$$F_{dol,i}(t+1) = Z_{b,i}(2F_{dol,i-1}(t) - F_{dol,i}(t) - R) + Z_{a,i} F_{gor,i}(t), \quad (4-27)$$

$$F_{gor,i}(t+1) = Z_{a,i}(2F_{gor,i+1}(t) - F_{dol,i}(t) + R) + Z_{b,i+1} F_{dol,i}(t). \quad (4-28)$$



Slika 8: Potovanje valov po pilotu (Vir: Strniša, G. 1998. Pilotiranje, dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP)

Slika 8 prikazuje merjenje sile in hitrosti potovanja valov po pilotu v časovnem intervalu od 0 pa do $2L/c$ za različne primere. $2L/c$ predstavlja čas, ko se prvotni tlačni val odbije od konice pilota in pride nazaj na mersko mesto. Slika 8 je razdeljena na 4 različne grafe, ki prikazujejo potovanje valov po enotnem pilotu v različnih tleh. Zgornji levi graf opisuje gibanje valov v pilotu, ki ima prosto konico ter nanj ne deluje nobena odpornostna sila. Zgornji desni graf opisuje primer gibanja valov v pilotu, ki se z konico dotakne nosilne plasti ter nanj ne deluje nobena druga odpornostna sila. Spodnji levi graf opisuje potovanje valov v pilotu s prosto konico, vendar na pilot deluje odpornostna sila na globini x od mesta meritve. Spodnji desni graf opisuje potovanje valov v pilotu, ki se s konico dotika nosilnega sloja ter nanj deluje tudi odpornostna sila na globini x od mesta meritve. Graf sestavljata spodnji in zgornji del. Zgornji

del prikazuje teoretični prikaz sile in hitrosti v odvisnosti od časa, ki ga prikaže tudi analizator PDA po udarcu uteži. Spodnji del pa pojasnjuje, zakaj na nekem končnem elementu pilota dobimo takšen prikaz. Če se opredelimo zgolj na spodnji del grafa posameznega primera, opazimo:

- L/c je čas, v katerem napetostni val pride do glave od noge pilota,
- $2x/c$ je čas, ki ga potrebuje napetostni val, da pride na izhodišče v primeru, da na globini x deluje odpornostna sila R ,
- pobarvani kvadrat v grafu predstavlja končni element pilota,
- puščica pod kvadratom predstavlja smer potovanja napetostnega vala,
- puščici na sredini kvadrata predstavljata sile, ki delujeta na končni element, in sicer, če sta puščici obrnjeni proti kvadratu, nanj deluje tlačna sila, v primeru, da sta puščici obrnjeni stran od kvadrata, potem na pilot deluje natezna sila,
- puščica nad kvadratom, ki ima zraven pripisano vrednost V_r , prikazuje smer hitrosti gibanja delcev pilota.

Bistvene ugotovitve:

- udarce uteži ustvari tlačni napetostni val, ki potuje proti nogi pilota in hitrost delcev V_r ima isto (pozitivno) smer gibanja,
- v primeru proste noge (konice) pilota, se napetostni val po času L/c spremeni iz tlačnega v nateznega, smer hitrosti gibanja delcev se ne spremeni,
- v primeru vpetega pilota v temeljna tla se sila po odboju ne spremeni in ostaja tlačna, spremeni pa se smer hitrosti gibanja delcev, ki postane negativna,
- v primeru odpornostne sile se pojavita dva napetostna vala, eden potuje proti glavi pilota in drugi proti nogi pilota,
- če odpornostna sila prične delovati na dnu pilota ob času $t = L/c$, bo gor potujoči val tlačni in delci se bodo gibali s hitrostjo $V_r = -R/Z$.

Če na dolžini x od vrha pilota deluje odpornostna sila R , bo po času $t = x/c$ prvotni napetostni tlačni val (dol potujoči) dosegel odpornostno silo. Poleg obstoječega vala se ustvarita še dva

nova odpornostna napetostna vala z velikostjo $R/2$, ki potujeta v nasprotnih smereh. Gor potujoči napetostni val deluje tlačno, medtem ko dol potujoči napetostni val deluje natezno. Hitrost gibanja delcev je definirana kot $V_r = R/2 Z$ in ima negativno smer v obeh primerih. Če predpostavimo prosto glavo pilota, se sile izničijo ter se gor potujoči tlačni odpornostni val spremeni v dol potujoči natezni val z dvojno hitrostjo delcev.

Če odpornostna sila R deluje konstantno med časom $x/c \leq t \leq L/c$, potem merjeni količini sile in hitrosti vsebujeta vplive:

- gor potujočega nateznega vala, ki se je odbil od prvotnega tlačnega vala in ga zapišemo kot $(-F_{dol}(t_1))$,
- vsote vseh gor potujočih tlačnih odpornostnih valov ($R/2$),
- prvotnega nateznega odpornostnega dol potujočega vala, ki sedaj potuje gor v tlaku po odboju in ima magnitudo ($R/2$) ter prispe na vrh pilota istočasno s silo $F_{dol}(t)$,
- vseh dol potujočih valov ($F_{dol}(t_2)$).

Sila ob času $t_2 = t_1 + 2L/c$ je vsota teh efektov:

$$F(t_2) = F_{dol}(t_2) + \frac{R}{2} + \frac{R}{2} + (-F_{dol}(t_1)) = F_{dol}(t_2) + F_{gor}(t_2), \quad (4-29)$$

$$F_{gor}(t_2) = R - F_{dol}(t_1), \quad (4-30)$$

$$R = F_{dol}(t_1) + F_{gor}(t_2), \quad (4-31)$$

$$R = \frac{1}{2} (P(t_1) + Zv(t_1) + F(t_2) - Zv(t_2)). \quad (4-32)$$

4.4.2 Smithova rešitev valovne enačbe

Kakor smo omenili, se je E.A. Smith prvi podrobneje ukvarjal z uporabo valovne enačbe pri reševanju določitve nosilnosti pilota. Izdelal je idealizirani model dejanskega pilota, prikazuje ga slika 9, v katerem je pilot razdelil na končne elemente, medsebojno povezane z vzmetmi. Vsakemu končnemu elementu se določi masa in konstanta togosti vzmeti. Na koncu je prišel

do 5 enačb, s katerimi rešimo valovno enačbo in določimo končno nosilnost pilota. Te enačbe so naslednje:

$$D_{m,t} = D_{m,t-1} + V_{m,t-1} \Delta t, \quad (4-33)$$

$$C_{m,t} = D_{m,t} - D_{m+1,t}, \quad (4-34)$$

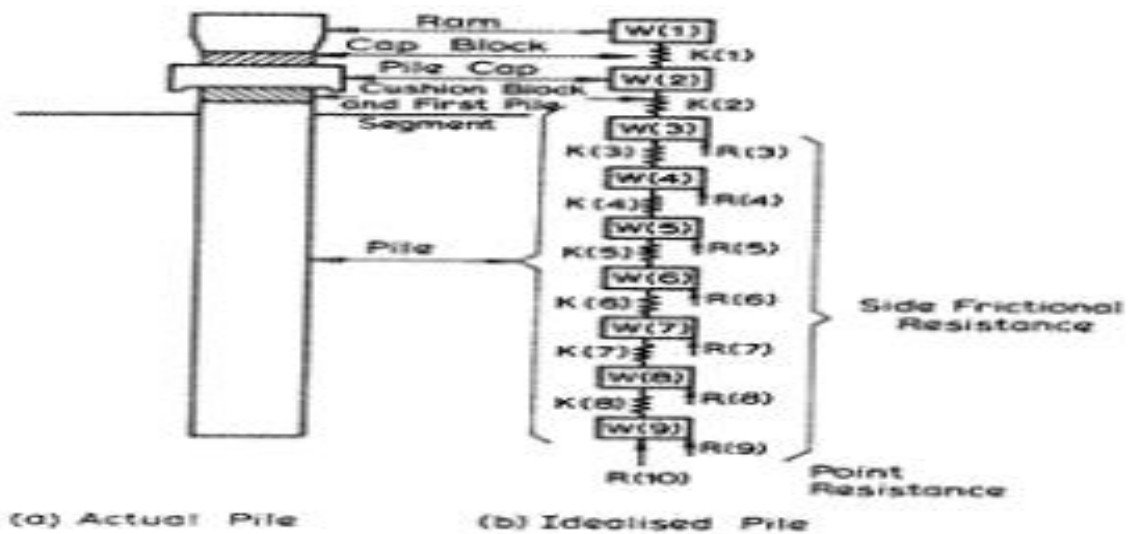
$$F_{m,t} = K_m C_{m,t}, \quad (4-35)$$

$$R_{m,t} = F_{m-1,t} - F_{m,t} + R', \quad (4-36)$$

$$V_{m,t} = V_{m,t-1} + (R_{m,t} \Delta t g) / W_m. \quad (4-37)$$

Kjer so:

- $D_{m,t}$ = pomik elementa m ob času $t = t$,
- $D_{m,t-1}$ = pomik elementa m ob času $t = t-1$,
- $C_{m,t}$ = skrčenje vzmeti m ob času $t = t$,
- K_m = togost vzmeti pilota (vključuje kapo, dušilni material zabijala, udarno ploščo),
- $F_{m,t}$ = sila vzmeti elementa m ,
- R' = odpornost tal, vključno s vplivom dušenja,
- $R_{m,t}$ = končna odpornostna sila,
- $V_{m,t}$ = hitrost elementa m ob času $t = t$,
- W_m = teža elementa m ,
- g = gravitacijski pospešek,
- Δt = časovni interval.



Slika 9: Smithov model pilota za reševanje valovne enačbe (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland, Pdi)

4.5 CAPWAP analiza

Program CAPWAP (CAse Pile Wave Analysis Program) je napreden analitični program, izdelan za izračun odpornostnih sil zemljine in njihove porazdelitve po plašču ter nogi pilota. Program so razvili na Case Western Reserve University (Cleveland), v preteklosti Case Institut of Technology, v Združenih državah Amerike. Torej CAPWAP je signalno primerjalni program, ki z valovno enačbo na vgrajenem modelu pilota in tal, opravlja primerjavo merjenih in računanih krivulj sile, hitrosti in potovanja valov. Rezultati analize s programom CAPWAP so:

- končna statična nosilnost pilota,
- odpornost zemljine po plašču ter odpornost zemljine na nogi pilota,
- elastična deformacija zemljine,
- dušenje zemljine ob plašču pilota,
- graf obtežba – pomik.

Za določitev rezultatov iz merjenja deformacij in pospeškov na glavi pilota, ki jih analizator transformira v sile in hitrosti merjenega mesta v odvisnosti od časa, sta v programu CAPWAP vključena dva matematična modela, ki modelirata pilot ter tla. Z matematičnima modeloma

čim boljše opišemo dejansko stanje, saj se analiza izvaja opisanem modelu. Matematična modela se med analizo lahko spreminjata. S pomočjo algoritmov, vgrajenih v program, po korakih pridobimo najboljšo rešitev. Rezultat na koncu analize predstavlja mejno nosilnost pilota, vendar pa moramo pri rezultatu upoštevati sledeče predpostavke:

- Capwap izračuna nosilnost za čas dinamičnega preizkusa,
- rezultati analize so tako dobri, kakor so dobre meritve na terenu.
- Ali je model pilota zadovoljivo opisan?
- Ali je bila energija zadostna za premik pilota?
- Ali so rezultati statičnega odpora zemljine realistični?
- Ali je primerjava krivulj zadovoljiva?

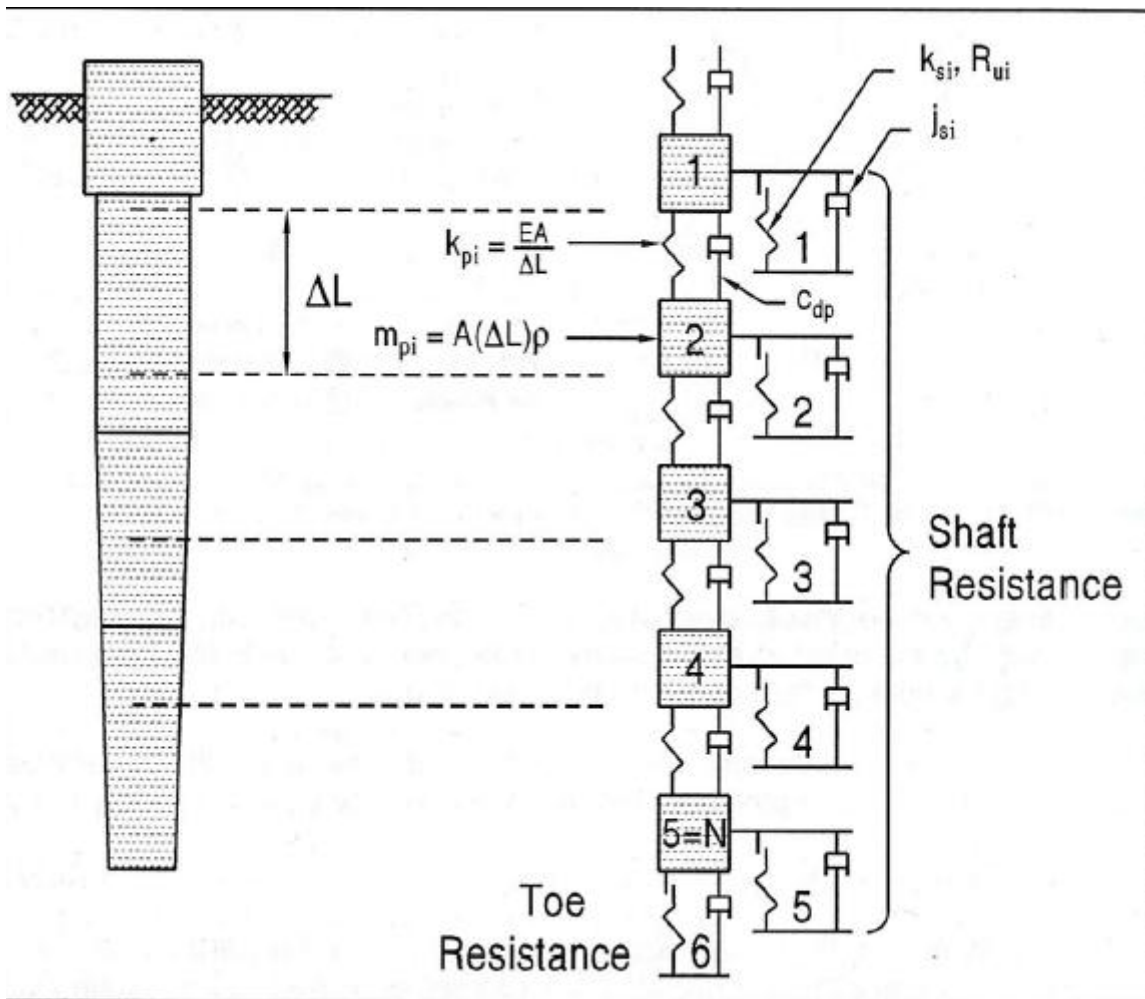
4.5.1 CAPWAP-ov model pilota

Pilot se opiše z modelom tako, da se ga razdeli na končne elemente dolžine ΔL . Vhodni podatki, ki določijo model pilota so:

- elastični modul materiala (E),
- prečni prerez pilota (A),
- gostota materiala (ρ).

Dolžina končnih elementov je v splošnem enaka enemu metru, vendar le v primeru enotnega pilota po vsej dolžini. V primeru neenotnega pilota lahko materialne in geometrijske karakteristike določimo za vsak končni element posebej. Iz vhodnih podatkov se določijo naslednje karakteristike pilota:

- valovna hitrost elementa i (c_i),
- dolžina končnega elementa i (ΔL_i),
- impedanca ali upornost materiala na spremembo hitrosti delcev (Z_i),
- togost elementa i (k_i),
- maso končnega elementa i (m_i).



Slika 10: Grafični prikaz model pilota v programu CAPWAP (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland. Pdi)

Program CAPWAP pri izračunu krivulj sile na idealiziranem modelu upošteva valovno analizo predstavljeno v zgornjem poglavju. S tem, ko določimo geometrijske in materialne karakteristike pilota, program na principu enačb valovne analize računa vrednosti sile in hitrosti napetostnega valu na vsakem elementu i ob nekem času (t). Enačbe so rezultat super pozicije, saj v vsakem elementu nastopajo sile dol in gor potujočih napetostnih valov. Poleg tega pa pri analizi s programom CAPWAP spreminjamo tudi štiri dodatne parametre, in sicer:

- določevanje morebitnih razpok v pilotu,
- upoštevanje dušenja materiala pilota,
- spreminjanje impedance,

- določitev enotne valovne hitrosti, za izločitev morebitnih minimalnih horizontalnih razpok, ki vplivajo na hitrost potovanja valov.

4.5.2 CAPWAP-ov model tal

Odpornost tal R v valovni analizi se s programom CAPWAP določi na modelu tal, vgrajenem v programu CAPWAP. CAPWAP-ov model tal je v bistvu zelo primerljiv modelu tal, ki ga je leta 1960 razvil A.E. Smith, vendar izboljššan, s tem da omogoča tudi radialno dušenje. Model je sestavljen iz elasto – plastičnih vzmeti in linearnih dušilk. Tla ob pilotu razdelimo na N_s končnih elementov, v splošnem je število končnih elementov tal enako $\frac{1}{2}$ končnih elementov pilota plus dodatnemu končnemu elementu pod nogo pilota. Torej, če pilot razdelimo na 8 končnih elementov, tla razdelimo na 5 končnih elementov. Vsak končni element opišemo s tremi osnovnimi parametri, ki jih med analizo spreminjamo. Ti parametri so:

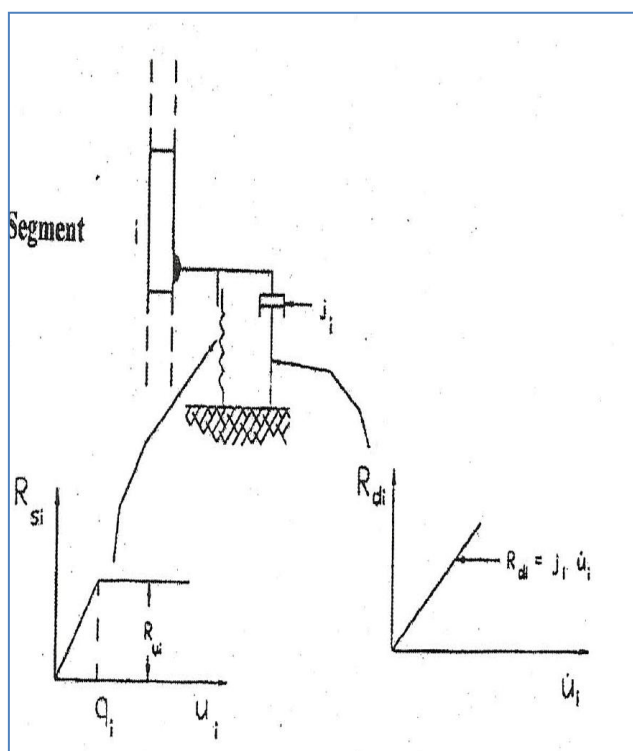
- maksimalna odpornost [R_u],
- elastični pomik tal [q],
- koeficient dušenja [J].

Odpornost posameznega končnega elementa pilota je vsota statične in dinamične odpornosti tal, določene z enačbo:

$$R_i = R_{si} + R_{di}. \quad (4-38)$$

Če na končni element pilota i deluje odpornostna sila tal končnega elementa k , zapišemo odpornostno silo z enačbo:

$$R_k = R_{sk} + R_{dk}. \quad (4-39)$$



Slika 11: Grafični prikaz modela zemljine v programu CAPWAP (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland. Pdi)

Vrednost statične odpornosti R_{sk} je določena z enačbo:

$$R_{sk} = k_{sk} u_i, \quad (4-40)$$

$$k_{sk} = R_{uk}/q_k, \text{ pozitivna (dol potujoča) hitrost } v, \quad (4-41)$$

$$k_{sku} = R_{uk}/q_{ku}, \text{ negativna (gor potujoča) hitrost } v, \quad (4-42)$$

$$q_{ku} = q_k c_k, \quad (4-43)$$

$$0 \leq c_k \leq 1, \quad (4-44)$$

kjer so:

- k_{sk} - togost končnega elementa tal k ,
- u_i – pomik končnega elementa pilota i ,
- q_k - elastični pomik tal končnega elementa k ,
- q_{ku} - elastični pomik razbremenitve.

Vrednost statične odpornosti R_{sk} je omejena s:

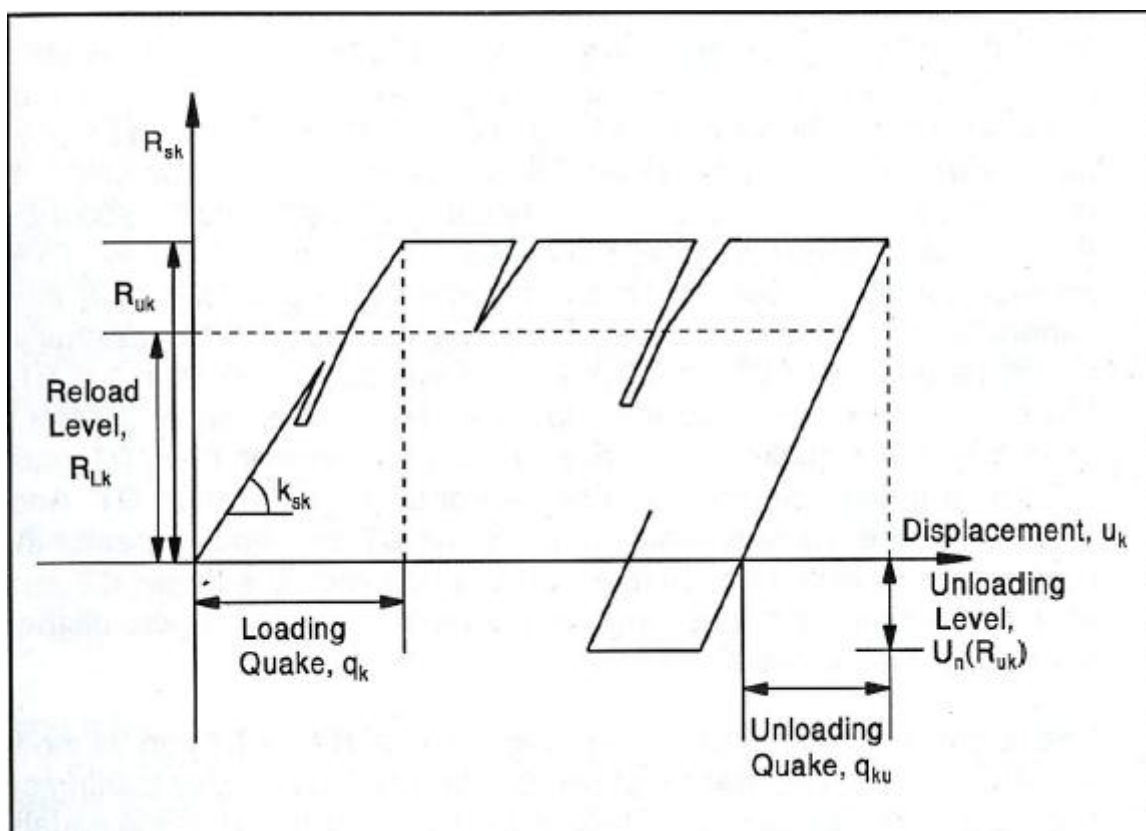
$$R_{nk} \leq R_{sk} \leq R_{uk}, \quad (4-45)$$

$$R_{nk} = -U_n R_{uk}, \quad (4-46)$$

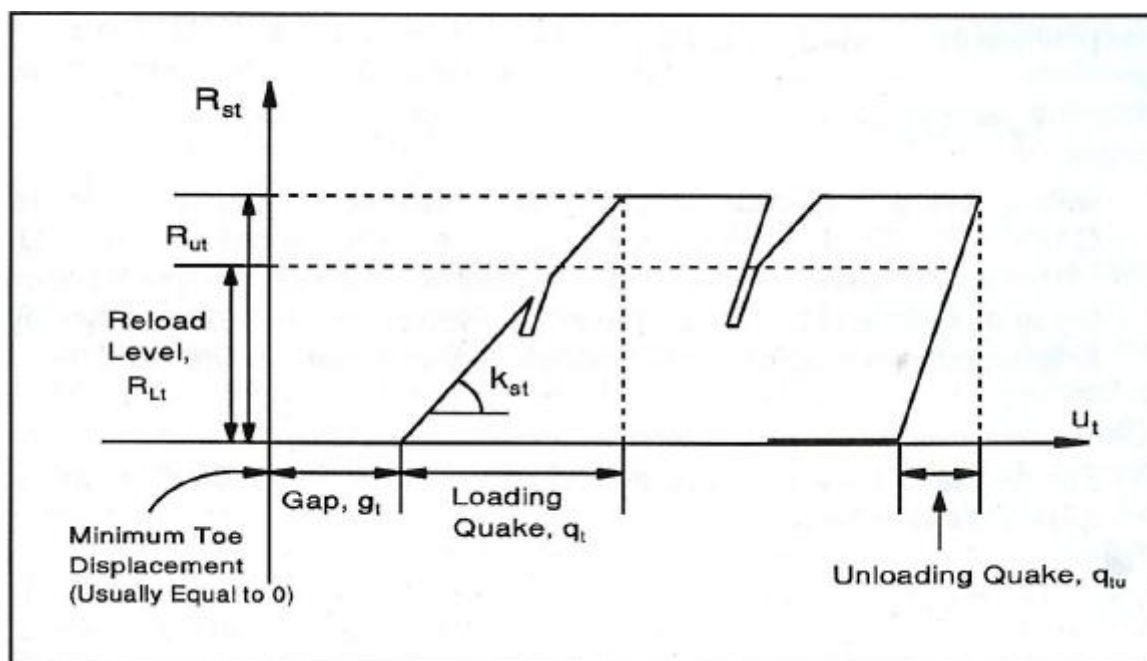
$$0 \leq U_n \leq 1, \quad (4-47)$$

kjer so:

- R_{uk} mejna obremenitvena statična odpornost elementa tal k ,
- R_{nk} mejna razbremenilna statična odpornost elementa tal k ,
- U_n razbremenilni koeficient.



Slika 12: Grafični prikaz statične odpornosti plašča pilota (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland. Pdi)



Slika 13: Grafični prikaz statične odpornosti pod nogo pilota (Vir: Pdi. 2006. CAPWAP. Background Report. Cleveland. Pdi)

Na sliki 13 je na grafu označen »gap«, ki predstavlja praznino pod nogo pilota. Praznina nastane zaradi gibanja pilota v negativno smer (navzgor). Statična odpornost tal pod nogo pilota se ob upoštevanju praznine g_t izračuna z enačbo:

$$R_{sk} = k_{sk}(u_i - g_t); \text{ za } g_t < u_i. \quad (4-48)$$

Dinamična odpornost zemljine se zapiše s količnikom dušenja zemljine J . Smith je dinamično odpornost zemljine zapisal z enačbo:

$$R_{dk} = J_{sk} \dot{u}_i R_{sk}, \quad (4-49)$$

kjer je dinamična odpornost odvisna od hitrosti gibanja delcev elementa i \dot{u}_i , trenutne statične odpornosti R_{sk} in Smithovega faktorja dušenja J_{sk} .

Vendar je za analizo s primerjavo signalov bolje uporabiti linearni viskozni koeficient dušenja J_{vk} , s katerim se dinamična odpornost izrazi kot:

$$R_{dk} = J_{vk} \dot{u}_i. \quad (4-50)$$

Smithov faktor dušenja J_{sk} se lahko približno izračuna iz viskoznega faktorja dušenja J_{vk} in ob upoštevanju ($R_{sk} = R_{uk}$), z uporabo tako imenovanega Smithovega – viskoznega pristopa:

$$J_{sk} = J_{vk}/R_{uk}. \quad (4-51)$$

Program CAPWAP ima poleg koeficienta omenjenih vrst koeficientov dušenja možnost uporabe brezdimenzijskega Case faktorja dušenja J_c . Case faktor dušenja J_c se z enačbo izrazi:

$$J_c = \sum(J_{vk})/Z. \quad (4-52)$$

Dinamična odpornost zemljine izražena s Case faktorjem dušenja pa se zapiše kot:

$$R_{dk} = J_c \dot{u}_i. \quad (4-53)$$

4.5.3 Statična analiza s programom CAPWAP

Končni rezultat analize s programom CAPWAP je določitev mejne odpornosti tal, vrednosti elastičnih pomikov tal in s tem togosti zemljine. Ker poznamo tako togost pilota kakor togost tal, lahko določimo krivuljo obtežba - pomik. Krivulja je podobna kot pri običajnem statičnem obremenilnem preizkusu. Izračun krivulje je narejen z upoštevanjem lastnosti pilota (elastični modul materiala, prečni prerez pilota, dolžina pilota) in lastnosti tal (končna odpornost, elastični pomik zemljine). Vendar pa ima ta pristop tudi omejitve, ki jih je potrebno upoštevati. Te omejitve so naslednje:

- rezultati analize Capwap odražajo lastnosti zemljine v točno določenem trenutku, zato ne vključujejo pomikov zaradi konsolidacije zemljine,

- v primeru betonskih pilotov je elastični modul materiala v analizi enak vrednosti določeni s merilno aparaturo PDA. Vendar je v splošnem statični elastični modul materiala manjši od dobljenega s preizkusom,
- možno je, da so elastični pomiki zemljine pri statičnem obremenilnem preizkusu večji, kakor pri dinamičnem obremenilnem preizkusu,
- rezultati meritev so pridobljeni pri majhni energiji udarca, zato so pomiki majhni ter s tem dobimo mobilizirano in ne mejno zmogljivost pilota.

Prednost analize s programom CAPWAP nad običajnim statičnim obremenilnim preizkusom je v izrisu krivulje pomika v odvisnosti od obtežbe. Pri standardnem statičnem obremenilnem preizkusu se krivuljo nariše s pomikom na glavi pilota v odvisnosti od sile, merjene na glavi pilota. Z analizo CAPWAP pridobimo dve krivulji, in sicer eno krivuljo, ki ponazarja pomik glave pilota v odvisnosti od sile, merjene na glavi pilota, ter drugo krivuljo, kjer pridobimo grafični izris pomika noge pilota v odvisnosti od sile na nogi pilota.

4.6 Karakteristična tlačna odpornost pilota po standardu SIST EN 1997-1:2005

Z dinamičnim obremenilnim preizkusom izmerimo mejno vrednost tlačne odpornosti in jo označimo z $R_{c;m}$. Karakteristično tlačno odpornost pilota se določi po enačbi:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;m})_{mean}}{\xi_5}; \frac{(R_{c;m})_{min}}{\xi_6} \right\}, \quad (4-54)$$

kjer sta ξ_5 in ξ_6 korekcijska faktorja, odvisna od števila preskušanih pilotov n in pripadata srednji vrednosti $(R_{c;m})_{mean}$ oziroma najnižji $(R_{c;m})_{min}$ od vrednosti $R_{c;m}$.

Preglednica 5: Korekcijski faktorji ξ za izračun karakterističnih vrednosti na podlagi rezultatov terenskih preiskav (n - število dinamičnih preizkusov)

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

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

5 ZASNOVA EKSPERIMENTA IN IZVEDBA MERITEV

5.1 Zasnova eksperimenta

19.8.2011 smo vgradili dva armirano betonska testna pilota P1 in P2 enakega premera 50 cm ter dolžine 8 metrov, na medsebojni osni oddaljenosti 5,5 m, na izbrani lokaciji vgradnje. Testna pilota sta se vgradila v pripravljeno vrtino. Strojna oprema za izkop je bil vrtni stroj Casagrande B80, ki je namenjen gradnji pilotov manjšega premera. Izkop smo izvajali kontinuirano s potiskanjem opažne cevi (kolone) v temeljna tla ter sprotnim izvlečenjem materiala s polžem. Način izkopa vrtine prikazuje slika 12. Izkop vrtine je potekal zelo hitro in brez posebnosti, ki bi kakorkoli upočasnile izkop vrtine. Za vertikalnost pilota v tleh je skrbel strojnik, ki je pred vsakim ponovnim potiskom opažne cevi globlje v tla preveril vertikalnost z libelo. Med izkopom vrtine se je opravljala optična spremljava izkopanega materiala.



Slika 14: Izkop vrtine pilota z vrtnim strojem Casagrande dne 19.8.2011

Opažno cev se je vtiskavalo do globine noge (konice) pilota. Po končanem izkopu se je v vrtino vstavilo armaturni koš, premera 40 centimetrov ter dolžine 9 metrov. Armaturo je sestavljalo 5 palic premera 20 mm povezanih s spiralno armaturo, premera 8 mm. Armaturni koš je bil dodatno ojačan z obročem iz armaturne palice, premera 20 mm, znotraj armaturnega koša, vstavljenega na vsakih 1000 mm. Dolžina armature je daljša od dolžine pilota za dograditev kape pilota, potrebne pri izvedbi dinamičnega obremenilnega preizkusa.



Slika 15: Armaturni koš pilota

Betoniranje se je pričelo po vstavitvi armaturnega koša v vrtino. Beton smo pripravljali na mestu vgradnje z mešalno žlico priključeno na mini bager Daewoo 430. Mešalna žlica je bila velikosti $0,250 m^3$. Kvaliteto betona se je ugotovilo na kocki velikosti $25 \times 25 \times 25$ cm, odvzeti na poljubni mešanici betona med betoniranjem. Kocko betona smo shranili v vlažno okolje za 28 dni ter mu nato preverili tlačno trdnost. Tlačna trdnost kocke po 28 dneh je znašala 27 MPa. Sprotno z betoniranjem se je odstranjevala opažna cev z vrtalnim strojem.

Za izvedbo enega pilota smo potrebovali približno eno uro in pol. Za izkop vrtine in sprotno potiskanje opažne cevi v tla smo potrebovali približno 30 – 40 minut. Izkop vrtine bi bil lahko tudi hitrejši, če ne bi izvajali vizualne kontrole tal. Za vstavev armaturnega koša v vrtino smo potrebovali nekaj minut. Največ časa smo potrebovali za betoniranje pilota, saj smo

morali za izdelavo pilota zmešati 7 mešalnih žlic. Takšno število smo tudi pričakovali glede na velikost vrtine ($1.56 m^3$).



Slika 16: Betoniranje pilota z mešalno žlico

Po koncu vgradnje pilotov P1 in P2 smo počakali 8 dni, da je beton pridobil zadostno trdnost, ter nato 27.8.2011 za potrebe dinamičnega obremenilnega preizkusa naredili kapo pilota. Kapa pilota predstavlja povečanje pilota v višino za minimalno tri premere pilota. Zaradi velike obremenitve ob udarcu uteži je potrebno dodatno ojačati armaturni koš. Armaturni koš smo dodatno ojačali z osmimi palicami premera 10 mm ter dolžine štirih premerov pilota. Velikost palic je bila večja zaradi zakrivitve palic na vrhu za kot devetdeset stopinj. Optimalni premer kape pilota je enak premeru pilota. Za opaž smo uporabili PVC cevi potrebnega premera. Pred pričetkom betoniranja je bilo potrebno pravilno pripraviti stik svežega betona s

starim betonom. V primeru zelo umazane glave pilota bi bilo potrebno rušenje do nosilnega betona. Slika 15 prikazuje armaturni koš za testni pilot ter ob desni strani slike še opazno cev.



Slika 17: Armiranje kape pilota dne 27.8.2011

5.2 Izvedba statičnega obremenilnega preizkusa

Statični obremenilni test smo izvedli 22.10.2011. Izvedba statičnega obremenilnega testa je potekala v skladu s standardom ASTM 1143 – 43: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load, ki je podrobno opisan v poglavju 3.4. Pred izvedbo testa smo morali pripraviti konstrukcijo za zagotovitev reakcijske sile in glavo pilota znižati na ustrežno koto. Zaradi dinamičnega obremenilnega testa je bila glava pilota povišana za približno 1,80 m, kar smo morali pred statičnim obremenilnim testom odstraniti. Največ časa smo porabili za pripravo in izdelavo konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile, ki je morala

zagotavljati dovolj veliko reakcijo, da bi lahko pri statičnem obremenilnem testu pilot obremenili do meje porušitve.

5.2.1 Predpriprava pilota na statični obremenilni test

Pred pričetkom eksperimenta smo določili, da bomo najprej izvajali dinamični obremenilni test ter nato še statični obremenilni test. Odločitev je bila posledica dejstva, da smo morali za dinamični obremenilni test narediti tako imenovano kapo pilota, ki predstavlja dvig glave pilota za približno 2 metra v višino. Potreba po kapi pilota je predstavljena v poglavju o dinamičnem obremenilnem testu. Vendar smo morali kapo pilota pred izvedbo statičnega obremenilnega testa odstraniti zaradi lažje izvedbe in priprave konstrukcije za zagotavljanje reakcijske sile. Kapo pilota smo odstrani ročno z rušilnimi kladivi ali udarnimi svedri, ob sprotne odstranjevanju armaturnega koša. Ročna odstranitev kape je potrebna, da ne pride do poškodb pilota globlje v temeljnih tleh. Po končani odstranitvi smo glavo pilota zopet primerno obdelali. Slika 16 prikazuje ročno odstranjevanje kape pilota.

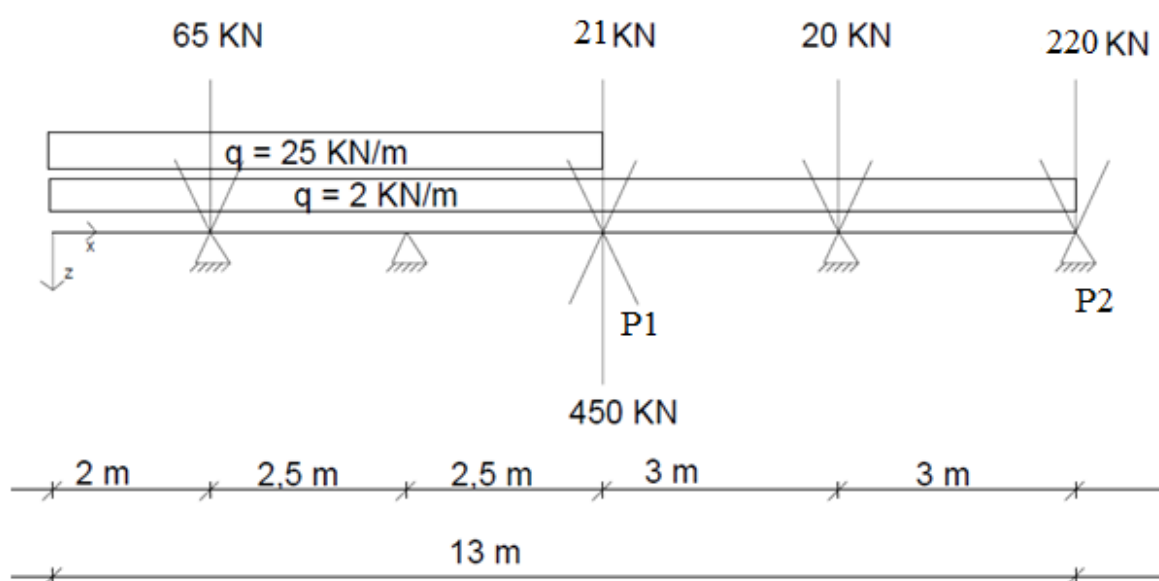


Slika 18: Ročno odstranjevanje kape pilota

5.2.2 Izdelava konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile

Izdelava klasične konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile, ki je določena s standardom ASTM 1143 – 43, v primeru našega eksperimenta ni bila izvedljiva zaradi finančne omejitve projekta. Zaradi tega smo izračunali več različnih možnosti izvedbe konstrukcije, ki bi zagotovila zadostno reakcijsko silo, s katero bi lahko izmerili mejno nosilnost pilota. Oceno nosilnosti pilota smo določili iz rezultatov terenskih preiskav tal in dinamičnega obremenilnega testa ter večjo vrednost dodatno povečali za 16 %. Izbrana nosilnost je bila enaka 450 kN. Konstrukcija za zagotovitev reakcijske sile je predstavljala kombinacijo klasičnih oblik konstrukcij opisanih v standardu. Konstrukcijo smo zgradili iz dveh, medsebojno povezanih 13 m dolgih jeklenih nosilcev, ki bosta na eni strani podprta s paleto kock ter na drugi strani členkasto pritrjena na testni pilot P2. Jeklena nosilca smo medsebojno povezali ter tako naredili, da sta delovala kot celota.

- točkovna sila 20 kN, ki predstavlja paleto betonskih zidakov, položeno na jeklena nosilca,
- točkovna sila 220 kN, ki predstavlja vsoto odpornosti testnega pilota P2 po plašču in njegove teže,
- točkovno silo 450 kN, ki predstavlja reakcijsko silo.



Slika 20: Model konstrukcije za izračun statičnega ravnotežja

Izračun točkovne sile, ki jo zagotavlja testni pilot P2, je enaka vsoti odpornosti testnega pilota P2 po plašču in teži testnega pilota P2. Odpornost testnega pilota dobimo iz rezultatov terenskih preiskav tal, težo pilota pa izračunamo. Pri izračunu moramo upoštevati, da na težo pilota vpliva tudi kapa pilota in je zato skupna dolžina pilota enaka 10 metrov.

$$\text{Sila} = A_s q_s + A_b L \gamma_m, \quad (5-1)$$

kjer so:

- A_s – površina pilota v tleh,
- q_s - nosilnost pilota po plašču P2,
- A_b - prečni prerez pilota P2,

- L – skupna dolžina pilota P2,
- γ_m - specifična teža betona.

Nosilnost plašča testnega pilota P1 je izračunana v poglavju 6.2, vendar smo zaradi enakih geometrijskih in materialnih karakteristik pilotov P1 in P2 ter majhne medsebojne razdalje nosilnost plašča pilota P2 enačili z nosilnostjo plašča pilota P1.

Izračun:

$$A_b = \pi (0,25 \text{ m})^2 = 0,196 \text{ m}^2$$

$$\text{Reakcija pilota P2} = 170 \text{ kN} + (0,196 \text{ m}^2 \times 10 \text{ m} \times 25 \text{ kN/m}^3) = 220 \text{ kN}$$

Za statično ravnotežje konstrukcije v ravnini X –Z morata veljati naslednji dve enačbi:

$$\sum Z = 0, \tag{5-2}$$

$$\sum M_A = 0. \tag{5-3}$$

Izračun:

$$\sum Z: 450 \text{ kN} \leq 220 \text{ kN} + 65 \text{ kN} + 20 \text{ kN} + 21 \text{ kN} + (13 \text{ m} \cdot 2 \text{ kN/m}) + (7 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m})$$

$$\sum Z: 450 \text{ kN} \leq 527 \text{ kN}$$

$$\sum M_A: 450 \text{ kN} \cdot 6 \text{ m} \leq (65 \text{ kN} \cdot 11 \text{ m}) + (20 \text{ kN} \cdot 3 \text{ m}) + (21 \text{ kN} \cdot 6 \text{ m}) + (13 \text{ m} \cdot 2 \text{ kN/m} \cdot 7,5 \text{ m}) + (7 \text{ m} \cdot 25 \text{ kN/m} \cdot 9,5 \text{ m})$$

$$\sum M_A: 2700 \text{ kNm} \leq 2706,5 \text{ kNm}$$

5.2.2.2 Izdelava konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile na terenu

Jeklena nosilca sta imela v stojini po celotni dolžini luknje. Luknje so bile zelo koristne pri vpetju nosilca na pilot. Vpetje jeklenih nosilcev na pilot P2 smo izvedli tako, da smo pilot P2 prevrtali 40 cm pod vrhom, skozi luknjo vstavili železno palico polnega prereza in premera 10 cm ter nato jeklena nosilca dvignili do višine stika spodnjega dela luknje in palice. Ko smo

dosegli stik jeklenih nosilcev in prečne palice, smo jeklena nosilca podložili z lesenimi tnali. Horizontalnost jeklenih nosilcev smo zagotovili s spreminjanjem višine neodvisnih podpor. Razmik med jeklenima nosilcema je bil enak premeru pilota P2. Zaradi velikega razmika med jeklenima nosilcema smo nosilca medsebojno povezali, da sta delovala kot celota. Na jeklena nosilca, ki sta po povezavi tvorila enotno konstrukcijo, smo nad neodvisno podporo postavili balast v obliki jeklenih plošč (uteži), dimenzij 1,0 m x 1,0 m x 0,15 m, teže 10,3 kN. Za linijsko obremenitev smo uporabili palete betonskih zidakov in tlakovcev. Centralno nad osjo pilota smo na spodnji in zgornji strani konstrukcije namestili jekleni plošči, medsebojno povezani s štirimi vijaki. S tem smo izboljšali konstrukcijo na mestu obremenitve s hidravlično stiskalko. Slika 21 prikazuje postavitev konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile uporabljene v primeru eksperimenta.



Slika 21: Izvedba konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile

5.2.3 Priprava merilnih inštrumentov

Priprava merilnih inštrumentov je pomembna naloga za zagotovitev dobrih rezultatov. Glavna naloga je pravilna postavitev merilnih uric. Merilne urice morajo biti postavljene tako, da so

med izvedbo testa dobro vidne izvajalcu ter so ob tem zavarovane pred tresljaji okolice. Naredili smo konstrukcijo iz dveh aluminijastih lat, ki sta bile na enem koncu spojeni, na drugem koncu pa prečno povezani s železno palico. Konstrukcija smo neodvisno podprli s železnimi nožicami. Merilne urice smo na aluminijaste late pritrdili s posebnimi inštrumenti. Na pilot smo z vijaki pritrdili tri železne kotnike na treh straneh pilota, ki se skupaj s pilotom vtiskujejo v tla. Premični del merilnih uric smo postavili na železne kotnike, tako da te zaznajo vsakršni minimalni pomik pilota. Izdelavo konstrukcije iz aluminijastih lat in pritrditev merilnih uric na pilot prikazuje slika 22.



Slika 22: Priprava merilnih inštrumentov pred izvedbo statičnega obremenilnega testa

5.2.4 Obremenjevanje testnega pilota

Pilot smo obremenjevali po predpisih standarda ASTM 1143 – 43: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load. Izbrali smo hitro obliko obremenjevanja. Testni pilot smo obremenili s konstantnimi bremenskimi stopnjami, ki so bile velikosti 25 kN. Testni pilot smo v prvi fazi obremenili do vrednosti 356,2 kN, nato pa smo pilot sprostili v dveh stopnjah. Ugotovili smo, da so izbrane bremenske stopnje premajhne in, da je obremenjevanje poteklo prepočasi. Po umeritvi pilota smo pilot zopet pričeli obremenjevati, tokrat z

bremenskimi stopnjami velikosti 62,8 kN. V trenutku nanosa obremenitve na pilot, smo zapisali posedke pilota na vsaki merilni urici. Čas naslednjega nanosa obremenitve na pilot nam je določeval pomik, ki je moral biti manjši od 0,25 mm/h na vsaki od merilnih uric. Testni pilot smo obremenili maksimalno s 471 kN potisne sile, večje sile nam ni omogočala konstrukcija, narejena za zagotovitev reakcijske sile. Kljub temu da pilota nismo obremenili do porušitve, je bila obremenitev zadostna za določitev nosilnosti testnega pilota. Ko se je pilot po nanosu maksimalne obtežbe umiril in so bili pomiki manjši od 0,25 mm/h, smo pilot zopet razbremenili v dveh stopnjah. Velikost posamezne stopnje je bila enaka polovici maksimalne vrednosti obremenitve.

5.2.5 Zapisovanje meritev

Standard ASTM 1143 – 43: Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load predpisuje, da se zbirajo podatki časov, posedkov in obremenitve pred in po nanosu posamezne bremenske stopnje, tako pri obremenjevanju, kakor pri razbremenjevanju preizkusnega pilota. Meritve se vpisuje v tabele, primer prikazuje slika 23.

5.3 Izvedba dinamičnega obremenilnega testa

Izvedba dinamičnega obremenilnega testa se je izvedla 26.9.2011. Test smo izvedli v skladu s standardom ASTM D4945, Standard Test Method for High – Strain Dynamic Testing of Piles, opisanim v poglavju 4.2. Izvedli smo 4 meritve na testnem pilotu P1, ki so opisane v spodnji preglednici:

Preglednica 6: Meritve dinamičnega obremenilnega testa

Meritev	Datum meritve	Teža uteži [kN]	Višina padca uteži [m]
1	26.9.2011	10	1
2	26.9.2011	10	1
3	29.9.2011	10	1
4	29.9.2011	10	2

5.3.1 Priprava stolpa za dvig uteži

Pred izvedbo dinamičnega obremenilnega preizkusa smo morali postaviti stolp, ki je zagotavljal centričen padec uteži na glavo pilota. Stolp je last podjetja I.C. Projekt d.o.o. in je narejen iz konstrukcije žerjava. Stolp sestavljajo 3 deli, in sicer spodnji, srednji in zgornji del. Spodnji del je sestavljen iz štirih medsebojno povezanih nog, ki omogočajo enostaven dostop do pilota in dobro stabilnost stolpa. Srednji del je enak konstrukciji žerjava in je namenjen izključno za povečanje višine stolpa, saj mora stolp dopuščati dvig uteži minimalno na višino 2,5 metra. Zgornji del je zopet enak konstrukciji žerjava, vendar ima na zgornjem in spodnjem delu narejena posebna vodila kamor se vstavi drog na katerega je pritrjena utež. Premer vodil je večji od premera droga ter je s tem preprečeno trenje med vodilom in drogom. Na spodnjem vodilu je nameščen mehanizem za določitev višine padca uteži. Višine padca uteži so lahko naslednje: 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m in 2,5 m. Okrogel železen drog, na katerega se namesti utež, je polnega prereza ter zaradi tega tudi prispeva k skupni teži uteži. Utež, uporabljena za udarec pilota, je kvadratne oblike, velikosti 1,0 m x 1,0 m x 0,15 m in teže 10 kN. Nosilni drog se na utež pritrdi na zgornji strani, kjer ima utež na sredini navojno luknjo.

Stolp smo morali postaviti na sredino pilota, da je utež padla v os pilota. Zaradi varnosti uteži nismo dvigovali do zadnjega trenutka pred udarcem.

Za dvig uteži smo uporabili dvigalo Palfinger, nameščen na dvoosnem kamionu MAN. Višino padca smo določili pred dvigom in na drogovje namestili spojko, ki se je zataknila v mehanizem za nastavev višine padca. Spojko smo pritrdili na zarezo, ki je označevala višino padca enako enemu metru. Mehanizem smo sprožili s potegom vrvice na varni oddaljenosti od testnega pilota.



Slika 24: Izvedba stolpa za dvig uteži

5.3.2 Namestitev merilnikov na pilot

Ko smo stolp postavili na pravilno mesto in je zagotavljal padec uteži v os pilota, smo na pilot namestili merilnike pospeškov in deformacij. Merilnike smo morali na pilot dobro pritrditi, zato smo v pilot izvrtali luknje dva premera pod vrhom pilota. V luknje smo vstavili plastične vložke ter merilnike z vijaki M6 dobro pritrdi na pilot. Med namestitvijo smo morali paziti, da merilnikov nismo poškodovali in s tem tvegali slabe rezultate. Na pilot smo pritrdi po dva merilnika pospeškov in deformacij, in sicer na vsako stran pilota po en merilnik deformacij in po en merilnik pospeškov. Merilnike smo postavili na enakih razdaljah od osi pilota na nasprotnih straneh in na enaki oddaljenosti od glave pilota. Kable smo z elastiko pritrdi na pilot. Na vrhu pilota smo pred udarcem posuli tanko plast mivke, na katero smo položili leseno vezano ploščo debeline 2 cm. Namen plošče je bila preprečitev poškodbe glave pilota že po prvem udarcu uteži.



Slika 25: Namestitev merilnikov na pilot pred pričetkom dinamičnega obremenilnega testa

5.3.3 Priprava podatkov v analizatorju PDA pred pričetkom meritve

Merilnike prek kablov povežemo s prenosnim analizatorjem PDA, kateri zabeleži in filtrira merjene podatke. Analizator PDA je prenosna naprava z zaslonom na dotik in pripadajočim računalnikom. Ob vključitvi analizatorja se zažene operacijski sistem Windows XP, kamor je naložen program PDA-L. PDA-L je program za obdelavo meritev, ki jih zabeležijo merilci. Program je enostaven za uporabo in prijazen operaterju. V program vnesemo osnovne podatke o geometrijskih ter materialnih lastnostih pilota.

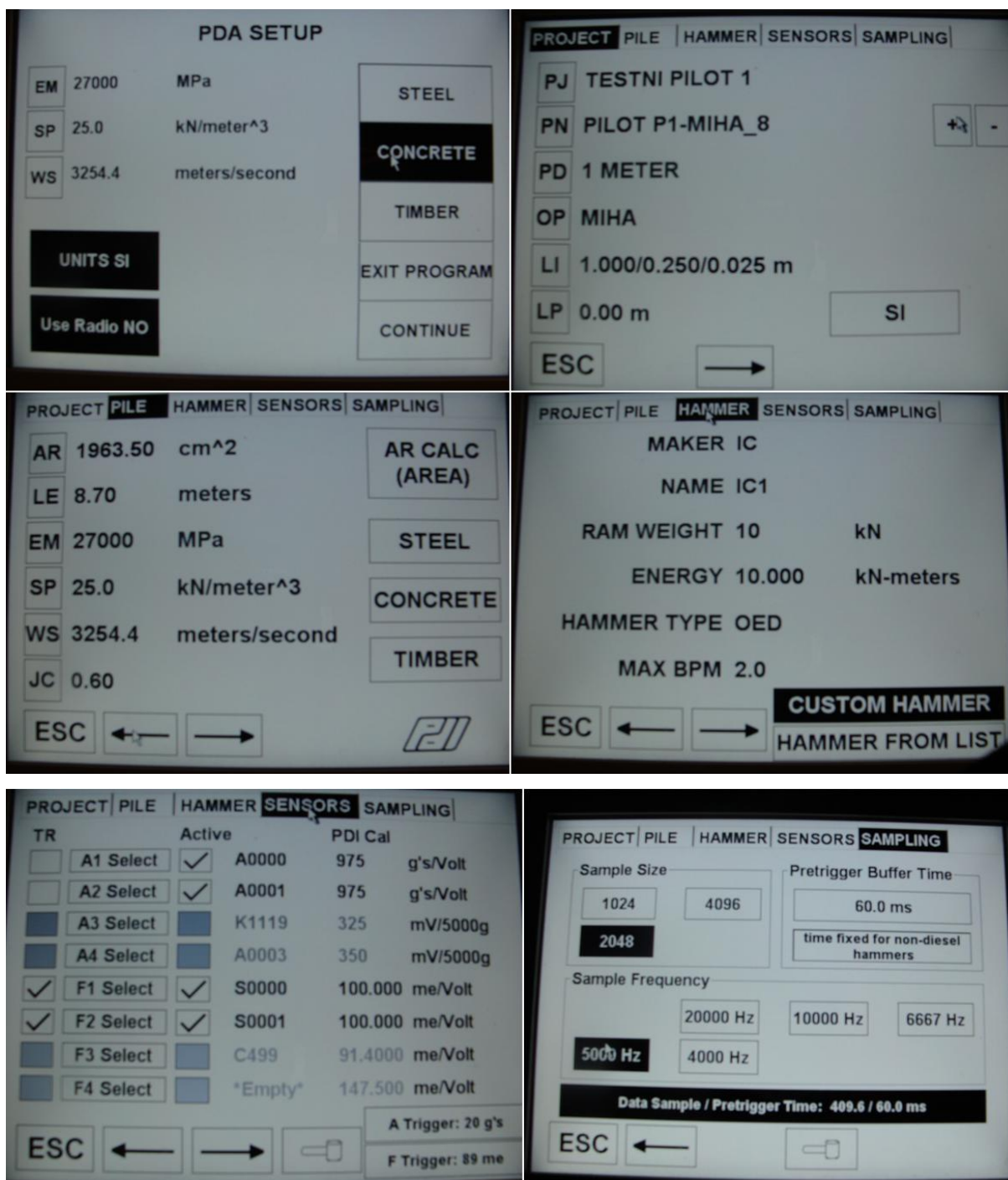
Potek vnašanja vhodnih podatkov v program PDA-L poteka po naslednjem sistemu. Sprva izberemo lahko med železnim, betonskim ali lesenim pilotom. Ob izbiri materiala se izpišeta elastični modul materiala in specifična teža ter valovna hitrost, ki se izračuna iz materialnih lastnosti. Pred nadaljevanjem izberemo enote. V naslednjem koraku opišemo projektne podatke:

- ime pilota,
- višina padca uteži,
- izvajalca meritev,
- dolžina pilota.

Ko podatke o projektu vnesemo, se določijo podatki o pilotu. Vnesti moramo naslednje količine:

- prečni prerez na mestu pritrditve merilcev,
- dolžina pilota, vključno z delom kape do višine merilcev,
- elastični modul materiala,
- specifična teža materiala,
- koeficient dušenja.

Pred udarcem uteži moramo še določiti podatke o kladivu oziroma uteži. PDA ima možnost izbire kladiva iz vgrajenega seznama ali pa opis lastne uteži. V primeru uporabe lastne uteži je potrebno določiti težo uteži, vrsto ter potencialno energijo.



Slika 26: Vnos podatkov v analizator PDA-L

Slika 26 prikazuje proces vnosa podatkov za meritev v program PDA-L, ki jo nato analiziramo s programom CAPWAP. Najprej kot material testnega pilota izberemo beton. Po

določitvi materiala izpolnimo projektne podatke in nadaljujemo s karakteristikami pilota in uteži:

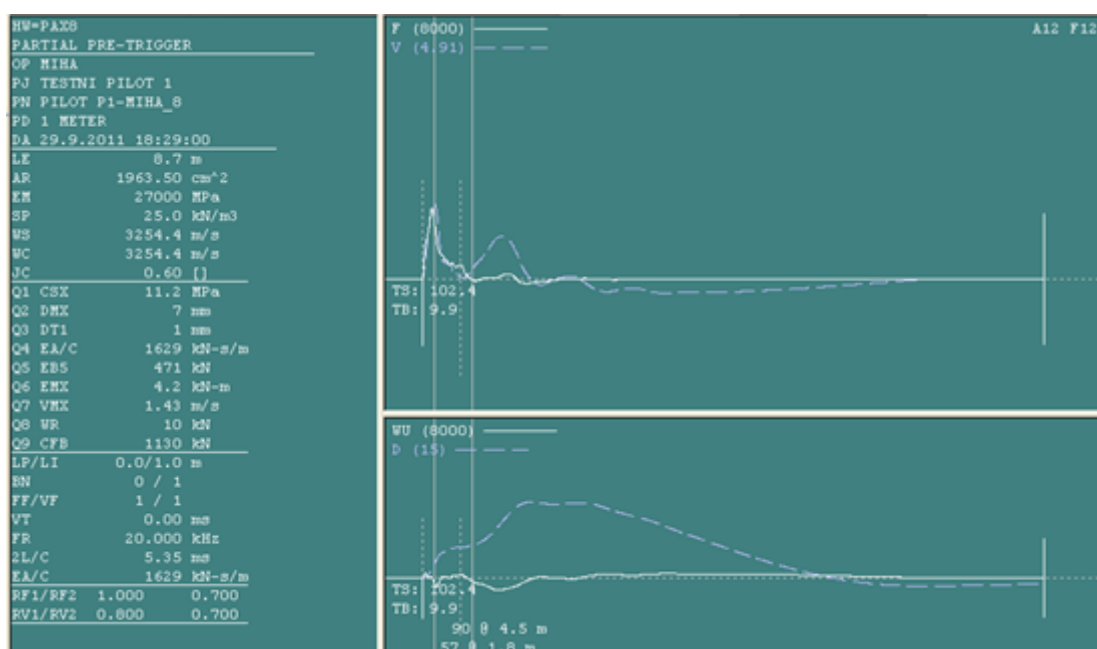
- prečni prerez testnega pilota P1: $AR = 1963,5 \text{ cm}^2$,
- dolžina pilota do merskega mesta: $LI = 8,7 \text{ m}$,
- modul elastičnosti betona testnega pilota P1: $EM = 27\,000 \text{ MPa}$,
- specifično težo materiala: $SP = 25 \text{ kN/m}^3$,
- valovno hitrost izračuna program: $WS = 3254,4 \text{ m/s}$,
- predpostavimo dušenje: $JC = 0,60$,
- teža uteži: $RAM \text{ WEIGHT} = 10 \text{ kN}$,
- prenesene energije: $E = 10 \text{ kNm}$.

Program nam omogoča izbiro merilnika, ki sproži merjenje. Ko smo vnesli vse količine s klikom na ikono kladiva na zaslonu, pričnemo s snemanjem meritve.



Slika 27: PDA analizator

Ob udarcu uteži na glavo pilota se na ekranu v trenutku prikažeta krivulji poteka sile $F(t)$ in hitrosti $v(t)$ merjenega mesta, v odvisnosti od časa, ter oblika in velikost dol in gor potujočega vala WU .



Slika 28: Prikaz rezultatov analizatorja PDA

Kakor vidimo na sliki 28, iz meritve pridobimo poleg krivulje tudi naslednje podatke:

- maksimalno tlačno napetost (CSX),
- maksimalni pomik mesta meritve (DMX),
- impedanco (EA/c).
- maksimalno hitrost na mestu meritve (VMX),
- maksimalno preneseno energijo (EMX),
- maksimalno natezno napetost (TSX).

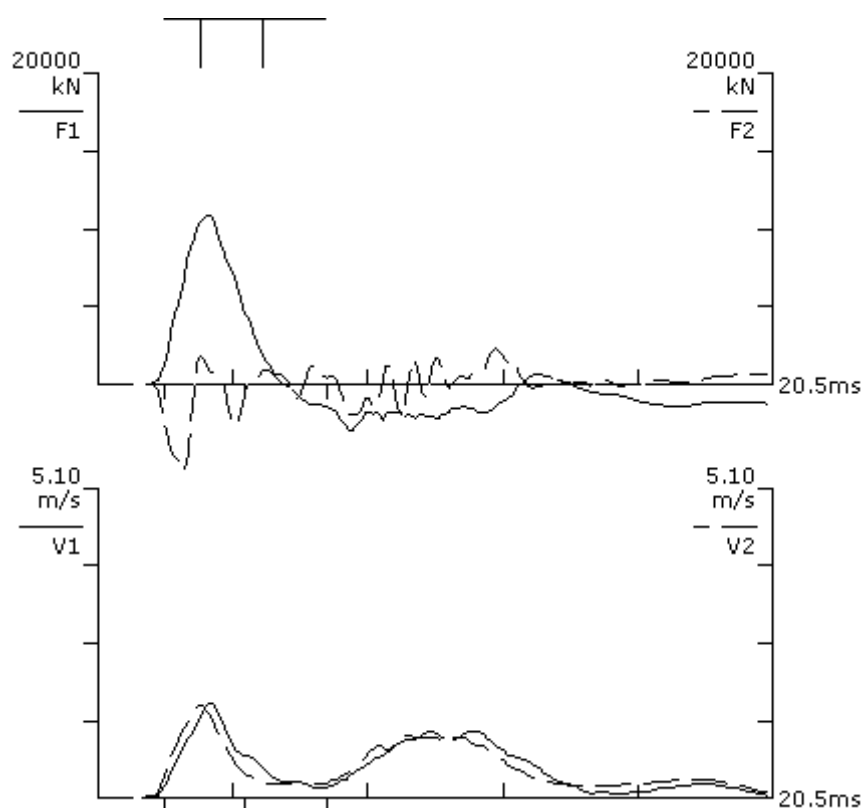
5.3.4 Analiza v programu CAPWAP

Analizo v programu izvajamo po naslednjem vrstnem redu:

- izbira meritve,
- pregled, če je bila meritev uspešno opravljena,
- izdelava modela pilota,
- izvedba primerjave signalov izbrane krivulje,

- pregled rezultatov, če so v skladu s pričakovanji,
- interpretacija rezultatov.

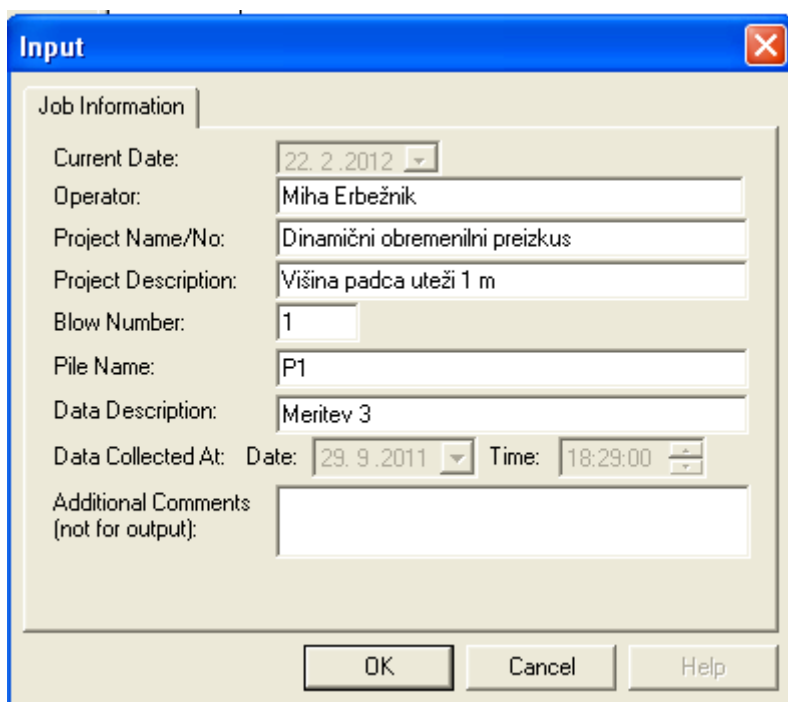
Vsak korak v analizi je pomemben za doseg dobrega rezultata. Še najpomembnejša sta prvi in drugi korak izbire pravilne meritve za izvedbo analize. V našem primeru smo se lahko prepričali, kako pomembno je pri izvedbi meritve na terenu merilce dobro pritrditi na pilota, saj v nasprotnem primeru dobimo neprimeren rezultat za nadaljnjo analizo. Za boljše razumevanje bomo prikazali sliko 29, ki jasno prikazuje, da je bil merilec deformacij F2 slabo pritrjen na testni pilot, medtem ko so bili ostali merilci primerno pritrjeni. Zaradi tega smo morali meritve dinamičnega obremenilnega testa ponoviti.



Slika 29: Prikaz poteka sile in hitrosti, ki jih zaznajo merilci

Ko izberemo primerno meritev in ugotovimo, da je meritev bila uspešno izvedena lahko pričenemo izvajati analizo v programu CAPWAP. V našem primeru smo za nadaljnjo analizo izbrali meritev 3, saj sta bili meritvi 1 in 2 slabi zaradi slabo pritrjenega merilca deformacij,

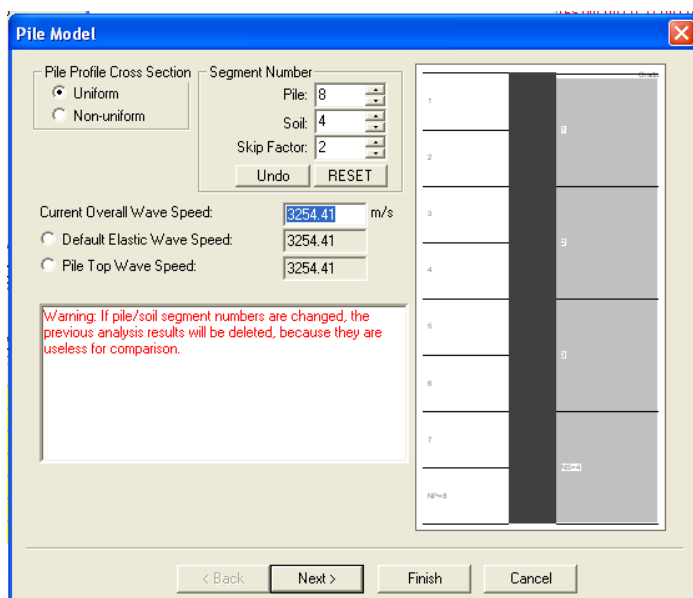
pri meritvi 4 pa je bila energija udarca prevelika in meritve niso bile uporabne. Kot posledica prevelike energije in mogoče malce slabše kvalitete betona je na mestu padca uteži prišlo do porušitve glave pilota. Splošne informacije o izbrani meritvi so predstavljene na spodnji sliki.



Job Information	
Current Date:	22. 2. 2012
Operator:	Miha Erbežnik
Project Name/No:	Dinamični obremenilni preizkus
Project Description:	Višina padca uteži 1 m
Blow Number:	1
Pile Name:	P1
Data Description:	Meritev 3
Data Collected At:	Date: 29. 9. 2011 Time: 18:29:00
Additional Comments (not for output):	

Slika 30: Pogovorno okno za vpis informacij o projektu

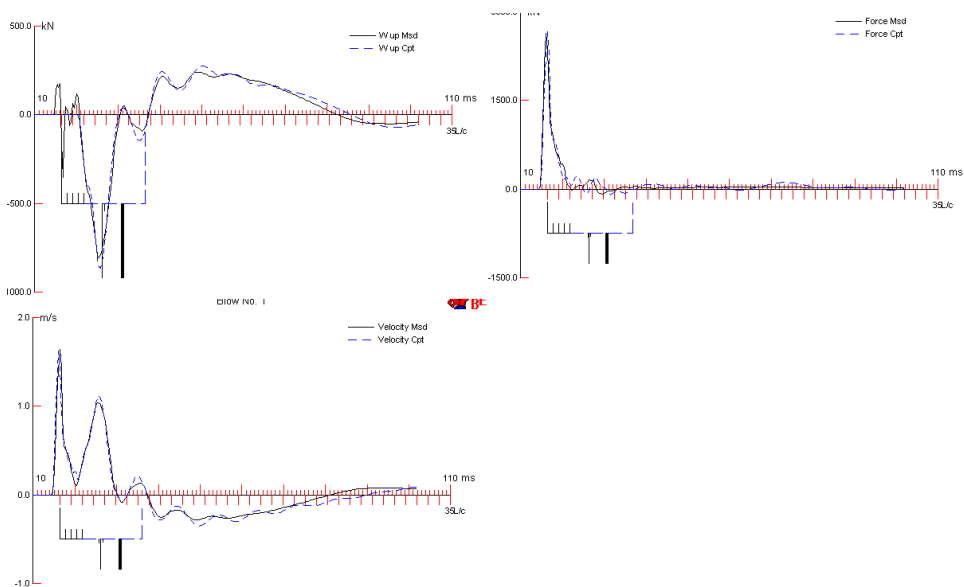
Izdelava modela pilota v programu CAPWAP je enostavna in omogoča izdelavo enotnega pilota po celotni globini ali pa določitev materialnih in geometrijskih lastnosti pilota za vsak končni element posebej. Pogovorno okno za vnos modela pilota v program je prikazano na sliki 31.



Slika 31: Pogovorno okno za izdelavo modela pilota

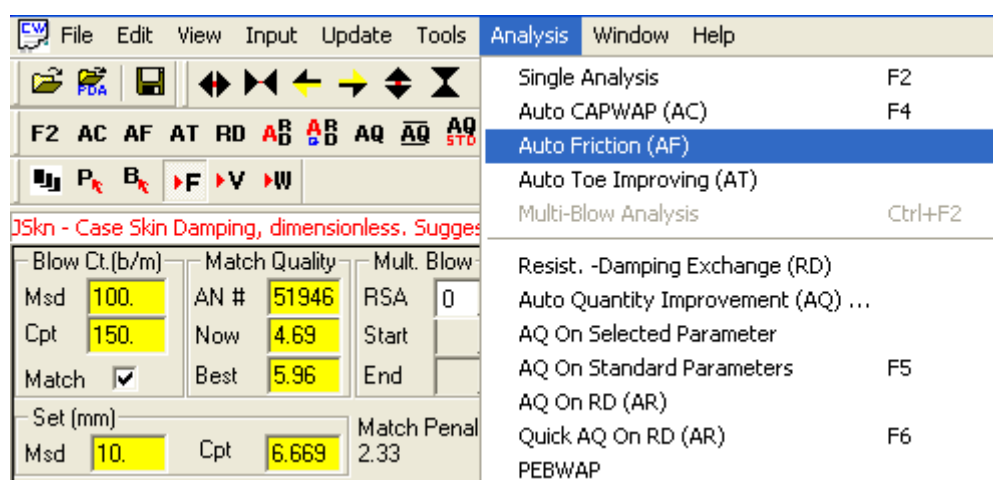
Analizo izvajamo na eni izmed treh merjenih krivulj:

- gor potujočega vala WU ,
- sile $F(t)$,
- hitrosti $v(t)$.



Slika 32: Krivulje za analizo

Primerjavo krivulj lahko izvajamo ročno, s popravki karakteristik, ali avtomatsko, z avtomatskimi funkcijami, vgrajenimi v program. Avtomatske funkcije analize so prikazane na sliki 33 in podrobneje opisne v preglednici 7. Neodvisno od vrste izbire iteracije pa kvaliteto primerjave merjene in računane krivulje določujemo s funkcijo »Match Quality (MQ)«. Funkcija MQ je v program CAPWAP vgrajena kot indikator kakovosti primerjave. Funkcija MQ po vsaki iteraciji izračuna in poda neko številčno vrednost. Manjša kot je številka, boljše je ujemanje. Vendar velja, da so primerjave, kjer je $MQ \leq 3$ dobre.

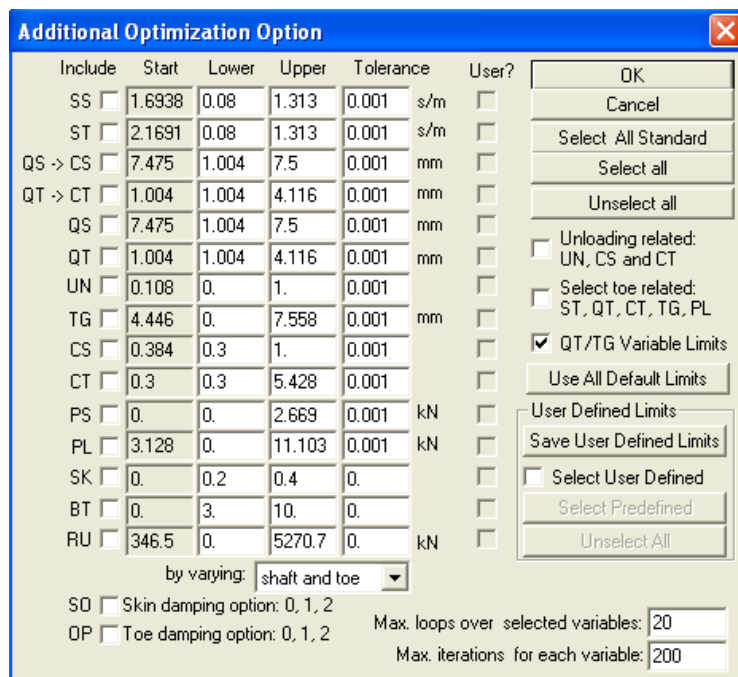


Slika 33: Različne vrste analize za avtomatsko izboljšanje ujemanje krivulj

Preglednica 7: Opis avtomatskih vrst analiz programa CAPWAP

Vrsta analize	Delovanje
Single Analysis	Ob spremembi kateregakoli podatka, se krivulja temu prilagodi.
Auto CAPWAP (AC)	Analiza poteka od leve proti desni, najprej je porazdelitev odpornosti izračunana v časovnem intervalu $2L/c$, pri fiksnem dušenju. Nato se spreminjata vrednosti dušenja in statične nosilnosti, kateremu sledi spreminjanje parametrov, ki vplivajo na odpornost noge pilota. Na koncu spreminja tudi neaktivirane parametre. Postopek traja toliko časa, dokler ni najboljše kombinacije med vsemi parametri.

Auto Friction (AF)	Uporablja se za natančnejši izračun porazdelitve odpornosti po plašču znotraj časovnega intervala $2L/c$.
Auto Toe Improvement (AT)	Analiza poskuša direktno izračunati glavne odpornostne parametre noge pilota, kot so: nosilnost, dušenje, elastični pomik, praznina pod nogo pilota, ne-aktivirani pomik. Je zelo hitra, vendar omejena v uspešnosti.
Auto Quantaty improvement (AQ)	Je analiza, s katero inženir s spremembo karakteristik znotraj določenih zgornjih in spodnjih mej, poskuša izboljšati primerjavo. Primer prikazuje slika 31.
Static – damping exchange (RD)	Omogoča, da ob spremembi nosilnosti ter ob tem istočasno dušenja, primerjava krivulj, dobljena v prejšnji iteraciji, ostaja enaka. To naredi tako, da ob povečanju (zmanjšanju) nosilnosti zmanjša (poveča) faktorje dušenja. Analiza deluje le v primeru, da je sprememba nosilnosti manjša od 30 % trenutne vrednosti.
Automatic Static – damping exchange (ARD)	Je avtomatični proces analize (RD), kjer inženir določi stopnjo spremembe nosilnosti in število korakov, nato pa računalnik sam opravi analizo.



Slika 34: Pogovorno okno za spreminjanje parametrov pri analizi v programu CAPWAP

Preglednica 8: Neznanke v programu CAPWAP

Kratica neznanke	Kratica določa
SS	Vrednost dušenja zemljine po plašču pilota (Smithov model)
ST	Vrednost dušenja zemljine po konici pilota (Smithov model)
CS	Vrednost dušenja zemljine po plašču pilota (Case model)
CT	Vrednost dušenja zemljine po konici pilota (Case model)
QS	Vrednost elastičnega pomika zemljine ob plašču pilota
QT	Vrednost elastičnega pomika zemljine na konici pilota
UN	Pomik pri razbremenitvi
TG	Prazen prostor pod nogo pilota
PS	Morebitna ojačitev na plašču pilota
PL	Morebitna ojačitev na nogi pilota
SK	Vrednost radialnega dušenja na plašč pilota
BT	Vrednost radialnega dušenja na nogo pilota
RU	Končna skupna nosilnost pilota
SO	Izbira metode dušenja po plašču
OP	Izbira metode dušenja po nogi

Po končani analizi kakovost ujemanja, poleg z vrednostjo MQ, preverimo tudi z naslednjimi kriteriji, ki jih določuje CAPWAP:

- Smithov faktor dušenja (SS,ST) naj bo manjši od 1.3, vendar so za koherentne zemljine višji faktorji dušenja možni,
- elastični pomiki plašča so običajno večji od 1 mm ter manjši od 7.5 mm. Elastični pomiki noge niso omejeni,
- elastični pomiki morajo biti manjši od pomika pilota, da so odpornosti tal v celoti aktivirane,

Preglednica 9: Prikaz rezultatov med postopkom izboljšave

Trial 56141, Rult= 383.8 + 0.0 kN V->F												
Total CAPWAP Capacity: 383.8; along Shaft 290.8; at Toe 93.0 kN												
Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm			
				383.8								
1	2.2	1.5	14.2	369.6	14.2	9.63	6.13	1.074	2.310			
2	4.3	3.7	17.7	351.9	31.9	8.14	5.18	1.074	4.622			
3	6.5	5.8	129.4	222.5	161.3	59.49	37.88	1.074	6.424			
4	8.7	8.0	129.5	93.0	290.8	59.54	37.90	1.611	6.424			
Avg. Shaft			72.7			36.35	23.14	1.313	6.113			
Toe			93.0				473.65	1.313	5.868			
Soil Model Parameters/Extensions						Shaft	Toe					
Case Damping Factor						0.234	0.075					
Damping Type						Smith	Smith					
Unloading Quake			(% of loading quake)			57	30					
Reloading Level			(% of Ru)			0	0					
Unloading Level			(% of Ru)			14						
Resistance Gap (included in Toe Quake) (mm)							2.864					
Soil Plug Weight (kN)							2.08					
Time* ms	F M kN	F C kN	V TP m/s	D TP mm	F MD kN	V MD m/s	D MD mm	F BT kN	V BT m/s	D BT mm	R ST kN	R D kN
16.7	2635	2670	1.6	9.58	1974	1.2	9.47	703	1.6	8.33	384	268
23.4	-89	-83	-0.3	-0.01	-682	-0.3	-0.01	-41	-0.3	-0.06	-42	-86
102.3	23	25	0.1	2.99	28	0.1	2.95	15	0.1	1.68	41	3
* Times for maximum force, minimum force and end of analysis. Peak Velocity Time = 16.71 ms.												
This is a Good Match.												

Analizo torej izvajamo s spreminjanjem vseh karakteristik vgrajenih v program CAPWAP in sprotnim opazovanjem vrednosti MQ. V primeru, da se vrednost MQ poveča, izbrana sprememba ni bila primerna. V primeru, da se MQ vrednost zmanjša, je sprememba bila uspešna.

6 REZULTATI

6.1 Rezultati DMT preiskav

Rezultate DMT preiskave, opravljene 1.9.2011, prikažemo s preglednico 10 in sliko 35. Opisujejo karakteristike zemljine na mestu vgradnje pilota. S tabelami se zapišejo vsi pridobljeni in izračunani podatki DMT preiskave vsakih dvajset centimetrov. V preglednici so podane naslednje količine:

- izmerjeni odčitki $[A,B,C]$,
- korigirane vrednosti odčitkov $[P_0,P_1,P_2]$,
- specifična teža materiala $[\gamma]$,
- efektivna vertikalna napetost $[\sigma_{v0}']$,
- porni tlak $[U_0]$,
- materialni indeks $[I_d]$,
- indeks horizontalnega tlaka $[K_d]$,
- dilatometerski modul $[E_d]$,
- indeks pornega tlaka $[U_d]$,
- koeficient mirnega zemeljskega pritiska $[K_0]$,
- količnik prekonsolidacije $[OCR]$,
- strižni kot zemljine $[\varphi']$,
- edometerski modul pri $\sigma_{v0}' [M]$,
- nedrenirano strižno trdnost $[c_u]$,
- klasifikacija zemljine.

Preglednica 10: Rezultati dilatometrske preiskave

<p>DMT-1</p> <p>01.09.2011 DMT-1.dat</p> <p>FGG - KMTal</p> <p>Miha Erbežnik</p> <p>Testni piloti</p>	<p>LEGEND</p> <p>Z = Depth Below Ground Level</p> <p>Po, P1, P2 = Corrected A, B, C readings</p> <p>Id = Material Index</p> <p>Ed = Dilatometer modulus</p> <p>Ud = Pore Press. Index = (P2-Uo)/(Po-Uo)</p> <p>Gamma = Bulk unit weight</p> <p>Sigma' = Effective overb. stress</p> <p>Uo = Pore pressure</p>	<p>INTERPRETED PARAMETERS</p> <p>Phi = Safe floor value of Friction Angle</p> <p>Ko = In situ earth press. coeff.</p> <p>M = Constrained modulus (at Sigma')</p> <p>Cu = Undrained shear strength</p> <p>Ocr = Overconsolidation ratio (OCR = "relative OCR"- generally realistic. If accurate independent OCR available, apply suitable OCR Factor)</p>	<p>SOUNDING PARAMETERS</p> <p>DeltaA = 12 kPa</p> <p>DeltaB = 52 kPa</p> <p>GammaTop = 17.0 kN/m³</p> <p>FactorEd = 34.7</p> <p>ZMc1 = 0.0 kPa</p> <p>ZMB = 0.0 kPa</p> <p>ZMC = 0.0 kPa</p> <p>Zabs = 0.0 m</p> <p>Zw = 1.0 m</p>
---	--	---	--

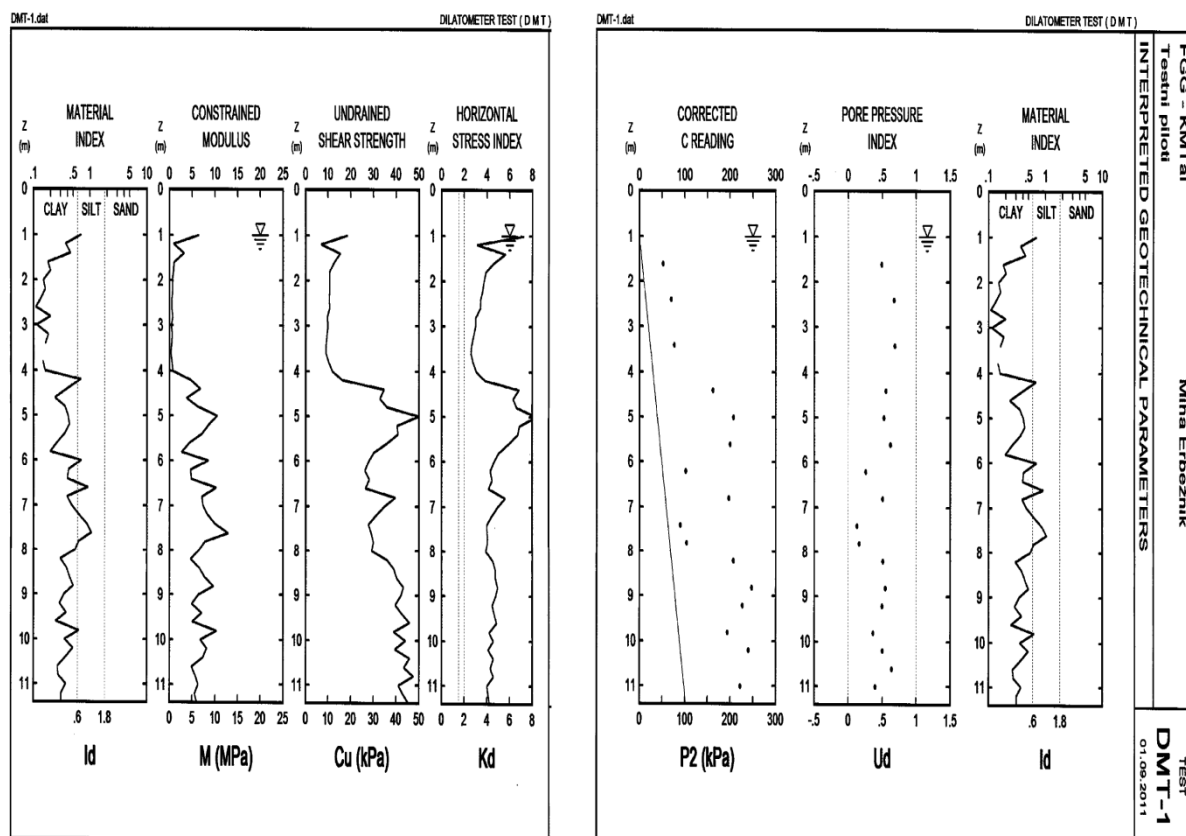
WaterTable at 1.0 m

Reduction formulae according to Marchetti, ASCE Geot. Jnl. Mar. 1980, Vol.109, 299-321; Phi according to TC16 ISSMGE, 2001

Z	A	B	C	Po	P1	P2	Gamma	Sigma'	Uo	Id	Kd	Ed	Ud	Ko	Ocr	Phi	M	Cu	DMT-1
(m)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kPa)	(kN/m ³)	(kPa)	(kPa)			(MPa)				(Deg)	(MPa)	(kPa)	DESCRIPTION
1.0	115	260		123	208		15.7	17	0	0.69	7.2	3.0		1.5	7.4	6.4	19	CLAYEY SILT	
1.2	48	132		59	80		14.7	18	2	0.37	3.1	0.7		0.81	2.0	1.0	7	MUD	
1.4	102	212		112	160		15.7	19	4	0.45	5.6	1.7		1.3	5.0	3.2	15	SILTY CLAY	
1.6	88	168	40	99	116	52	14.7	20	6	0.18	4.6	0.6	0.49	1.1	3.7	1.0	13	MUD	
1.8	80	160		91	108		14.7	21	8	0.20	3.9	0.6		0.97	2.9	0.9	11	MUD	
2.0	82	158		93	106		14.7	22	10	0.15	3.7	0.4		0.94	2.7	0.7	11	MUD	
2.2	85	162		96	110		14.7	23	12	0.16	3.6	0.5		0.91	2.5	0.7	11	MUD	
2.4	86	161	58	97	109	70	14.7	24	14	0.14	3.5	0.4	0.67	0.88	2.3	0.6	11	MUD	
2.6	90	163		102	111		14.7	25	16	0.11	3.4	0.3		0.87	2.3	0.5	11	MUD	
2.8	86	165		97	113		14.7	26	18	0.20	3.0	0.5		0.79	1.9	0.7	10	MUD	
3.0	90	163		102	111		14.7	27	20	0.12	3.0	0.3		0.79	1.9	0.4	10	MUD	
3.2	90	168		101	116		14.7	28	22	0.18	2.8	0.5		0.75	1.7	0.6	10	MUD	
3.4	90	166	65	101	114	77	14.7	29	24	0.16	2.7	0.4	0.69	0.71	1.6	0.5	9	MUD	
3.6	92	163		104	111		13.7	30	26	0.09	2.6	0.3		0.69	1.5	0.3	9	MUD AND/OR PEAT	
3.8	102	178		113	126		14.7	31	27	0.15	2.8	0.4		0.74	1.7	0.5	10	MUD	
4.0	116	195		127	143		14.7	32	29	0.16	3.1	0.5		0.80	2.0	0.7	12	MUD	
4.2	150	296		158	244		15.7	33	31	0.68	3.8	3.0		0.96	2.8	4.6	16	CLAYEY SILT	
4.4	258	410	150	266	358	162	16.7	34	33	0.40	6.8	3.2	0.55	1.4	6.8	6.8	35	SILTY CLAY	
4.6	250	365		259	313		15.7	35	35	0.24	6.3	1.9		1.4	6.0	3.8	33	CLAY	
4.8	272	418		280	366		16.7	37	37	0.35	6.6	3.0		1.4	6.5	6.2	36	SILTY CLAY	
5.0	352	540	195	358	488	207	16.7	38	39	0.41	8.4	4.5	0.53	1.6	9.4	10.5	50	SILTY CLAY	
5.2	305	480		311	428		16.7	39	41	0.43	6.9	4.0		1.4	6.9	8.6	40	SILTY CLAY	
5.4	310	468		317	416		16.7	41	43	0.36	6.7	3.4		1.4	6.7	7.2	41	SILTY CLAY	
5.6	286	412	188	295	360	200	15.7	42	45	0.26	5.9	2.3	0.62	1.3	5.5	4.4	36	CLAY	
5.8	255	360		265	308		15.7	43	47	0.20	5.0	1.5		1.2	4.2	2.7	30	CLAY	
6.0	250	450		255	398		16.7	44	49	0.69	4.6	5.0		1.1	3.7	8.5	28	CLAYEY SILT	
6.2	240	382	90	248	330	102	15.7	46	51	0.42	4.3	2.8	0.26	1.0	3.3	4.6	26	SILTY CLAY	
6.4	255	398		263	346		15.7	47	53	0.39	4.5	2.9		1.1	3.5	4.8	28	SILTY CLAY	
6.6	252	490		255	438		16.7	48	55	0.91	4.2	6.3		1.0	3.1	10.3	26	SILT	
6.8	328	495	185	335	443	197	16.7	50	57	0.39	5.6	3.8	0.50	1.3	5.0	7.2	40	SILTY CLAY	
7.0	305	483		311	431		16.7	51	59	0.47	5.0	4.2		1.2	4.1	7.4	35	SILTY CLAY	
7.2	288	490		293	438		16.7	52	61	0.62	4.4	5.0		1.1	3.5	8.4	31	CLAYEY SILT	
7.4	273	512	78	276	460	90	16.7	54	63	0.86	4.0	6.4	0.13	0.98	2.9	10.0	28	SILT	
7.6	286	572		287	520		16.7	55	65	1.05	4.0	8.1		0.99	3.0	12.9	29	SILT	
7.8	290	490	92	295	438	104	16.7	56	67	0.62	4.0	5.0	0.16	0.99	3.0	7.8	30	CLAYEY SILT	
8.0	288	468		294	416		16.7	58	69	0.54	3.9	4.2		0.97	2.8	6.5	29	SILTY CLAY	
8.2	330	470	195	338	418	207	16.7	59	71	0.30	4.5	2.8	0.51	1.1	3.6	4.7	36	CLAY	
8.4	352	520		359	468		16.7	61	73	0.38	4.7	3.8		1.1	3.8	6.6	39	SILTY CLAY	

Poleg tabelarnega zapisa se lahko karakteristike tal prikaže tudi grafično. Grafi prikazujejo zvezni potek profila tal ter s tem dokaj natančno določitev slojevitosti. Z grafi so prikazane naslednje karakteristike zemljine:

- materialni indeks [I_d],
- edometerski modul pri $\bar{\sigma}_{v0'}$ [M (MPa)],
- nedrenirano strižno trdnost [c_u (kPa)],
- indeks horizontalnega tlaka [K_d],
- korigirana vrednost C [P_2 (kPa)],
- indeks pornega tlaka [U_d].



Slika 35: Grafični prikaz rezultatov DMT preiskave

6.2 Rezultati izračuna nosilnosti po principu modelnega pilota

Analitična rešitev nosilnosti testnega pilota se je izračunala iz rezultatov DMT meritve. Za izračun smo uporabili metodo modelnega pilota.

6.2.1 Izračun po metodi modelnega pilota

Predpostavimo, da je pilot v temeljna tla vgrajen z vtiskovanjem in da je strižni kot zemljine $\varphi = 25^\circ$. Rezultati DMT testa se pričnejo 1 meter pod nivojem terena, zaradi nasutja platoja deponije. Višina nasutja je približno 1 meter in to moramo upoštevati pri izračunu nosilnosti pilota. Ocenimo, da so materialne karakteristike nasutja naslednje:

- specifična teža: $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$,
- strižni kot: $\varphi = 35^\circ$,
- višina nasipnega sloja $h = 1 \text{ m}$.

Izračun mejne nosilnosti pilota se razdeli na izračun nosilnosti konice (noge) ter nosilnosti plašča pilota. Pri izračunu nosilnosti plašča pilota izračunamo posebej odpornost tal, ki jo nudi nasipni material ter posebej odpornost, glede na dobljene karakteristike iz meritev DMT. Izračun nosilnosti plašča pilota:

$$q_s = K_0 \sigma'_v \operatorname{tg} \varphi' = 0,7 \times (21 \text{ kN/m}^3 \times 1 \text{ m}) \times \operatorname{tg} (35^\circ) = 10,29 \text{ kN/m}^2$$

$$A_s = 2 \pi R L = 2 \times 3,14 \times 0,25 \text{ m} \times 1 \text{ m} = 1,57 \text{ m}^2$$

$$Q_{s1} = q_s A_s = 10,29 \text{ kN/m}^2 \times 1,57 \text{ m}^2 = 16,16 \text{ kN}$$

Preglednica 11: Izračun nosilnosti pilota po plašču v koherentnih tleh iz rezultatov DMT

z	d_z	σ'_v	c_u	c_u/σ'_v	$(c_u/\sigma'_v)_{nc}$	q_s	$q_s d_z$
1,5	1	20	13	0,65	0,25	8,06	8,06
2,5	1	25	11	0,44	0,25	8,29	8,29
3,5	1	30	10	0,33	0,25	8,66	8,66
4,5	1	36	29	0,81	0,25	16,16	16,16
5,5	1	43	38	0,88	0,25	20,21	20,21
6,5	1	49	28	0,57	0,25	18,52	18,52

7,5	1	56	30	0,54	0,25	20,49	20,49
						$\Sigma = q_{s;k;i}$	<u>100,40</u>

$$Q_{s2} = \sum_i A_{s;i} q_{s;k;i} = 1,53 \text{ m} \times 100,4 \text{ kN/m} = 153,62 \text{ kN}$$

$$A_s = 2 \pi R = 2 \times 3,14 \times 0,25 \text{ m} = 1,53 \text{ m}$$

$$Q_s = Q_{s1} + Q_{s2} = 153,62 \text{ kN} + 16,16 \text{ kN} = 170 \text{ kN}$$

$$Q_b = A_b q_b = 0,196 \text{ m}^2 \times 270 \text{ kN/m}^2 = 53,0 \text{ kN}$$

$$q_b = N_c c_u = 9 \times 30 \text{ kPa} = 270,0 \text{ kPa}$$

$$A_b = \pi R^2 = 3,14 \times (0,25 \text{ m})^2 = 0,196 \text{ m}^2$$

$$Q_k = Q_s + Q_b = 169,78 \text{ kN} + 53,0 \text{ kN} = 223 \text{ kN}$$

6.3 Rezultat statičnega obremenilnega preizkusa

Rezultate statičnega obremenilnega testa, opravljenega 22.10.2011, smo obdelali po naslednjem postopku:

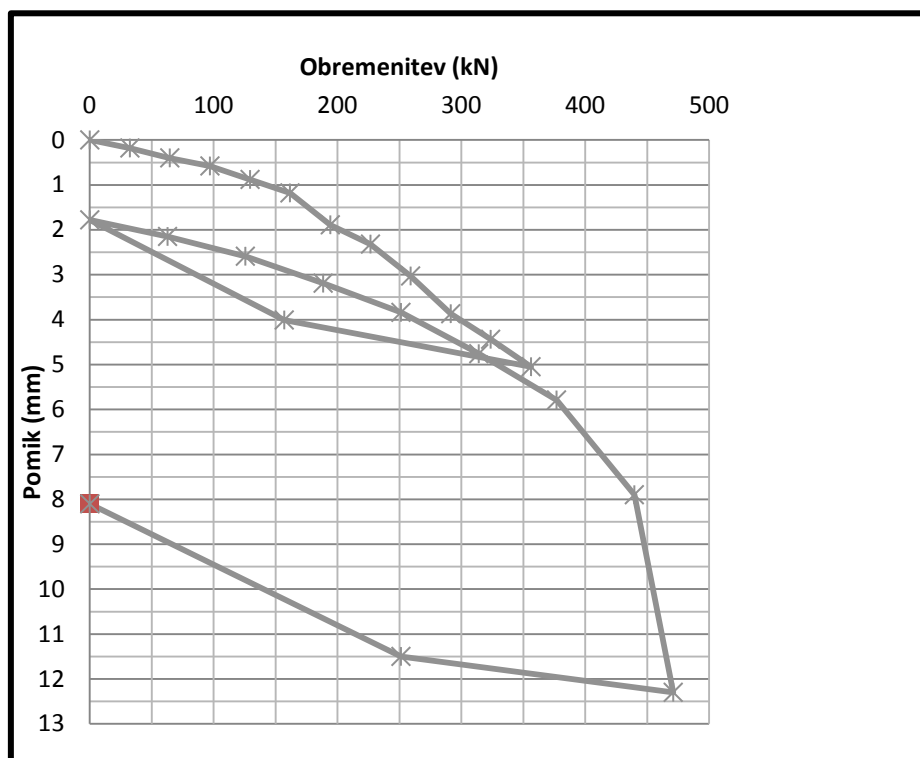
- za vsako bremensko stopnjo smo določili povprečje treh merjenih pomikov, odčitanih po umiritvi pilota,
- iz rezultatov smo izračunali pomik pilota za vsako bremensko stopnjo,
- podatke smo obdelali v programu excel, ki izriše krivuljo obremenitev – pomik.

Za ugotavljanje mejne nosilnosti iz grafa smo uporabili metodo DIN 4026 ter metodo Davisson, ki jo predpisuje tudi ameriški standard ASTM.

Preglednica 12: Rezultat statičnega obremenilnega testa

Obremenitev (kN)	0	32,4	64,6	97	129,4	161,6	194,2	226,6	259	291,4	323,6	356,2	157	0
Pomik (mm)	0	0,18	0,4	0,62	0,84	1,23	1,89	2,49	2,80	3,55	4,20	5,01	4,01	1,78

Obremenitev (kN)	0	62,8	125,6	188,4	251,2	314	376,8	439,6	471	251,2	0
Pomik (mm)	1,78	2,15	2,59	3,19	3,84	4,76	5,79	7,9	12,30	11,5	8,1



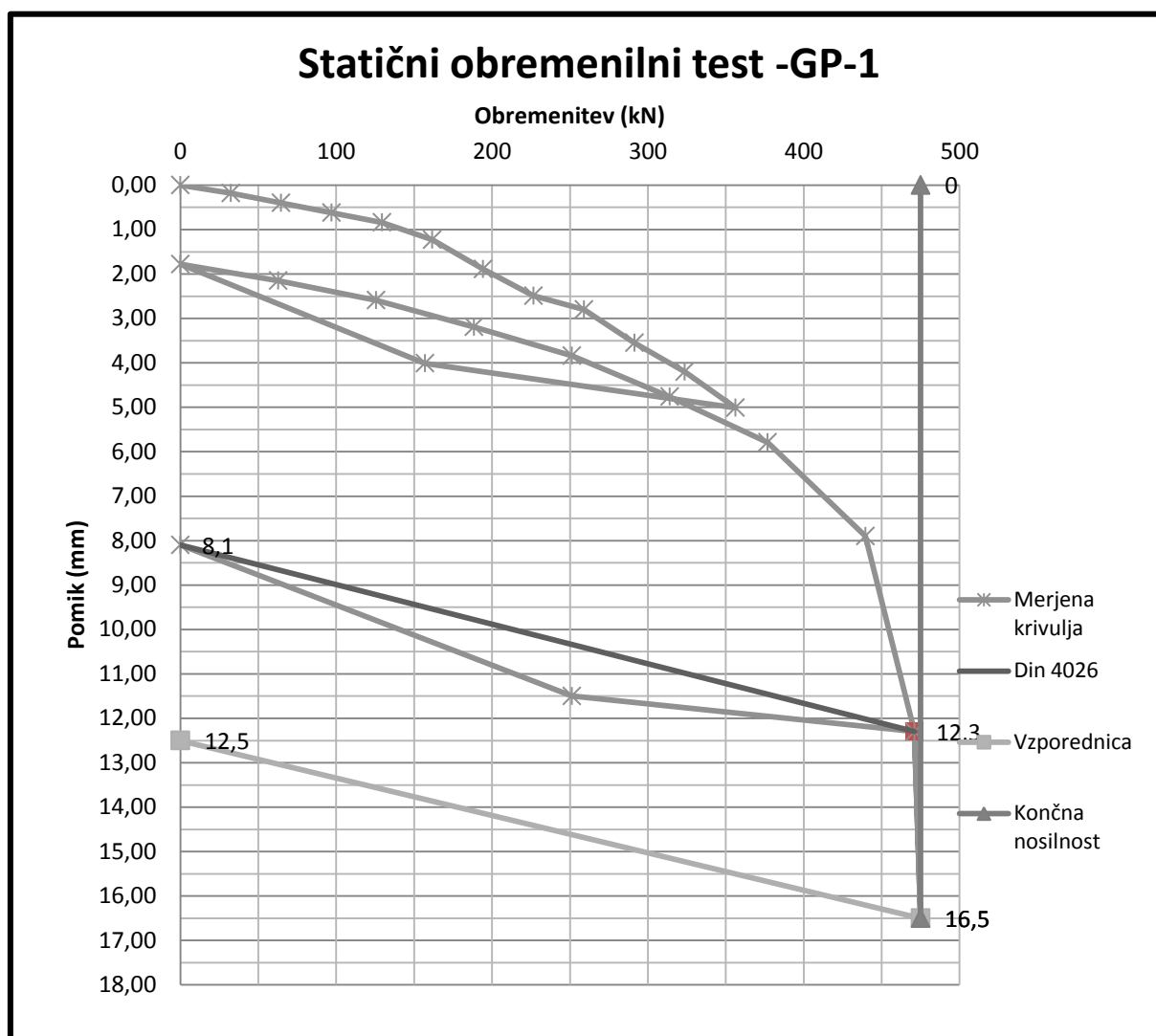
Graf 1: Prikaz izmerjene krivulje statičnega obremenilnega testa v grafu obremenitev pomik

6.3.1 Izračun mejne nosilnosti po metodi DIN 4026

Izračun po metodi DIN 4026 je opisan v poglavju 3. Mejno nosilnost določimo po naslednjem postopku:

- s premico DIN 4026 povežemo točki z vrednostjo pomika 12,30 mm, ki predstavlja maksimalni pomik pilota med obremenjevanjem in 8,10 mm, ki predstavlja pomik po razbremenitvi testnega pilota,
- izračunamo mejni pomik, ki je enak $\rho_n = 0,025D = 0,025 \times 500 \text{ mm} = 12,5 \text{ mm}$,
- mejni pomik označimo na abscisni osi in narišemo vzporednico premici DIN 4026,

- merjeno krivuljo linearno podaljšamo do vzporednice in na ordinatni osi odčitamo mejno nosilnost.



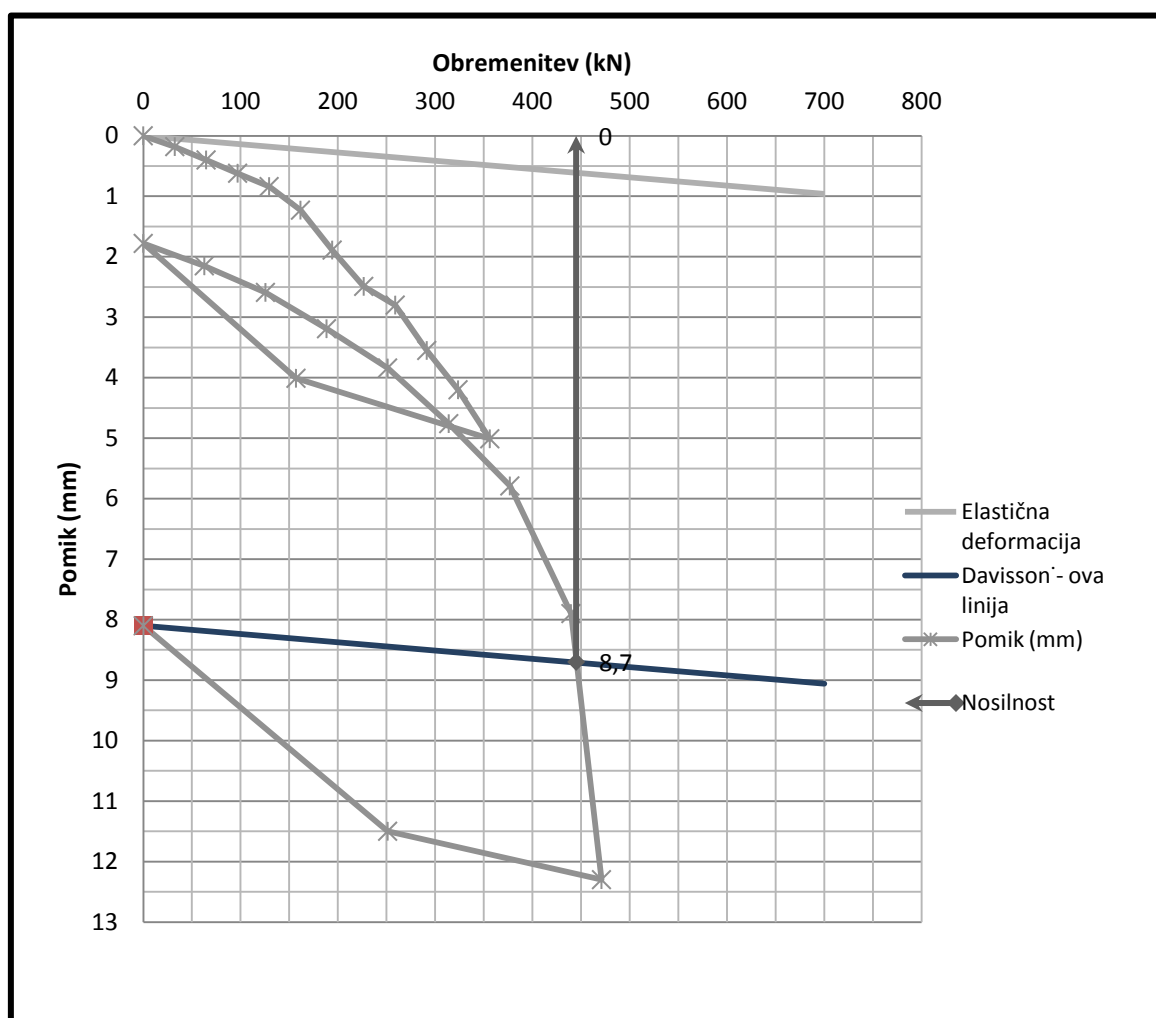
Graf 2: Določitev nosilnosti po metodi DIN 4026 iz rezultatov statičnega obremenilnega test

Mejna nosilnost testnega pilota P1 z metodo DIN 4026 znaša 475 kN.

6.3.2 Izračun mejne nosilnosti po metodi Davisson

Izračun po metodi Davissona je ravno tako opisan v poglavju 3.3. Izračun enačbe za določitev elastične premice ter določitev vzporednice je podana v spodnjem obrazcu.

Podatki	Izračun
$E= 3150 \text{ kN/cm}^2$ $L=800 \text{ cm}$ $D=50 \text{ cm}$ $A= 1963,5 \text{ cm}^2$	Elastična premica $p_1 = P_1L/AE = (0 \text{ kN} * 800 \text{ cm})/(1963,5 \text{ cm}^2 * 3150 \text{ kN/cm}^2)=0 \text{ cm}$ T1 (0;0) $p_2 = P_2L/AE= (700 \text{ kN} * 800 \text{ cm})/(1963,5 \text{ cm}^2 * 3150 \text{ kN/cm}^2)=0,09 \text{ cm}$
Poljubna izbira	T2 (700;0,91)
$P_1=0 \text{ kN}$	Vzporednica
$P_2=700 \text{ kN}$	T3 (0;8,1), T4 (700;9,01)



Graf 3: Določitev nosilnosti po Davissonovi metodi iz rezultatov statičnega obremenilnega testa

Mejna nosilnost testnega pilota z Davissonovim kriterijem znaša 450 kN.

6.4 Rezultati dinamičnega obremenilnega testa

Rezultati dinamičnega obremenilnega testa na pilotu P1 glede na meritev 3, ki smo jo opravili 29.9.2011, so prikazani v spodnji preglednici.

Preglednica 13: Rezultati dinamičnega obremenilnega preizkusa z analizo CAPWAP

Meritev	MQ [≤ 3]	d [mm]	\overline{Q}_s [mm]	\overline{Q}_t [mm]	\overline{S}_s [kN/m/s]	\overline{S}_t [kN/m/s]	R_s [kN]	R_t [kN]	R_u [kN]
3	2,78	9,58	6,23	5,8	1,31	1,31	383,8	290,8	93,0

kjer so:

- MQ – kvaliteta primerjave krivulj,
- d – izmerjeni pomik glave pilota,
- \overline{Q}_s – povprečen elastični pomik tal po plašču pilota,
- \overline{Q}_t – povprečen elastični pomik tal pod nogo pilota,
- \overline{S}_s – Smithov faktor dušenja tal po plašču pilota,
- \overline{S}_t – Smithov faktor dušenja po nogi pilota,
- R_s – nosilnost plašča pilota,
- R_t – nosilnost noge pilota,
- R_u – mejna nosilnost pilota.

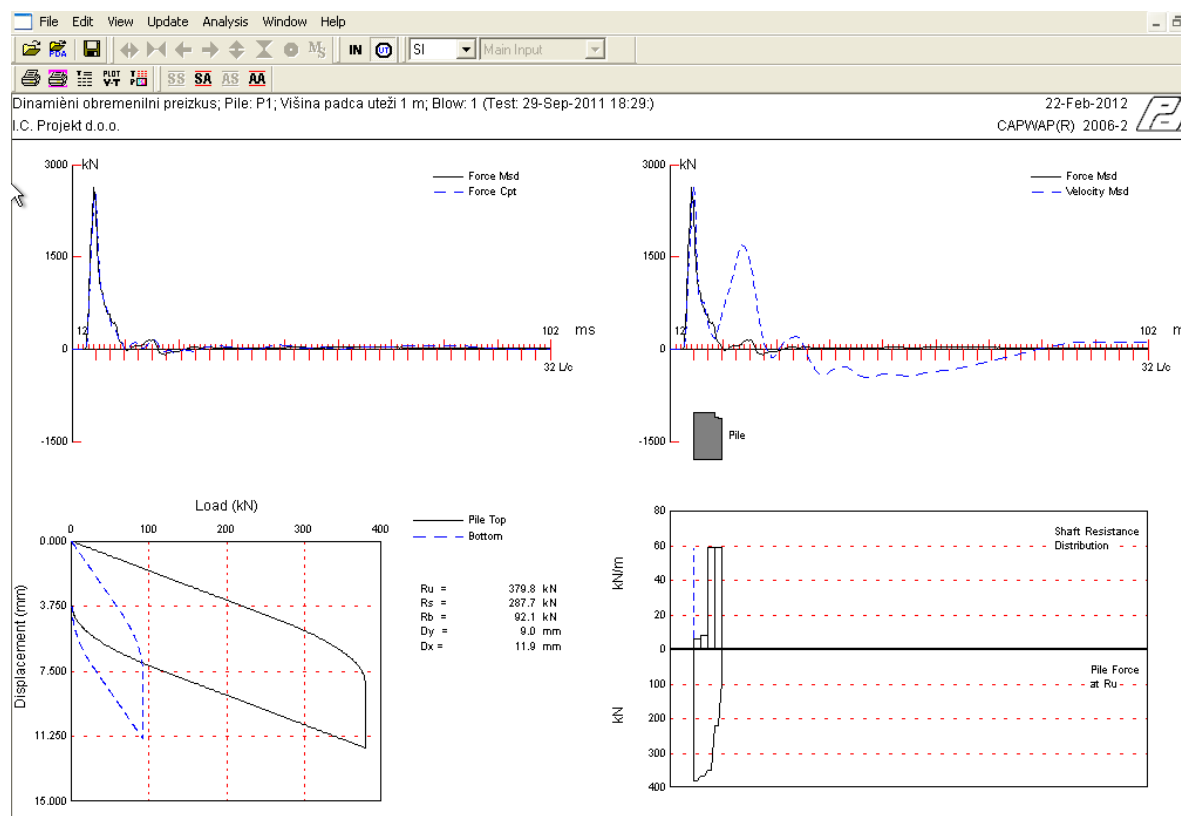
Preglednica 14: Spreminjanje glavnih parametrov ter opazovanje vrednosti MQ

\overline{S}_s [kN/m/s]	\overline{S}_t [kN/m/s]	\overline{Q}_s [mm]	\overline{Q}_t [mm]	R_u [kN]	MQ
1,31	1,31	6,11	5,86	383,80	2,78
1,5	1,31	6,11	5,86	383,80	3,02
0,8	1,31	6,11	5,86	383,80	3,06
1,31	1,56	6,11	5,86	383,80	2,89
1,31	0,90	6,11	5,86	383,80	2,86
1,31	1,31	5,8	5,86	383,80	3,61

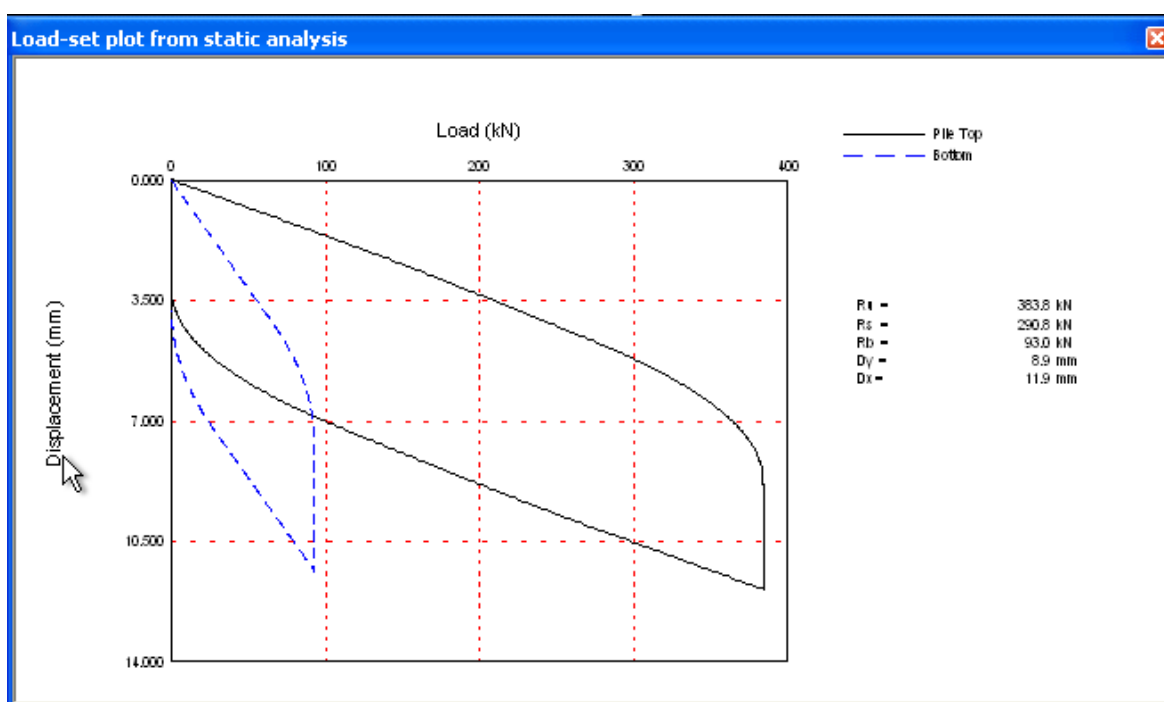
1,31	1,31	6,5	5,86	383,80	2,92
1,31	1,31	6,11	5,5	383,80	3,55
1,31	1,31	6,11	6,2	383,80	2,89
1,31	1,31	6,11	5,86	350	3,08
1,31	1,31	6,11	5,86	420	3,68

Rezultat prikažemo v grafični obliki s štirimi grafi, ki jih prikazuje slika 36:

- levi zgornji graf prikazuje primerjavo merjene in računske krivulje,
- desni zgornji graf prikazuje merjeni krivulji sile in hitrosti merskega mesta v odvisnosti od časa,
- levi spodnji graf prikazuje krivuljo v grafu obtežba – pomik, različno za glavo in nogo pilota,
- desni spodnji graf prikazuje porazdelitev odpornosti zemljine po plašču pilota.



Slika 36: Prikaz rezultatov analize CAPWAP



Graf 4: Prikaz krivulje v grafu pomik – obtežba, pridobljene z analizo CAPWAP

Poleg grafičnih rezultatov program CAPWAP omogoča tudi tabelarično izpisane rezultate z vsemi najpomembnejšimi podatki. V spodnji preglednici so prevodi pomembnejših angleških izrazov, ki nastopajo v tabelah.

Preglednica 15: Prevodi pomembnejših angleških izrazov iz tabele rezultatov analize CAPWAP

Shaft	Pllašč pilota
Toe	Noga pilota
Soil	Zemljina
Quake	Elastični pomik
Damping Factor	Faktor dušenja
Velocity	Hitrost
Displacement	Pomik
Resistance	Odpornost
Compressive stress	Tlačna napetost
Tensile stress	Natezna napetost
Unloading	Razbremenitev

Preglednica 16: Tabela rezultatov analize CAPWAP (1)

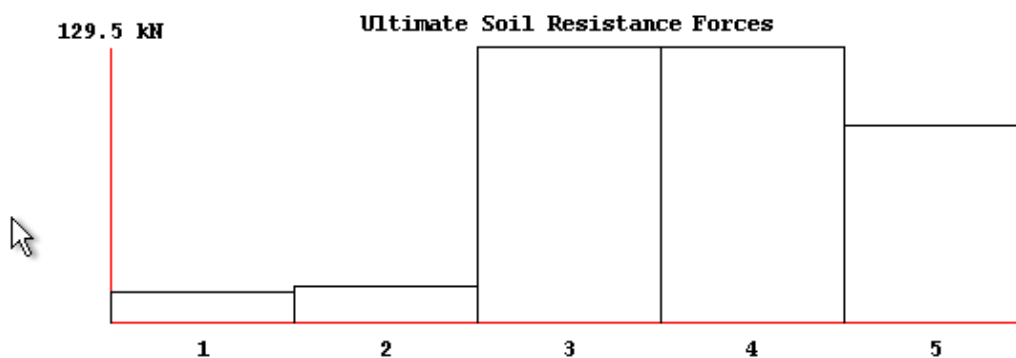
Dinamični obremenilni preizkus; Pile: P1 Test: 29-Sep-2011 18:29:
Višina padca uteži 1 m; Blow: 1 CAPWAP (R) 2006-2
I.C. Projekt d.o.o. OP: Miha Erbežnik

CAPWAP SUMMARY RESULTS									
Total CAPWAP Capacity:		383.8; along Shaft		290.8; at Toe		93.0 kN			
Soil Sgmt No.	Dist. Below Gages m	Depth Below Grade m	Ru kN	Force in Pile kN	Sum of Ru kN	Unit Resist. (Depth) kN/m	Unit Resist. (Area) kPa	Smith Damping Factor s/m	Quake mm
				383.8					
1	2.2	1.5	14.2	369.6	14.2	9.63	6.13	1.074	2.310
2	4.3	3.7	17.7	351.9	31.9	8.14	5.18	1.074	4.622
3	6.5	5.8	129.4	222.5	161.3	59.49	37.88	1.074	6.424
4	8.7	8.0	129.5	93.0	290.8	59.54	37.90	1.611	6.424
Avg. Shaft			72.7			36.35	23.14	1.313	6.113
Toe			93.0				473.65	1.313	5.868
Soil Model Parameters/Extensions						Shaft	Toe		
Case Damping Factor						0.234	0.075		
Damping Type						Smith	Smith		
Unloading Quake			(% of loading quake)			57	30		
Reloading Level			(% of Ru)			0	0		
Unloading Level			(% of Ru)			14			
Resistance Gap (included in Toe Quake) (mm)							2.864		
Soil Plug Weight			(kN)				2.08		
CAPWAP match quality				= 2.78	(Force Match)	; RSA = 0			
Observed: final set				= 3.000 mm;	blow count	= 333 b/m			
Computed: final set				= 2.792 mm;	blow count	= 358 b/m			
max. Top Comp. Stress				= 13.6 MPa	(T= 16.7 ms, max= 1.000 x Top)				
max. Comp. Stress				= 13.6 MPa	(Z= 1.1 m, T= 16.7 ms)				
max. Tens. Stress				= -3.89 MPa	(Z= 5.4 m, T= 23.4 ms)				
max. Energy (EMX)				= 6.23 kJ;	max. Measured Top Displ. (DMX)= 9.58 mm				

Če povzamemo rezultate v preglednici, lahko ugotovimo:

- pilot razdelimo na štiri končne elemente tal, ki delujejo na plašč in enega, ki deluje na nogo pilota. Obseg končnih elementov je za vse enak in meri 1,57 m. Vsakemu končnemu elementu se določi oddaljenost ali od merskega mesta ali od nivoja tal,

- odpornost tal je v prvem in drugem končnem elementu tal majhna (17,7 kN), nato pa se odpornost v 3. in 4. elementu zelo poveča na vrednost okoli 129,5 kN. To vidimo v tabeli vrednostih R_q za posamezni končni element tal,
- odpornost lahko izrazimo tudi na meter ali na površino končnega elementa,
- pri Smithovih faktorjih dušenja opazimo, da na prvih treh elementih deluje približno enak faktor dušenja, velikosti 1,074 s/m, v 4. elementu pa se velikost dušenja poveča na vrednost 1,6 s/m. Ta vrednost je zelo velika, vendar za meljnato glinene sloje z velikimi elastičnimi pomiki to ni neobičajno. Vrednost dušenja tal pod nogo pilota je vrednosti 1,3 s/m,
- elastični pomiki tal so na 1. in 2. elementu manjši kakor pri 3. in 4. elementu. Iz tega lahko sklepamo, da zemljina v 1. in 2. elementu pri manjšem pomiku doseže mejno statično odpornost,
- pomemben podatek je tudi, da je pod nogo pilota praznina velikosti 2,8 mm, ki je nastala kot posledica gibanja pilota v negativno smer. Praznina je vključena v elastični pomik noge pilota, torej dokler praznina ni zapolnjena, na nogo pilota ne deluje nobena odpornostna sila,
- pri analizi smo dobili tudi podatek, da je na nogo pilota pritrjena dodatna teža, »soil plug«, ki je posledica sprijetja cementne vode in tal na dnu vrtine.



Slika 37: Mejna odpornost posameznega končnega elementa tal

Preglednica 17: Tabela rezultatov analize CAPWAP (2)

Dinamični obremenilni preizkus; Pile: P1					Test: 29-Sep-2011 18:29:				
Višina padca uteži 1 m; Blow: 1					CAPWAP (R) 2006-2				
I.C. Projekt d.o.o.					OP: Miha Erbežnik				
Segment Number	Dist. B.G. m	Impedance kN/m/s	Imped. Change %	Tension Slack mm	Tension Eff. MPa	Compression Slack mm	Compression Eff. MPa	Perim. m	Soil Plug kN
1	1.09	1629.00	0.00	0.000	0.000	0.000	0.000	1.571	0.00
7	7.61	1509.00	-7.37	0.000	0.000	-1.000	1.000	1.571	1.00
8	8.70	1509.00	-7.37	0.000	0.000	0.000	0.000	1.571	0.00

EXTREMA TABLE								
Pile Sgmt No.	Dist. Below Gages m	max. Force kN	min. Force kN	max. Comp. Stress MPa	max. Tens. Stress MPa	max. Trnsfd. Energy kJ	max. Veloc. m/s	max. Displ. mm
1	1.1	2669.8	-82.6	13.6	-0.42	6.23	1.6	9.570
2	2.2	2356.1	-219.2	12.0	-1.12	5.97	1.4	9.532
3	3.3	2198.3	-511.5	11.2	-2.61	5.35	1.3	9.489
4	4.3	1974.5	-682.2	10.1	-3.47	5.00	1.2	9.470
5	5.4	1770.0	-763.3	9.0	-3.89	4.48	1.2	9.500
6	6.5	1192.9	-650.5	6.1	-3.31	4.18	1.5	9.544
7	7.6	1354.8	-540.5	6.9	-2.75	2.61	1.3	9.586
8	8.7	703.1	-41.4	3.6	-0.21	0.59	1.6	8.325
Absolute	1.1			13.6			(T =	16.7 ms)
	5.4				-3.89		(T =	23.4 ms)

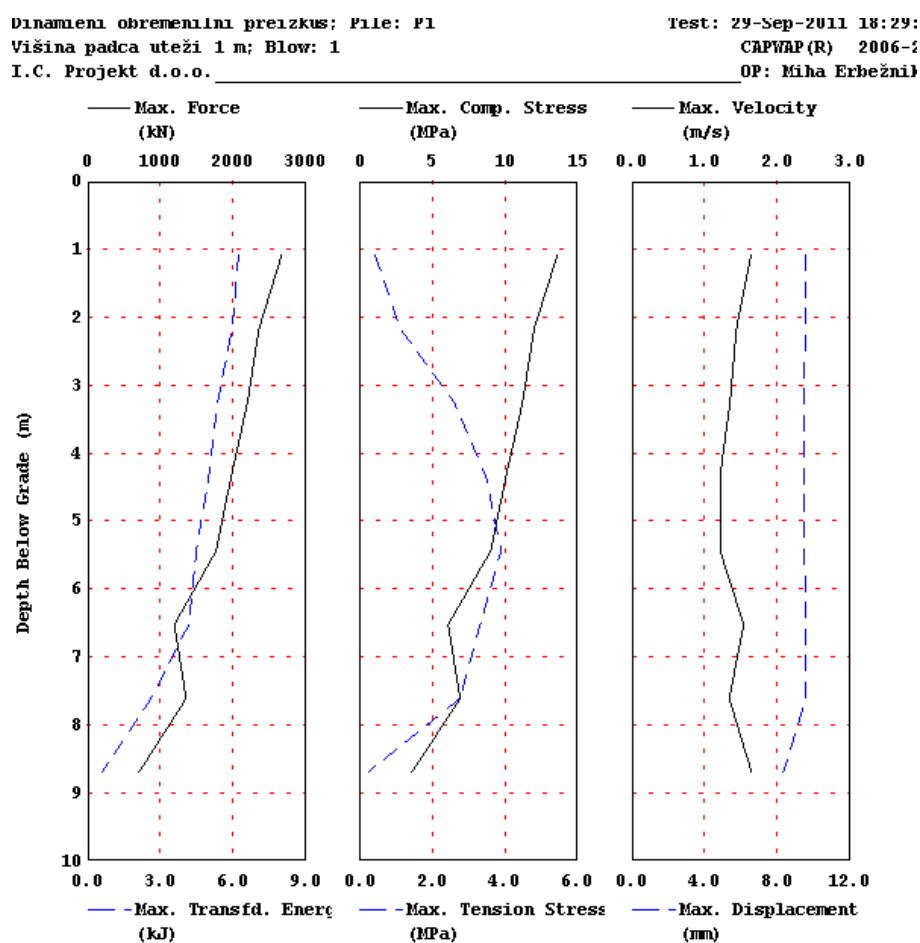
PILE PROFILE AND PILE MODEL				
Depth m	Area cm ²	E-Modulus MPa	Spec. Weight kN/m ³	Perim. m
0.00	1963.50	27000.0	25.000	1.571
8.70	1963.50	27000.0	25.000	1.571
Pole Area	0.196	m²		

Preglednica 16 prikazuje rezultate CAPWAP analize, ki se nanašajo na model pilota. Z analizo smo ugotovili naslednje karakteristike pilota:

- analiza je pokazala, da se impedanca na 7. in 8. končnem elementu zmanjša za približno 7,5 %, iz česar lahko sklepamo, da se premer pilota na dnu malce zmanjša,
- z analizo smo ugotovili morebitno razpoko velikosti 1 mm na globini 7 m,
- tlačna sila in posledično napetost je bila pričakovano največja na glavi pilota in se z globino manjšala do končne vrednosti 703 kN na elementu 8.,

- natezna sila in posledično napetost je bila največja na elementu 5. na globini 5,4 m, kjer je znašala -763,3 kN,
- hitrosti gibanja delcev pilota so bile največje na robovih in najmanjše na sredini pilota,
- pomiki posameznih končnih elementov pa se med seboj skoraj ne razlikujejo in so velikosti približno 9,5 mm.

Slika 38 prikazuje tri grafe, ki predstavljajo spreminjanje šestih karakteristik po globini pilota. Desni graf s polno črto prikazuje potek sile zaradi udarca uteži po pilotu, medtem ko črtkana modra črta predstavlja zmanjševanje energije po pilotu. Srednji graf predstavlja potek tlačne napetosti po pilotu (polna črna črta), potek natezne napetosti predstavlja modra črtkana črta. Zadnji levi graf slike 38 predstavlja potek hitrosti (črna polna črta) in pomika (modra črtkana črta) po pilotu.



Slika 38: Prikaz spreminjanja karakteristik po pilotu

6.5 Časovno zaporedje izvedbe eksperimenta ter trajanje posamezne izvedbe

Kratice uporabljene v preglednici:

- DOT – dinamični obremenilni test,
- SOT – statični obremenilni test,
- DMT – meritev s ploski dilatometerom,
- KZRS – konstrukcija za zagotovitev reakcijske sile.

Preglednica 18: Časovni potek del

Vrsta dela	Datum izvedbe	Ocena trajanja posamezne izvedbe [ur]
Vgradnja testnih pilotov P1 in P2 (izkop in betoniranje)	19.8.2011	4
Izdelava armature za kape pilotov P1 in P2	24.8.2011	2
Priprava in izdelava kape pilotov P1 in P2	27.8.2011	3
Izvedba meritev DMT	1.9.2011	3
Demontaža opažna kape pilotov P1 in P2	10.9.2011	1
Postavitev stolpa za izvedbo DOT na pilotu P1	20.9.2011	4
Priprava na izvedbo DOT (izdelava lukenj za pritrditev merilcev)	26.9.2011	1
Izvedba DOT (pritrditev merilcev in izvedba testa)	26.9.2011	1
Analiza rezultatov DOT	27.9.2011	1
Izvedba DOT (pritrditev merilcev in izvedba)	29.9.2011	1
Analiza rezultatov DOT	30.9.2011	3
Porušitev kape pilota P1	5.10.2011	3

Obdelava glave pilota P1 na pripravo SOT	6.10.2011	1
Računanje različnih možnosti izdelave KZRS	7.10.2011	3
Prevrtanje kape pilota P2 za pripravo členkastega vpetja KZRS za izvedbo SOT	8.10.2011	1
Izdelava KZRS	10.10.2011 – 22.10.2011	15
Priprava na izvedbo SOT	22.10.2011	1
Izvedba SOT	22.10.2011	8
Analiza rezultatov SOT	23.10.2011	2
Demontaža KZRS	25.10.2011	8
Skupno	19.8.2011-25.10.2011	66

Iz preglednice vidimo, da smo za celotno izvedbo potrebovali malo več kot 2 meseca in po naših ocenah okoli 66 ur. Če razdelimo eksperiment na izvedbo pilotov, dinamični obremenilni test in statični obremenilni test, lahko zapišemo naslednje ugotovitve:

- za izvedbo vgradnje in dograditev kape testnih pilotov P1 in P2 smo potrebovali samo 10 ur. Vendar smo morali nadaljevanje eksperimenta prekiniti za 28 dni, da je beton dosegel maksimalno tlačno trdnost,
- za izvedbo dinamičnega obremenilnega testa smo za vse skupaj potrebovali 10 ur, če k temu prištejemo še demontažo kape pilota in pri tem ne upoštevamo časa za analizo rezultatov. Dinamični obremenilni test smo morali izvesti dvakrat, ker so bili rezultati prvega testa slabi zaradi slabo pritrjenega merilca deformacij. Izvedba prvega dinamičnega obremenilnega testa je bila opravljena 37 dni po vgradnji pilotov in 29 dni po izgradnji kape, izvedba drugega dinamičnega obremenilnega testa pa 32 dni od izgradnje kape,
- za izvedbo statičnega obremenilnega testa smo potrebovali skupaj 39 ur. V ta seštevek je všteta tudi demontaža konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile. Izvedba statičnega

obremenilnega testa je bila opravljena 24 dni za izvedbo dinamičnega obremenilnega testa.

Za izvedbo eksperimenta smo poleg ocene trajanja posamezne faze ocenjevali tudi približne stroške, ki smo jih potrebovali, da smo uspešno izvedli eksperiment. Predvsem gre velika zahvala različnim pravnim in zasebnim subjektom za pomoč in brezplačno opravilo določene storitve. Oceno smo opravili izključno zaradi ekonomske primerjave testov.

Preglednica 19: Pregled stroškov eksperimenta

Vrsta dela	Ocena cene dela [€]	Obrazložitev za dela, ki so bila opravljena brezplačno.
Izgradnja testnih pilotov P1 in P2		
Transport vrtalne garniture	/	Zahvala gre podjetju Geokop.d.o.o.
Izkop vrtin	/	
Material	300	
Betoniranje	/	
Meritev DMT		
Izvedba meritve in analiza	/	Zahvala gre Fakulteti za Gradbeništvo in geodezijo, Univerze v Ljubljani
Najem stroja za vtiskanje sonde v tla	/	Zahvala gre podjetju ZRMK.d.o.o.
Dinamični obremenilni test		
Transport stolpa iz skladišča na gradbišče ter nazaj	300	
Najem avtodvigala za manevriranje s stolpom	500	
Najem avtodvigala za izvedbo testa (dvig uteži)	/	Zahvala gre podjetniku Mitji Rakovcu
Statični obremenilni test		

Izdelava konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile	/	Zahvala gre podjetniku Mitji Rakovcu
Material za izdelavo konstrukcije	/	
Transport balasta	200	
Najem avtodvigala za postavitev balasta na konstrukcijo	300	
Najem betonskih zidakov	100	
Skupaj	1700	

Za celoten eksperiment smo potrebovali okvirno okoli 1700 €, ob dejstvu, da je bilo mnogo del narejenih z dobro voljo ljudi. Če primerjamo testa med seboj, vidimo, da v primeru našega eksperimenta med njima ni bistvenih razlik. Vendar pa to splošno ne velja. Za konec še omenimo, da se cena takšnega eksperimenta za naročnika giblje okoli 12000 evrov, brez upoštevanja izgradnje pilotov.

7 INTERPRETACIJA REZULTATOV

7.1 Statični obremenilni test

Rezultat statičnega obremenilnega testa testnega pilota P1 je enak 450 kN, če izberemo srednjo vrednost obeh oblik interpretacije merjene krivulje. Rezultat statičnega obremenilnega testa pilota je predstavljen s krivuljo na grafu obtežba – pomik. Meritev smo opravili 22.10.2011 v dveh fazah. V prvi fazi smo pilot obremenjevali z bremenskimi stopnjami velikosti 32,4 kN ter pilot po nanosu obremenitve 356,4 kN v dveh stopnjah razbremenili. Po razbremenitvi smo pilot zopet obremenili, tokrat z bremenskimi stopnjami velikosti 62,4 kN, do maksimalne obremenitve 471 kN. Po tej obtežbi konstrukcija za zagotovitev reakcijske sile ni bila zmožna prevzeti dodatne obremenitve ter se je zaradi tega meritev zaključila. Vendar pa se je posedek pilota pri tej obremenitvi zelo povečal v primerjavi s pomikom ob predhodni bremenski stopnji. Zaradi tega smo se tudi odločili, da kljub ne izkoriščeni celotni odpornosti tal, dobljeni rezultat izkazuje zadostno verjetnost za določitev statične nosilnosti pilota.

Krivulja, pridobljena pri ponovnem obremenjevanju, predstavlja tipično krivuljo za vrsto temeljnih tal, v katera je vgrajen testni pilot, torej mehka meljno – glinena temeljna tla. Z večanjem obtežbe se pomiki sprva povečujejo počasi, pri večjih obremenitvah pa vse hitreje. Pri spremembi obtežbe iz 314 kN na 377 kN se pilot prvič pomakne za več kot 1 mm. Od obtežbe 377 kN pa je pomik pilota ob vsaki naslednji obremenitvi veliko večji od predhodnega. Končni pomik pilota znaša 12,3 mm, ob tem, da se ob zadnji bremenski stopnji pilot posede za več kakor 4 mm. To dokazuje, da je odpornost zemljine skoraj povsem izčrpana.

7.2 Dinamični obremenilni test

Rezultat mejne nosilnosti dinamičnega obremenilnega testa meritve 3 je enak 384 kN. Z analizo CAPWAP smo dobili tudi porazdelitev nosilnosti po plašču, ki znaša 291 kN in nosilnosti noge pilota, ki znaša 93 kN.

Prvi pričakovan podatek glede na rezultate terenske preiskave DMT je, da je odpornost plašča večja od odpornosti noge (konice). Razmerje med nosilnostjo plašča in nosilnostjo noge je enako 3,12:1, kar pomeni, da plašč nosi 3,12-krat več, kakor noga pilota. Odpornost zemljine po plašču pa ni enakomerno razdeljena, ampak je veliko večja v končnih elementih zemljine 3 in 4, kakor v elementih 1 in 2. In sicer je odpornost v spodnjih dveh elementih 10-krat večja, kakor v zgornjih dveh, kar je tudi v skladu z rezultati terenskih preiskav, saj so temeljna tla do globine 4 metrov zelo slaba, z zelo majhno vrednostjo nedrenirane strižne trdnosti.

V grafu obtežba – pomik nastopata dve krivulji, ki sta narisani s črno polno črto in črtkano modro črto. Črna polna črta predstavlja merjeno krivuljo navideznega statičnega obremenilnega testa glave pilota. Modra črtkana črta pa predstavlja navidezni statični obremenilni test konice pilota. Iz grafa lahko ugotovimo, da bi se pilot linearno posedal do trenutka porušitve odpornosti tal. Končni posedek pilota bi znašal 12 mm.

Za zaključek lahko analiziramo še grafe na sliki 38, ki predstavljajo spreminjanje sile, napetosti, hitrosti in pomika po globini pilota. Levi graf lepo prestavi zmanjšanje velikosti sile z globino, istočasno pa tudi manjšanje energije udarca po globini pilota. Sila se linearno zmanjšuje z globino, na globini 5,5 m pa do globine 7,5 m je odpornost zemljine večja, kar prikazuje tudi odklon krivulje. Krivulja nateznih napetosti pokaže, da so največji nategi na globini 5,5 m ter najmanjši na robovih pilota. Pomik pilota je po vsej globini skoraj konstanten, le na konici pilota se zmanjša.

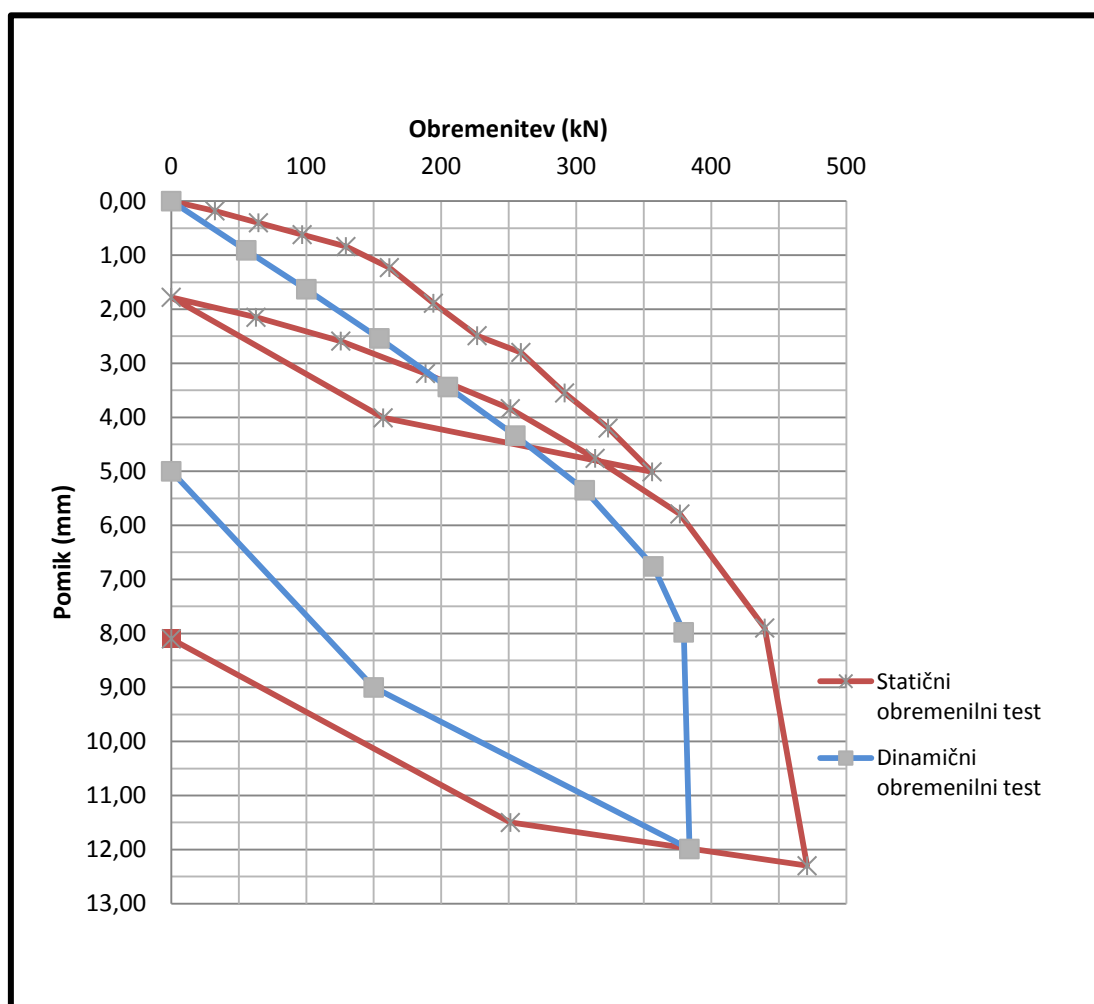
7.3 Primerjava krivulj obremenitev – posedek

Primerjava obeh krivulj na skupnem grafu najbolje prikaže razlike med rezultatoma opravljenih testov. Če sta krivulji med seboj podobni, potem lahko brez zadržkov potrdimo izmerjeno mejno nosilnost pilota. V kolikor pa se krivulji med seboj razlikujeta, je najprej potrebno ugotoviti, zakaj je do razlik prišlo in ali so dobljeni rezultati pravilni.

V našem primeru se krivulji med seboj razlikujeta. Bistvena razlika je v tem, da je nosilnost pilota, izmerjena s statičnim obremenilnim testom, za dobrih 70 kN večja od nosilnosti pilota,

pridobljene z dinamičnim obremenilnim testom. Če podrobneje pogledamo, ugotovimo da sta krivulji dinamičnega in prvega statičnega obremenilnega testa približno vzporedni od 140 kN naprej. Vendar pa žal iz tega ne moramo veliko sklepati, saj pilot v prvem statičnem obremenilnem poskusu ni bil obremenjen do porušitve temeljnih tal.

Razlogov za razlikovanje merjenih krivulj je lahko veliko. Vendar sklepamo, da je razlika posledica vrstnega reda izvedbe posameznega testa in časovne razlike med izvedbo testov. Možnost za povečanje nosilnosti je tudi dodatno potiskanje pilota v temeljna tla in v bolj nosilni sloj tal, vendar je to le predpostavka.



Graf 5: Primerjava krivulj dinamičnega in statičnega obremenilnega testa

8 ZAKLJUČEK

V diplomskem delu smo naredili primerjavo dveh obremenilnih testov pilotov na vgrajenem testnem pilotu. Zaradi tega smo 19.8.2011 vgradili dva uvertana armirano betonska testna pilota P1 in P2 v barjanska tla. Testna pilota sta bila enaka, dolžine 8 m in premera 50 cm. Omejena finančna sredstva smo porabili zgolj za izvedbo obeh obremenilnih testov na istem testnem pilotu P1. Medtem pa smo testni pilot P2 uspešno uporabili pri izvedbi konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile, potrebne za izvedbo statičnega obremenilnega testa.

Najprej smo 26.9.2011 in 29.9.2011 izvedli 4 meritve dinamičnega obremenilnega testa. Meritvi 1 in 2 smo zavrgli zaradi slabe pritrditve merilca deformacij na pilota, tako da smo analizo s programom CAPWAP naredili na meritvi 3. Pred izvedbo meritev smo morali postaviti stolp za spust uteži na glavo pilota ter nanj pritrčiti drogovje z utežjo. Utež je imela maso 10 kN in smo jo spustili z višine 1 metra.

Po izvedbi meritev dinamičnega obremenilnega testa smo opravili analizo CAPWAP, katere še nismo v celoti poznali in zaradi tega smo potrebovali veliko časa, da smo določili mejno nosilnost testnega pilota. Nosilnost testnega pilota P1 z analizo CAPWAP iz meritve 3 je 384 kN. Nosilnost plašča pilota je 293 kN in nosilnost noge (konice) pilota je bila enaka 93 kN.

Po izračunu končne nosilnosti testnega pilota iz dinamičnega obremenilnega testa smo podatek o končni nosilnosti uporabili za statični izračun ravnotežja konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile, ki smo jo morali postaviti za izvedbo statičnega obremenilnega testa. Pred izvedbo statičnega obremenilnega testa smo morali testni pilot primerno obdelati in po izračunu ravnotežja postaviti konstrukcijo za zagotovitev reakcijske sile na terenu.

Statični obremenilni test smo na testnem pilotu P1 izvedli 22.10.2011. Pri izvedbi statičnega obremenilnega testa smo testni pilot obremenili ter razbremenili v dveh fazah. Končna vrednost sile, ki smo jo nanесли na testni pilot, je bila 471 kN in pri tem je bil pomik testnega pilota 12,30 mm. Konstrukcija za zagotavljanje reakcijske sile nam višje sile ni dopuščala, vendar iz grafa obtežba – pomik vidimo, da je bila maksimalna obtežba zadostna, da lahko

izračunamo mejno nosilnost pilota iz statičnega obremenilnega testa. Mejna nosilnost iz statičnega obremenilnega testa je enaka 450 kN in jo izračunamo iz grafa pomik – obtežba z metodo DIN 4026.

Primerjava krivulj statičnega in dinamičnega obremenilnega testa pokaže, da je mejna nosilnost iz dinamičnega obremenilnega testa za dobrih 70 kN manjša od nosilnosti, pridobljene iz statičnega obremenilnega testa. Razlika predstavlja 18 % mejne nosilnosti. Vendar v primerjavi z rezultatom računske nosilnosti iz terenskih preiskav DMT, ki je 223 kN, lahko ugotovimo, da je nosilnost precej večja ne glede na vrsto testa. Razlika je lahko faktor več dejavnikov. Lahko je posledica ne najboljše meritve dinamičnega obremenilnega testa, vrstnega reda izvedbe posameznega testa itd..

Iz opravljenega testiranja, analize in rezultatov opazimo, da so razlike med obremenilnima testoma zelo velike, tako v smislu izvedbe terenskih meritev, kakor tudi analize in interpretacije rezultatov. Pri primerjavi časovnega poteka obeh testov ugotovimo, da smo za celotno pripravo dinamičnega obremenilnega testa potrebovali več časa, predvsem na račun izgradnje kape pilota. Sama gradnja ni bila časovno zamudna, temveč je bilo potrebno počakati 28 dni, da je beton pridobil primerno tlačno trdnost. Za pripravo ter izvedbo meritev dinamičnega obremenilnega testa pa smo potrebovali veliko manj časa, kot za pripravo in izvedbo meritev statičnega obremenilnega testa. Veliko časa smo porabili pri analizi rezultatov, saj s programom CAPWAP še nismo bili dobro seznanjeni. Pri statičnem obremenilnem testu smo največ časa porabili pri pripravi konstrukcije za zagotovitev reakcijske sile in pri sami izvedbi meritev. Torej smo potrebovali več časa, da smo lahko opravili dinamični obremenilni test, medtem ko je bila sama izvedba testa veliko hitrejša od izvedbe statičnega obremenilnega testa.

Med izvedbo smo spremljali tudi približno oceno stroškov posameznega obremenilnega testa pilota. Ugotovili smo, da so stroški obeh testov pri našem eksperimentu približno enaki. Vendar moramo upoštevati, da zaradi pomoči različnih pravnih in zasebnih subjektov v izračun niso vključeni vsi stroški.

Končna ugotovitev je, da sta oba testa primerna za izvedbo meritev mejne nosilnosti pilota. Razlog za razliko v mejni nosilnosti pilota glede na posamezni test je po naših ocenah predvsem v časovnem poteku izvedbe eksperimenta. Med izvedbo meritev dinamičnega in statičnega obremenilnega testa je namreč minilo 25 dni.

VIRI

Gerbec, A., Logar, J., Robas, A., Majes, B. 2004. Prve izkušnje z uporabo dilatometra v Sloveniji. V: Gerbec, A. (ur.), Logar, J. (ur.). Razprave četrtega posvetovanja slovenskih geoteknikov, Rogaška Slatina 04, Rogaška Slatina, 9. do 11. junij 2004. Maribor: Slovensko geotehniško društvo: str. 165-174.

Majes, B. 2011. Globoko temeljenje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 11 str.

Majes, B. 2011. Globoko temeljenje. Statični obremenilni preizkus nosilnosti vertikalno obremenjenega kola. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 7 str.

Pile Dynamics. 2006. CAPWAP- Case Pile Wave Analysis Program. Background Report. Cleveland, Pile Dynamics: 80 str.

Pile Dynamics. 2008. Pile driving Analyzer, User's Manual. Cleveland, Pile Dynamics: 118 str.

Pile Dynamics. 2004. PDA-W Manual of Operation. Cleveland, Pile Dynamics: 48 str.

Strniša, G. 1998. Pilotiranje, dinamične meritve in analize. Ljubljana, SLP: 6 str.

Strniša, G. 2000. Dinamični obremenilni test (DOT). Postopek izvedbe. Ljubljana, SLP: 44 str.

Standardi:

ASTM 1143 – 43: 1994 – Standard Test Method for Piles Under Static Axial Compressive Load.

ASTM D4945: 2000 – Standard Test Method for High – Strain Dynamic Testing of Piles.

oSIST prEN ISO 22477 – 1: 2006 – Geotehnično preiskovanje in preskušanje – Preskušanje geotehničnih konstrukcij – 1. del: Preskušanje nosilnih pilotov s statično osno stiskalno obremenitvijo

SIST EN 1997-1: 2005 – Evrokod 7 – Geotehnično projektiranje – 1.del: Splošna pravila.