



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**VYUŽITÍ VÝSLEDKŮ STATICKÝCH PENETRAČNÍCH
ZKOUŠEK V METODĚ PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ PRO
VRTANÉ VELKOPRŮMĚROVÉ PILOTY**

UTILIZATION OF RESULTS OF STATIC PENETRATION TESTS IN THE METHOD OF TRANSFER
FUNCTIONS FOR DRILLED LARGE-DIAMETER PILES

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Juraj Štetiar

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Juraj Chalmovský, PhD.

BRNO 2021



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

| | |
|--------------------------------|---|
| Studijní program | B3607 Stavební inženýrství |
| Typ studijního programu | Bakalářský studijní program s prezenční formou studia |
| Studijní obor | 3647R013 Konstrukce a dopravní stavby |
| Pracoviště | Ústav geotechniky |

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | |
|------------------------|---|
| Student | Juraj Štetiar |
| Název | Využití výsledků statických penetračních zkoušek v metodě přenosových funkcí pro vrtané velkopřůměrové piloty |
| Vedoucí práce | Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D. |
| Datum zadání | 30. 11. 2021 |
| Datum odevzdání | 27. 5. 2022 |

V Brně dne 30. 11. 2021

doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Miroslav Bajer, CSc.
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

- HULLA, J.; TURČEK, P. Zakladanie stavieb. 2004.
- MASOPIUST, J. Vrtané piloty. Čeněk a Ježek. 1994.
- REDDY, E. S. B., O'REILLY, M., CHAPMAN, D. A software to predict behavior of tension piles. Computers & Structures, 1997, vol. 62, no. 4, p. 653-658.
- HIDEKI HIRAYMA. Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions. Soils and foundations, 1990, vol. 30, no. 1, p. 55-64.
- PARKER, F., REESE, L. C. Experimental and analytical studies of behavior of single piles in sand under lateral and axial loading. 1970.
- KARSLRUD, K. Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results. NTNU, 2012.
- BOHN, C., LOPES DOS SANTOS, A., FRANK, R. Development of axial pile load transfer curves based on instrumented load tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, vol. 143, no. 1.
- CHALMOVSKY, J. Využití metody přenosových funkcí pro predikci chování hlubinných základů v ČR. Souhrnná výzkumná zpráva, 2021.
- Výstupy ze statických penetračních zkoušek (poskytovatel z praxe).
- Výstupy ze statických zatěžovacích zkoušek velkopřůměrových vrtaných pilot (poskytovatel z praxe).

Další podklady budou předány v průběhu řešení práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Předmětem bakalářské práce je využití výsledků statických penetračních zkoušek pro stanovení hodnot parametrů vstupujících do metody přenosových funkcí (MPF). Metoda přenosových funkcí bude v práci použita pro predikci mezní zatěžovací křivky a závislosti mezní plášťové tření - hloubka osově zatížených vrtaných velkopřůměrových pilot. V první etapě budou zpracovatelem práce vyhodnoceny výsledky statických penetračních zkoušek. Následně budou stanoveny hodnoty vstupních parametrů MPF a provedena predikce mezní zatěžovací křivky. Predikce bude srovnána s výsledky statické zatěžovací zkoušky v předmětné lokalitě a případně korigována. Získané závislosti mezní plášťové tření - napětí (hloubka) budou porovnány s dalšími doporučeními standardně používanými v ČR a SR.

STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část závěrečné práce zpracovaná podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (povinná součást závěrečné práce).
2. Přílohy textové části závěrečné práce zpracované podle platné Směrnice VUT "Úprava, odevzdávání, a zveřejňování závěrečných prací" a platné Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání a zveřejňování závěrečných prací na FAST VUT" (nepovinná součást závěrečné práce v případě, že přílohy nejsou součástí textové části závěrečné práce, ale textovou část doplňují).

ABSTRAKT

Práca sa zaoberá využitím výsledkov statických penetračných skúšok a metódy prenosových funkcií na analýzu vybraných vrtných veľkopriemerových pilót. V úvodnej časti je ozrejmeneý teoretický základ, ktorý sa týka statických penetračných skúšok, metódy prenosových funkcií, materiálových modelov a regresných koeficientov v nelineárnej metóde výpočtu sadania pilót. Na teoretický úvod nadviažu ďalšie kapitoly, v ktorých sú uvedené poznatky aplikované na konkrétne praktické prípady.

Tretia časť sa skladá z geotechnickej interpretácie výsledkov dvoch statických zaťažovacích skúšok v dvoch rôznych lokalitách pomocou grafických a číselných výstupov (medzné zaťažovacie krivky, distribúcia síl po dĺžke pilóty, závislostí posunov a pretvorení na hĺbke pilóty, priebehy plášťových trení a ďalšie).

Nasledujúca časť sa zaoberá vyhodnotením CPT v mieste zaťažovacej skúšky a zostavením výpočtového profilu v danom mieste na základe získaných dát.

V časti piatej prebehne inverzná analýza zaťažovacích skúšok pomocou metódy prenosových funkcií v programe vyvíjanom na Ústave geotechniky Fakulty stavebnej VUT v Brne.

Inverznú analýzu zaťažovacích skúšok metódou konečných prvkov s využitím dát z CPT je možné nájsť v kapitole číslo 6. V rámci tejto analýzy bude na problematiku aplikovaných a zároveň porovnaných niekoľko materiálových modelov.

Na túto analýzu v časti piatej nadviaže porovnanie priamych korelačných metód stanovenia medzného plášťového trenia z dát z CPT s výsledkami zo spätnej analýzy pomocou MPF pre zistenie najvhodnejšej korelačnej metódy v riešených podmienkach.

Napokon budú zo zistených údajov upravené regresné koeficienty pre analýzu druhého medzného stavu osamelých pilót nelineárnou metódou (podľa *Masopusta*^[3]).

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Metóda prenosových funkcií, veľkopriemerové vrtné pilóty, medzná zaťažovacia krivka, plášťové trenie, spätná analýza, statické penetračné skúšky, sadanie pilóty, metóda konečných prvkov, numerická analýza, metóda hraničných prvkov, statická zaťažovacia skúška, nelineárna metóda výpočtu sadania pilót.

ABSTRACT

This thesis is focused on the use of the results of cone penetration tests and the method of transfer functions for the design of drilled large-diameter piles. The introductory part clarifies the theoretical basis of cone penetration testing, method of transfer functions, various material models and the regression coefficients in the nonlinear method of pile settlement calculation. The theoretical introduction will be followed by other chapters in which the theory is applied to specific practical cases.

The third part consists of geotechnical interpretation of the results of two static load tests in two different localities using graphical and numerical outputs (limit load curves, force distribution along the length of the pile, dependences of displacements and deformations on the pile depth, shaft frictions and more).

The next part deals with the evaluation of the CPT at the site of the load test and the compilation of the calculation profile at the site based on the obtained data.

In the fifth part there will be an inverse analysis of load tests using the method of transfer functions in the software developed at the Institute of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering, Brno University of Technology.

An inverse analysis of load tests using finite elements method and obtained data from the CPT can be found in chapter 6. Within this analysis, several material models will be applied and compared to the issue.

This analysis will be followed in the fifth part by a comparison of direct correlation methods for determining the ultimate pile shaft friction from CPT data with the results of inverse analysis by MTF to determine the most suitable method.

Finally, from the obtained data the regression coefficients will be adjusted for the calculation of the second limit state of lone piles by a nonlinear method (according to *Masopust*^[3]).

KEYWORDS

Transfer function method, large diameter drilled piles, limit load curve, sleeve (shaft) friction, inverse analysis, cone penetration tests, pile settlement, finite elements method, numerical analysis, boundary elements method, static load test, nonlinear pile settlement calculation method.

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

ŠTETIAR, Juraj. *Využití výsledků statických penetračních zkoušek v metodě přenosových funkcí pro vrtané velkopřůměrové piloty*. Brno, 2022, 149 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí bakalářské práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

POĎAKOVANIE

Rád by som sa poďakoval v prvom rade p. Ing. Jurajovi Chalmovskému, PhD. za nadšenie pre tému, veľmi zodpovedný a profesionálny prístup, obrovské množstvo času stráveného pri konzultáciách, odborné a profesné rady mne a mojim spolužiakom, rozšírenie obzorov a predovšetkým za motiváciu pokračovať v rámci štúdia a práce v geotechnickom inžinierstve.

Veľmi ďakujem aj mojej rodine a priateľom za podporu, trpezlivosť a toleranciu v priebehu bakalárskeho štúdia.

Nesmiem zabudnúť ani na p. RNDr. Ivana Poula, PhD., ktorý ma k problematike CPT priviedol, dal mi množstvo profesných rád, odborných výkladov, zaujímavej literatúry a možnosť vyskúšať si geotechniku v plnom rozsahu v praxi.

Napokon by som sa chcel poďakovať Mgr. Josefovi Víškovi za vôľu a silu CPT v neľahkých terénnych a technických podmienkach úspešne realizovať.

PREHLÁSENIE AUTORA O ZHODE LISTINNEJ A ELEKTRONICKEJ FORMY ZÁVEREČNEJ PRÁCE

Prehlasujem, že elektronická forma odovzdanej bakalárskej práce s názvom *Využití výsledků statických penetračních zkoušek v metodě přenosových funkcí pro vrtané velkopřůměrové piloty* je zhodná s odovzdanou listinnou formou.

V Brne dňa 27. 5. 2022

Juraj Štetiar

autor práce

PREHLÁSENIE AUTORA O PÔVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že bakalársku prácu s názvom *Využití výsledků statických penetračních zkoušek v metodě přenosových funkcí pro vrtané velkopřůměrové piloty* som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Juraja Chalmovského, PhD. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informáci, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

V Brne dňa 27. 5. 2022

Juraj Štetiar
autor práce



OBSAH

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | ÚVOD | 13 |
| 2 | TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY | 15 |
| 2.1 | Statická penetračná skúška | 15 |
| 2.1.1 | Princíp realizácie statickej penetračnej skúšky | 15 |
| 2.1.2 | Metodika vyhodnocovania statickej penetračnej skúšky, využitie CPT pre klasifikáciu zemín | 22 |
| 2.1.3 | Korelačné vzťahy pre odvodenie medzného plášťového trenia a medzného napätia na päte z výsledkov CPT | 30 |
| 2.2 | Metóda prenosových funkcií | 43 |
| 2.2.1 | Základný princíp | 43 |
| 2.2.2 | Metóda efektívnych napätí (β metóda) | 47 |
| 2.2.3 | PMpLTO (Pile-Micropile Load Transfer Optimalization) | 48 |
| 2.3 | Metóda konečných prvkov – popis použitých materiálových modelov | 53 |
| 2.3.1 | Mohr-Coulombov materiálový model | 53 |
| 2.3.2 | Hardening Soil materiálový model | 53 |
| 2.3.3 | Hardening Soil + Small Strain Stiffness materiálový model | 54 |
| 2.4 | Analytický spôsob stanovenia MZK podľa Masopusta (nelineárna metóda) | 55 |
| 3 | GEOTECHNICKÁ INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK | 57 |
| 3.1 | Statická zaťažovacia skúška mimosystémovej pilóty Z202 (mostný objekt č. C202 – Krnov, cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat) | 57 |
| 3.1.1 | Základné informácie | 57 |
| 3.1.2 | Inžiniersko-geologické podmienky v lokalite | 58 |
| 3.1.3 | Charakteristika pilóty a zaťažovacej skúšky | 59 |
| 3.1.4 | Interpretácia výsledkov zaťažovacej skúšky | 63 |
| 3.2 | Statická zaťažovacia skúška mimosystémovej pilóty Z203 (mostný objekt č. S0203 – Nebory, cesta I. triedy I/11 Nebory - Oldřichovice) | 73 |
| 3.2.1 | Základné informácie | 73 |
| 3.2.2 | Inžiniersko-geologické podmienky v lokalite | 74 |
| 3.2.3 | Charakteristika pilóty a zaťažovacej skúšky | 75 |
| 3.2.4 | Interpretácia výsledkov zaťažovacej skúšky | 76 |
| 4 | INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV CPT SKÚŠOK | 84 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 4.1 | Interpretácia CPT pri skúšobnej zaťažovacej pilóte Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | 84 |
| 4.1.1 | CPeT-IT | 85 |
| 4.1.2 | Vlastné vyhodnotenie v MS Excel | 90 |
| 4.1.3 | Zostavenie výsledného profilu v mieste pilóty | 90 |
| 4.2 | Interpretácia CPT pri skúšobnej zaťažovacej pilóte Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice | 91 |
| 4.2.1 | CPeT-IT | 92 |
| 4.2.2 | Vlastné vyhodnotenie v MS Excel | 97 |
| 4.2.3 | Zostavenie výsledného zemného profilu | 97 |
| 5 | INVERZNÁ ANALÝZA ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK PILÓT POMOCOU METÓDY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ | 98 |
| 5.1 | Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | 98 |
| 5.1.1 | Stupeň analýzy 1M | 98 |
| 5.1.2 | Stupeň analýzy 2A | 101 |
| 5.2 | Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice | 103 |
| 5.2.1 | Stupeň analýzy 2A | 103 |
| 6 | INVERZNÁ ANALÝZA ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK PILÓT POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV (PLAXIS 2D) | 106 |
| 6.1 | Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | 106 |
| 6.2 | Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice | 111 |
| 6.2.1 | Odvodenie vstupných parametrov do materiálových modelov | 111 |
| 6.2.2 | Výsledky inverznej analýzy pomocou MKP | 116 |
| 7 | STANOVENIE MEDZNÝCH PLÁŠŤOVÝCH TRENÍ Z CPT POMOCOU PRIAMYCH KORELAČNÝCH METÓD A POROVNANIE S VÝSLEDKAMI INVERZNEJ ANALÝZY (MPF) | 120 |
| 7.1.1 | Porovnanie priebehu medzného plášťového trenia získaného z priamych metód vyhodnotenia CPT a spätnej analýzy | 120 |
| 7.1.2 | Vyhodnotenie použitých metód v prehľadnej tabuľke | 122 |



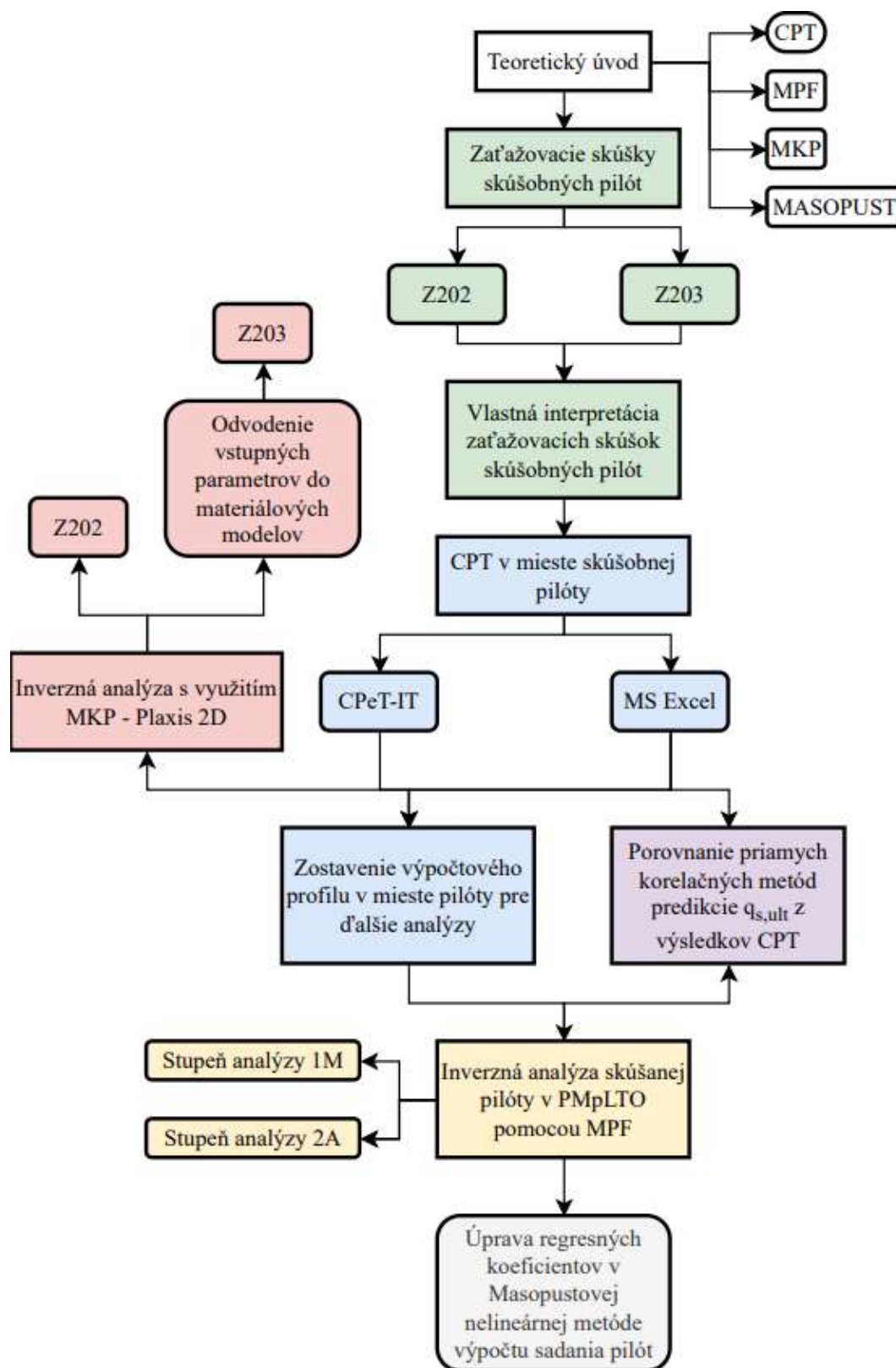
| | | |
|----------|--|------------|
| 8 | REGRESNÁ ANALÝZA ZÁVISLOSTÍ: MEDZNÉ PLÁŠŤOVÉ TRENIE - HĽBKA | 125 |
| 8.1 | Regresná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | 125 |
| 8.2 | Regresná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice | 127 |
| 9 | ZÁVER | 127 |
| | ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV | 131 |
| | ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN | 136 |
| | ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV | 140 |
| | ZOZNAM POUŽITÝCH GRAFOV | 142 |
| | ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK | 146 |
| | ZOZNAM PRÍLOH | 149 |

1 ÚVOD

Kombinácia zaťažovacej skúšky a CPT (statickej penetračnej skúšky) v rámci jednej lokality je v podmienkach ČR a SR veľmi ojedinelá, a to hlavne z dôvodu časovej, finančnej a technickej náročnosti. Získané dáta boli v tejto práci využité na nasledujúce ciele:

1. Geotechnická interpretácia výsledkov dvoch statických zaťažovacích skúšok s tenzometrickým meraním po dĺžke pilóty v dvoch rôznych lokalitách (obchvat Krnova I/57, mostný objekt C202; I/11 Nebory – Oldřichovice, mostný objekt C203).
2. Vyhodnotenie CPT skúšok (realizovaných v bezprostrednej blízkosti zaťažovaných pilót) v programe CPeT-IT od spoločnosti *Geologismik*^[17], vlastná interpretácia v MS Excel podľa publikácie *Interpretation of cone penetration tests (Robertson*^{[10][W6])} so zohľadnením noriem ČSN EN ISO 22476-1^[N5], ČSN EN ISO 14688^[N2], ČSN 73 6133^[N4], ČSN 75 2410^[N1], ČSN P 73 1005^[N3]. Zostavenie finálneho výpočtového profilu pre analýzu pilót so zohľadnením všetkých známych dát.
3. Spätná analýza zaťažovacej skúšky v softvéri *PMpLTC*^[16] (fungujúcom na princípe metódy prenosových funkcií – metóda hraničných prvkov), vyvíjanom na Ústave geotechniky Fakulty stavebnej VUT v Brne, optimalizácia vstupných parametrov.
4. Inverzná analýza zaťažovacích skúšok v programe *Plaxis 2D*^[6] (fungujúcom na princípe metódy konečných prvkov) s využitím pevnostných a deformačných vlastností, stavových veličín zemín získaných koreláciami z CPT. Porovnanie niekoľkých materiálových modelov, prenosových funkcií z MKP s prenosovými funkciami získanými z vyhodnotenia zaťažovacej skúšky, ilustrácia vplyvu uhlu dilatancie pri numerickej simulácii na prenosové funkcie.
5. Porovnanie vybraných priamych korelačných metód predikcie medzného plášťového trenia pilóty z nameraných dát z CPT s výsledkami zo spätnej analýzy pomocou metódy prenosových funkcií.
6. Využitie získaných poznatkov na úpravu regresných koeficientov v nelineárnej *Masopustovej*^[3] metóde výpočtu sadania pilót.

Schematické zhrnutie obsahu a nadväzností jednotlivých kapitol práce je znázornené na obrázku 1.1:



Obrázok č. 1.1: Prehľadná schéma postupu v práci

2 TEORETICKÝ ÚVOD DO PROBLEMATIKY

2.1 Statická penetrační skúška

Jednu z doplnkových metód inžinierskogeologického prieskumu predstavujú penetračné skúšky. Medzi poľné penetračné skúšky patrí statická penetračná skúška (CPT – Cone Penetration Test), dynamická penetračná skúška (DPT – Dynamic Penetration Test), štandardná penetračná skúška (SPT – Standard Penetration test) a tiažová penetračná skúška (WST – Weight Sounding Test). Z výsledkov penetračných skúšok je možné určiť:

- priebeh jednotlivých vrstiev
- typ zeminy
- uľahlosť (stavové veličiny), šmykové parametre, pretvárne a konsolidačné, prípadne iné geotechnické parametre

2.1.1 Princíp realizácie statickej penetračnej skúšky

Princíp statickej penetračnej skúšky spočíva v zatláčaní penetračného hrotu pomocou kolóny penetračných tyčí (štandardná dĺžka tyče 1 m) konštantnou rýchlosťou 2 cm/s do zeminy. V priebehu skúšky sa zaznamenáva hodnota odporu na hrote (q_c), plášťové trenie (f_s), zároveň sa meria pórový tlak v jednom alebo viacerých miestach na povrchu penetračného hrotu.

Prístrojové vybavenie (ČSN EN ISO 22476-1^[N5])

Penetračný hrot

Rozlišuje sa niekoľko typov penetračných hrotov:

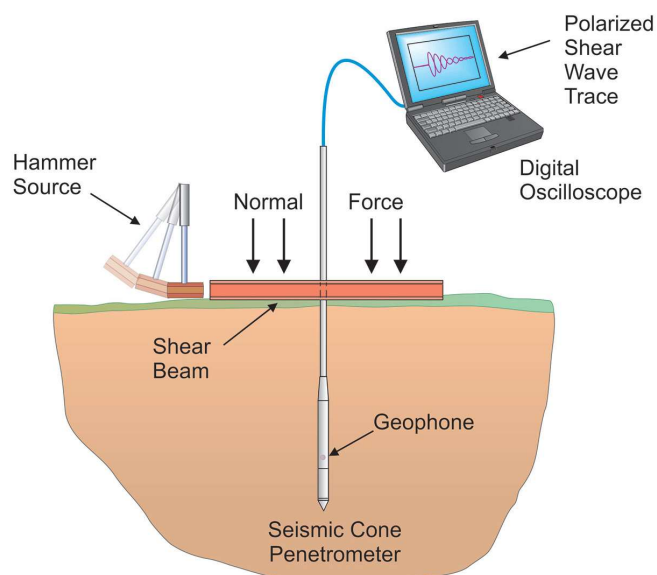
V prípade použitia *elektrického hrotu* (označenie skúšky CPT_u, obrázok č. 2.1) sú dáta zaznamenávané automaticky v hĺbkovom intervale 1 cm. Na rozdiel od mechanického hrotu je meraný aj pórový tlak (u). Snímač pórového tlaku je pred meraním nutné špeciálnym postupom pripraviť, tento proces sa líši podľa typu použitého hrotu.

Obrázok č. 2.1: Elektrický hrot^[W1]

Pri skúške s *mechanickým hrotom* (označenie CPT, obrázok č. 2.2) je záznam manuálne odčítaný zo strojového počítača, na ktorom sa pri zatlačaní sútyčia zobrazí v tesnom slede za sebou niekoľko hodnôt. Dáta sú zaznamenávané po úsekoch dĺžky 20 cm, teda päťkrát na dĺžku jednej tyče. V priebehu skúšky nie je meraný pórový tlak a oproti elektrickému hrotu je nastavenie prístroja pred skúškou jednoduchšie, no odčítanie dát vyžaduje väčšie skúsenosti. Zároveň sa jedná o najpoužívanejší typ hrotu v podmienkach ČR a SR.

Obrázok č. 2.2: Mechanický hrot^[W1]

Seizmický CPT hrot (označenie SCPT, obrázok 2.3) nie je v miestnych podmienkach veľmi využívaný, no pomocou merania rýchlosti šírenia vln zeminou umožňuje presnejšie získať hodnoty šmykových modulov (kapitola 2.1.2). Tento typ hrotu je populárny najmä v zahraničí pre odhad dynamickej odozvy zeminy počas zemetrasení, explozívnych výbuchov, vibrácií od strojov a podobne.



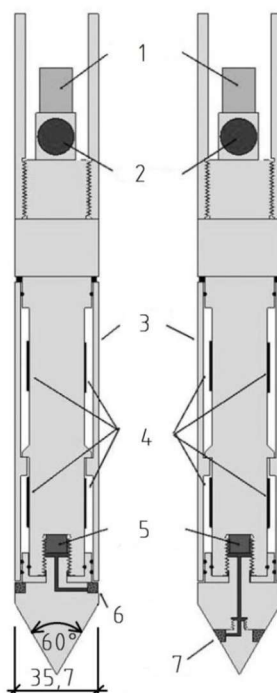
Obrázok č. 2.3: Schéma skúšky so seizmickým hrotom^[W1]

Samotný penetračný hrot je osadený vnútornými snímačmi, tie merajú odpor na hrote (silu na špičke), bočné (plášťové) trenie na manžete a pórové tlaky v jednom alebo viacerých miestach povrchu penetračného hrotu. Snímač pórového tlaku by nemal vykazovať žiadne výraznejšie deformácie. Na meranie odklonu penetračného hrotu slúži zabudovaný inklinometer, zabudované čidlo musí mať merací rozsah aspoň $\pm 15^\circ$ od vertikály.

Špička hrotu má tvar kužeľa s vrcholovým uhlom 60° a valcovým predĺžením. Priemer podstavy kužeľa je 35,7 mm; plocha priečného rezu v podstave $1\,000\text{ mm}^2$. V prípade, že je špička asymetricky opotrebovaná, veľmi drsná, nespĺňa požadované tolerancie, nemala by byť používaná.

Nad špičkou penetračného hrotu býva umiestnená trecia manžeta. Vzďialenosť od hrotu nesmie byť kvôli škáre a tesneniu viac než 5,0 mm (ČSN EN ISO 22476-1^[N5]).

Podľa ČSN EN ISO 22476-1^[N5] podliehajú všetky časti a príslušenstvo penetračnej ihly (zatlačované tyče, penetračný hrot, trecia manžeta, filter, snímače odklonu a odporu) požiadavkám na dovolené minimálne presnosti v súvislosti s triedou použitia penetračnej skúšky.



Obrázok č. 2.4: Schematický rez penetračným hrotom^[8]: 1 - inklinometer; 2 - geofón; 3 – trecia manžeta; 4 - tenzometre; 5 - snímač tlaku; 6 - teleso porézneho filtra pre meranie pórového tlaku u_2 ; 7 - teleso porézneho filtra pre meranie pórového tlaku u_1

V penetračnom zariadení rozoznávame dva druhy sútyčí – tlačné a vnútorné. Tlačné sa skladá z hrubostenných tyčí, ktorými sa zatláča penetračný hrot. Toto sútyčie chráni meracie systémy v hrote a aj spájací kábel, má pevné spoje. Sútyčie vnútorné sa skladá z plných tyčí, ktoré sa voľne pohybujú vo vnútri tlačného sútyčia, používa sa na vysunutie kuželovej špičky, pri mechanických penetrometroch sa používa aj na prenos merného odporu.

Penetračná súprava

Penetračný hrot je do zeminy zatláčaný zariadením z povrchu terénu, ako reakcia proti zatláčajúcej sile slúži vlastná hmotnosť, prípadne zakotvenie. Postavenie súpravy musí umožňovať vertikálne zatláčanie konštantou rýchlosťou (20 ± 5) mm/s. Zatlačacie zariadenia penetračných prístrojov prešli značným vývojom od obvyčajného ručného zatlačovacieho sútyčia (ručná mechanizácia sa skladala z kľuky a systému prevodov na uľahčenie manuálnej práce, prípadne sa používali aj jednoduché lisy) až po hydraulické motorové jednotky, čo podstatne zlepšilo technické parametre a umožnilo dosiahnutie väčších hĺbok pri statickej penetrácii. Hydraulické zatlačovanie sondovacieho sútyčia sa dnes používa najčastejšie.

Typy statických penetrometrov

Ľahké penetrometre (obrázok č. 2.5) sú väčšinou najjednoduchšie prístroje s ručným mechanickým zatláčaním, prípadne s jednoduchou hydraulikou. Maximálna tlačná kapacita neprekračuje hranicu 40 kN, hodia sa pre použitie do zemín s nízkymi penetračnými odpormi.



Obrázok č. 2.5: Ľahký penetrometer pre CPT skúšky^[W1]

Stredne ťažké penetračné súpravy (obrázok č. 2.6) predstavujú pre svoju univerzálnosť najpoužívanejšiu skupinu prístrojov. Maximálna tlačná kapacita sa pohybuje v rozmedzí 100 až 120 kN, tento výkon umožňuje realizáciu pomerne hlbokých sond (15 - 20 m) v náročnejších podmienkach (tuhé íly a uľahlé piesky). Tieto stroje sa väčšinou umiestňujú na dvojkolesové podvozky s možnosťou pripojenia za automobil, najmodernejšie a najpoužívanejšie penetračné súpravy sú samopojazdné.



Obrázok č. 2.6: Stredne ťažká penetračná súprava PAGANI TG63-100^[w1]

Na penetráciu v hlinách, íloch s pevnou konzistenciou a uľahlých štrkoch, zvetraných poloskalných horninách sú predurčené ťažké penetrometre (obrázok č. 2.7). Disponujú vysokovýkonnými hydraulickými systémami s maximálnou tlačnou kapacitou 200 až 300 kN. Ťažké statické penetrometre majú vlastný podvozok, ktorý je treba pred skúškou dokonale zakotviť. Najťažšie súpravy sa umiestňujú do veľkých skriňových automobilov (dostatočná protizávaž pri skúške).



Obrázok č. 2.7: Ťažká penetračná súprava PAGANI TG73-200^[w1]

Metodika sondovania pomocou statickej penetrácie

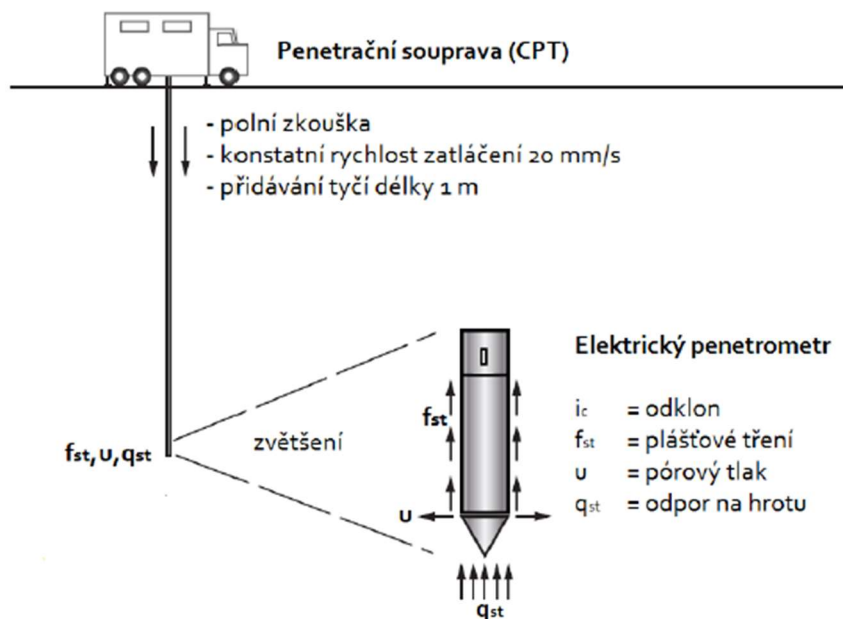
Pre penetračnú súpravu je potrebné zabezpečiť aspoň približné vodorovné miesto s dostatočnými rozmermi. V prípade, že sa predpokladá výskyt navážok, odporúča sa odkopať vrchnú časť terénu, aby sa zabránilo poškodeniu hrotu.

Po skončení prípravných prác nasleduje ukotvenie prístroja pomocou kotviacich prvkov. Pri ľahkých prístrojoch postačujú dve tanierové kotvy, pri tých ťažších sa odporúča 4 až 6 kotiev. Účelom kotvenia prístroja, ktorý nemá dostatočnú hmotnosť, je získanie reakcie potrebnej pri zatláčaní sondovacieho sútyčia a hrotu. Niektoré penetrometre sú vybavené len ručným zavrtávaním kotiev, iné majú výkonné hydraulické zavrtávače, ktoré podstatne skrátia túto prípravnú fázu skúšky. Kvalita ukotvenia častokrát rozhoduje o využití maximálnej tlačnej sily. Problémy s kotvením môžu byť spôsobené aj pokryvnou vrstvou, v tomto prípade sa siahá po núdzovom riešení – zaťažiť súpravu protizávažou. Preto môže byť príprava na skúšku časovo náročnejšia ako skúška samotná. V prípade ťažkých penetrometrov na inštalácia kotiev nemusí vykonávať.

Po ukotvení a zabezpečení súpravy vo vodorovnej polohe je preskúšaná snímacia aparátúra. Kábel (používaný na prenos impulzov zo snímacieho hrotu) sa prevlečie potrebným množstvom sondovacích tyčí, hrot sa zaťaží predpísaným tlakom a potom sa odľahčí (kalibrácia), táto činnosť je spojená s nastavením zapisovača. Postup kalibrácie a kontroly závisí od toho, akou formou záznamu je súprava vybavená a aký typ hrotu sa použije. Niektoré hroty sa pred skúškou musia temperovať na teplotu zeminy, iné teplotné vplyvy kompenzujú. Po skončení uvedených činností môže začať zatláčanie penetračného hrotu do zeminy – prerušované alebo neprerušované.

Po zatlačení prvej penetračnej tyče sa penetrácia musí prerušiť, hrot sa odľahčí a hydraulický valec sa presunie do hornej polohy. Potom sa nasadí nová sondovacia tyč dlhá 1,0 m a zatláčanie môže pokračovať. Cyklus sa opakuje, dokiaľ nie je dosiahnutá požadovaná hĺbka a maximálna tlačná sila prístroja. Neprerušované zatláčanie je zabezpečené špeciálnou konštrukciou hydraulického systému, ktorý umožňuje pridávať sondovacie tyče v priebehu zatláčania.

Na súpravách, ktoré sú vybavené zapisovačmi, je možné sledovať priebeh zmien penetračných odporov v závislosti na hĺbke, po dosiahnutí požadovanej hĺbky je skúška dokončená. Výsledkom skúšky je grafický alebo numerický záznam penetračných odporov, ktorý sa ďalej spracováva a vyhodnocuje. Hydraulický systém penetrometru sa zo zatláčania prestaví na vyťahovanie a postupne sa celá dĺžka sútyčia vytiahne na povrch terénu a súprava sa môže premiestniť na miesto novej sondy.


 Obrázok č. 2.8: Schéma statickej penetračnej skúšky^[W4]

2.1.2 Metodika vyhodnocovania statickej penetračnej skúšky, využitie CPT pre klasifikáciu zemín

Priebeh penetračných odporov počas zatlačania penetračného hrotu do zeminy má podobu grafického záznamu (obrázok č. 2.9). Takto získané penetračné diagramy sú prvotným podkladom pre vyhodnotenie penetračnej skúšky a ich priebeh vyjadruje zmenu penetračných odporov v závislosti na hĺbke. Základným údajom CPT skúšky je hodnota merného odporu na hrote sondy q_c , ktorý sa určí z celkového odporu na špičku Q_c vydeleným plochou priečného rezu A_c .

$$q_c = \frac{Q_c}{A_c} \quad 2.1$$

Pokiaľ je záznam penetračnej skúšky doplnený o grafický záznam trenia na plášti, môžeme podielom celkového odporu Q_s pôsobiaceho na trečiu manžetu a plochou trecej manžety získať merné (lokálne) plášťové trenie f_s .

$$f_s = \frac{Q_s}{A_s} \quad 2.2$$

Určenie typu zeminy

Penetračný odpor, ktorý je počas statickej penetračnej skúšky získaný, patrí určitému typu zeminy a jeho hodnota závisí na type penetrovaného prostredia. Ak je k dispozícii výlučne hodnota merného penetračného odporu na hrote sondy, nemusí byť možné určiť typ zeminy jednoznačne.

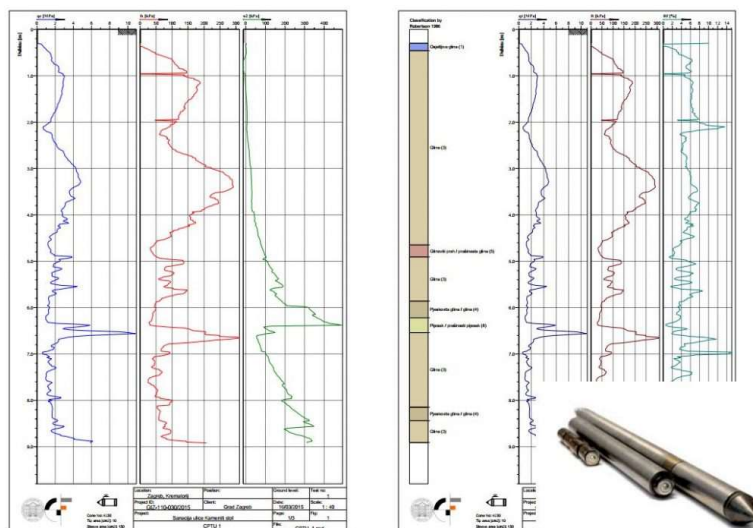
Dlhodobým využívaním výsledkov CPT skúšok sa zistilo, že pomer vyššie uvedených dvoch veličín (q_c a f_s) je pri každom type zeminy iný a na základe tohto pomeru je zeminu možné identifikovať.

$$R_f = \frac{f_c}{q_c} \quad 2.3$$

R_f je tzv. trecí pomer. Existuje niekoľko klasifikácií, ktoré umožňujú na základe tohto pomeru určiť typ penetrovanej zeminy, no najpoužívanejšia je klasifikácia podľa *Robertsona*^[10].

Grafický záznam a vyhodnotenie statickej penetračnej skúšky

Výstup CPT skúšky má podobu grafického alebo číselného záznamu penetračných odporov. Ak sa pri skúške zvolí správna citlivosť penetračného hrotu, z grafického záznamu je na prvý pohľad možné približne identifikovať rozhranie medzi zeminami a rozdiel medzi fyzikálno-mechanickými vlastnosťami. V prípade, že autor vyhodnotenia nemá dostatočné skúsenosti, môžu pri interpretácii výsledkov skúšky vzniknúť komplikácie.



Obrázok č. 2.9: Záznam z CPTu

Faktory ovplyvňujúce výsledky CPT skúšok

Podľa špecifík a regionálneho charakteru danej lokality alebo územia môže byť výsledná hodnota penetračného odporu na hrote q_c ovplyvnená napríklad tvarom zrn zeminy, rozmermi penetračných hrotov, rýchlosťou zatlačania, umiestnením snímačov plášťového trenia, teplotou, vodou v zemine, minerálnym zložením, zrnitosťou atď.

Použitelnosť výsledkov CPT

Na odhad geotechnických parametrov z CPT pre široké spektrum zemín bolo vyvinutých niekoľko semi-empirických korelácií s rôznym stupňom použiteľnosti a spoľahlivosťou. Tabuľka nižšie vyjadruje predpokladanú použiteľnosť CPTu (skúšok s meraním pórového tlaku) na odhad parametrov zemín. V prípade použitia seizmického hrotu (tzv. SCPT, kapitola 2.1.1) sa presnosť odhadu parametrov E , G a G_0 ešte zvýši. Väčšina týchto semi-empirických korelácií sa vzťahuje najmä na zeminy (nie na horniny).

| Typ zeminy | D_r | Ψ | K_o | OCR | S_t | s_u | φ'_{cv} | E, G^* | M | G_0^* | k | c_h |
|---------------------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-----------------|----------|-----|---------|-----|-------|
| Hrubozrnné (piesok) | 2,5 | 2,5 | 5 | 5 | | | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3,5 | 3,5 |
| Jemnozrnné (il) | | | 2 | 1 | 2 | 1,5 | 4 | 3 | 2,5 | 3 | 2,5 | 2,5 |

Tabuľka č. 2.1: Použitelnosť CPTu pre získanie parametrov zemín^[6]

1 = vysoká, 2 = vysoká až stredná, 3 = stredná, 4 = stredná až nízka, 5 = nízka, bez čísla = žiadna použiteľnosť, * = v prípade SCPT lepšia použiteľnosť

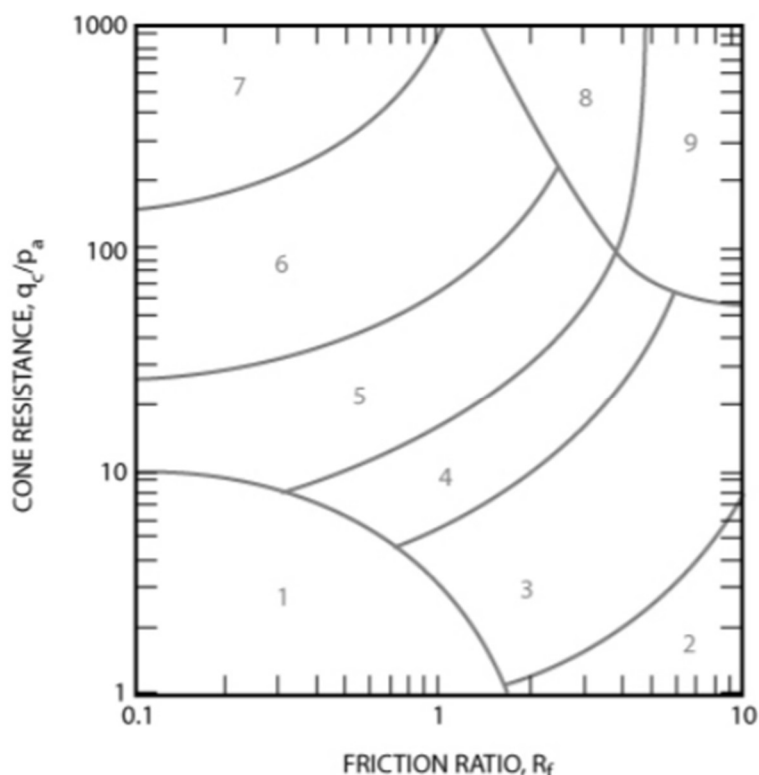
Prehľad veličín uvedených v tabuľke:

| | | | |
|--------|---|-----------------|----------------------------------|
| D_r | Relatívna uľahlosť | φ'_{cv} | Vrcholový uhol vnútorného trenia |
| | | K_0 | In-situ súčiniteľ zemného tlaku |
| E, G | Youngov modul pružnosti a šmykový modul | G_0 | Šmykový modul pre malé napätie |
| OCR | Pomer prekonsolidácie | c_h | Koeficient konsolidácie |
| s_u | Neodvodnená šmyková pevnosť | S_t | Citlivosť zeminy |

V súčasnosti sa CPT používa hlavne na zistenie geologického profilu a typu zemín (prípadne ich mechanických vlastností, stavových veličín) v mieste vykonania skúšky. Odpor na hrote je vyšší v pieskoch a nižší v íloch a plášťové trenie presne naopak. Tento typ skúšky nám neposkytne presnú charakteristiku a zatriedenie zeminy (ako napríklad skúška zrnitosti), ale skôr mechanické vlastnosti zeminy (napr. stlačiteľnosť) a stavové veličiny (stupeň konzistencie, uľahlosť). V rámci vyhodnocovania je používaný jednotný pojem – typ správania sa zeminy (**SBT** – Soil Behavior Type). Dáta z CPT teda poskytnú približný index zeminy (SBT) pre danú polohu hrotu v zemi.

Nenormalizované SBT grafy

Najbežnejšie používanú tabuľku SBT navrhol *Robertson*^{[6][10]} a kol. (1986, neskôr aktualizovaná 2010). Tento graf používa základné parametre odpor na hrote (q_c) a plášťové trenie (f_s , R_f). Tabuľka má globálny charakter a môže poskytnúť rozumné predpovede SBT indexu pre sondáže CPT do hĺbky približne 20 m. V niektorých zónach sa výsledky môžu prekrývať, zóny môžu byť trochu upravené na základe miestnych skúseností.



Graf č. 2.1: Nenormalizovaný graf SBT (*Robertson*^{[6][10]})

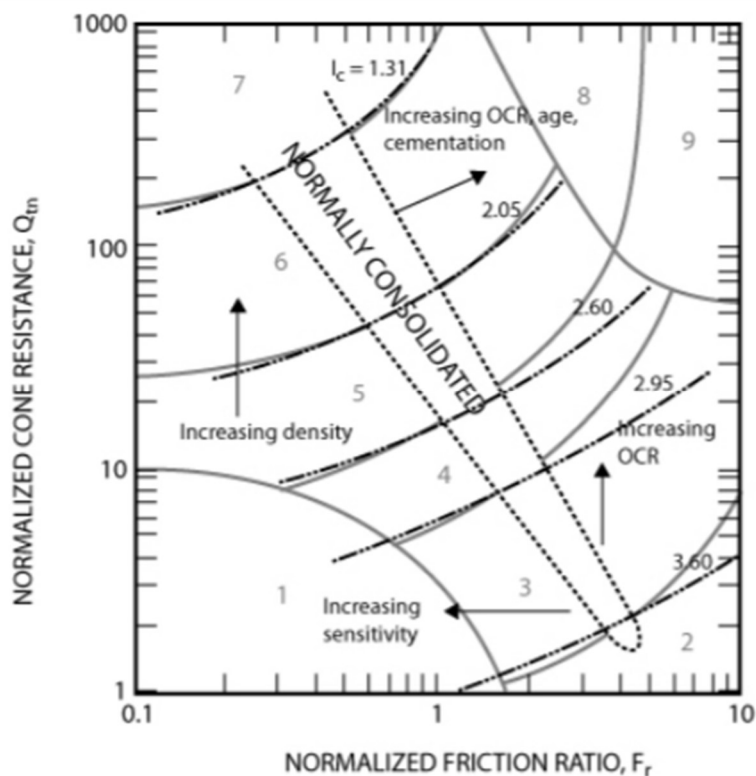
| Zóna | Soil Behavior Type – Typ správania sa zeminy |
|------|--|
| 1 | Citlivá, jemnozrnná |
| 2 | Organické zeminy - íl |
| 3 | Prachovitý íl až íl |
| 4 | Ílovitý prach až prachovitý íl |
| 5 | Prachovitý piesok až piesčitý prach |
| 6 | Piesky - čistý piesok až prachovitý piesok |
| 7 | Štrkovitý piesok, hrubozrnný piesok |
| 8 | Uľahlý piesok až ílovitý piesok |
| 9 | Jemnozrnná zemina ($I_c >> 1$) |

Tabuľka č. 2.2: Nenormalizovaný graf SBT – popis jednotlivých zón (*Robertson*^{[6][10]})

Normalizované SBT grafy

Pretože odpor na hrote aj plášťové trenie sa zvyšujú s hĺbkou, v dôsledku zvýšenia efektívnej tiaže nadložia si údaje CPT vyžadujú normalizáciu pre napätie nadložia v prípade veľmi plytkých alebo veľmi hlbokých sond.

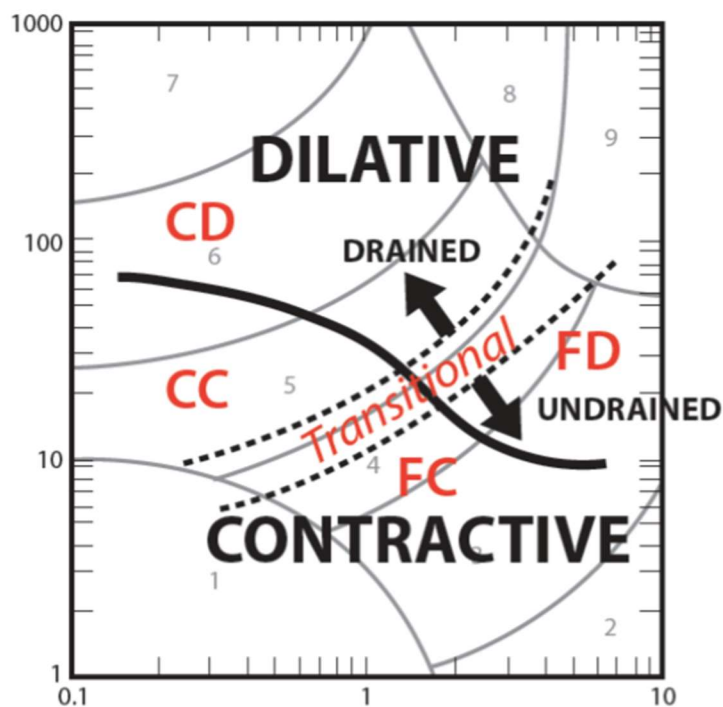
Prvým SBT graf tohto typu založený na normalizovaných údajoch CPT navrhol *Robertson*^{[6][10]} (1990) a je znázornený na grafe č. 2.2. Bola vytvorená zóna, v ktorej sa budú vyskytovať hlavne mladé, nestmelené a normálne konsolidované zeminy. Graf už zahŕňa aj všeobecné trendy v odozve pôdy, ako je zvýšenie hustoty pôdy, vek a spevnenie piesočnatých pôd, rastúca história napätia (*OCR*) a citlivosť pôdy (*S_i*) pre súdržné zeminy. Pôvodný graf pôsobí ako vzorový sprievodca a prekrývajúce sa zóny je možné upraviť podľa miestnych skúseností.



Graf č. 2.2: Normalizovaný graf SBT (*Robertson*^{[6][10]})

| Zóna | Soil Behavior Type – Typ správania sa zeminy | I_c |
|------|--|-------------|
| 1 | Citlivá, jemnozrnná | N/A |
| 2 | Organické zeminy - íl | > 3,6 |
| 3 | Prachovitý íl až íl | 2,95 - 3,6 |
| 4 | Ílovitý prach až prachovitý íl | 2,60 - 2,95 |
| 5 | Prachovitý piesok až piesčitý prach | 2,05 - 2,60 |
| 6 | Piesky - čistý piesok až prachovitý piesok | 1,31 - 2,05 |
| 7 | Štrkovitý piesok, hrubozrnný piesok | < 1,31 |
| 8 | Uľahlý piesok až ílovitý piesok | N/A |
| 9 | Jemnozrnná zemina ($I_c \gg 1$) | N/A |

Tabuľka č. 2.3: Normalizovaný graf SBT – popis jednotlivých zón (*Robertson*^{[6][10]})



Graf č. 2.3: Normalizovaný graf SBT s popisom správania sa zeminy pri veľkom napätí
(Robertson^{[6][10]})

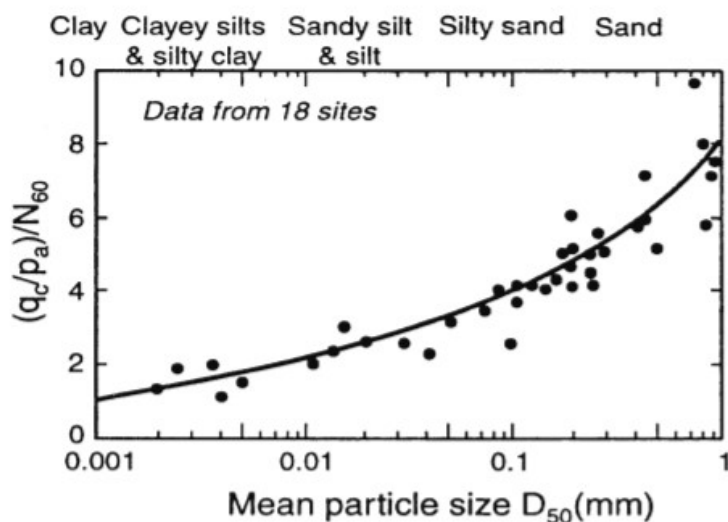
Ekvivalentné profily SPT N60 (Korelácia s SPT)

Štandardná penetračná skúška (SPT – Standard Penetration Test) je jednou z najčastejšie používaných in situ skúšok v mnohých častiach sveta. Mnohí geotechnickí inžinieri získali značné skúsenosti s interpretáciou štandardných penetračných skúšok vo svojej lokalite na základe lokálnych korelácií.

Pri tejto skúške sa používa baran (závažie) hmotnosti 63,5 kg (1400 lbs) padajúci z výšky 760 mm (30 inch) a zisťuje sa počet úderov, ktorý je potrebný na zarazenie normovaného hrotu dĺžky 300 mm. Táto skúška sa používa najmä v zahraničí (*Commonwealth of Nations*).

Preto bolo po vymyslení metódy CPT veľmi žiadané transformovať výstup skúšky do formy SPT (počet úderov n na určitú hrúbku zeminy). Bolo teda potrebné zostaviť spoľahlivé CPT/SPT korelačné vzťahy.

Na základe niekoľkých štúdií uvádza *Robertson*^{[6][10]} (1983) vzťah znázornený na grafe č. 2.4, založený na pomere q_c (odporu na hrote) a p_a (atmosférického tlaku) a priemeru zrna pri 50% prepade (hodnoty q_c sú po vydelení atmosférickým tlakom p_a bezrozmerné). So zväčšujúcou sa veľkosťou zrna sa tento pomer zvyšuje. *Robertsonom*^{[6][10]} použité hodnoty N zodpovedajú 60% priemerného energetického pomeru (graf č. 2.4).



Graf č. 2.4: CPT – SPT korelačný vzťah (*Robertson*^{[6][10]})

| Zóna | Soil Behavior Type – Typ správania sa zeminy | $\frac{(q_c/p_a)}{N_{60}}$ |
|------|--|----------------------------|
| 1 | Citlivá, jemnozrnná | 2,0 |
| 2 | Organické zeminy - íl | 1,0 |
| 3 | Prachovitý íl až íl | 1,5 |
| 4 | Ílovitý prach až prachovitý íl | 2,0 |
| 5 | Prachovitý piesok až piesčitý prach | 3,0 |
| 6 | Piesky - čistý piesok až prachovitý piesok | 5,0 |
| 7 | Štrkovitý piesok, hrubozrnný piesok | 6,0 |
| 8 | Veľmi uľahlý piesok až ílovitý piesok | 5,0 |
| 9 | Jemnozrnná zemina ($I_c >> 1$) | 1,0 |

Tabuľka č. 2.4: CPT – Odporúčané pomery $(q_c/p_a)/N_{60}$ (*Robertson*^{[6][10]})

2.1.3 Korelačné vzťahy pre odvodenie medzného plášťového trenia a medzného napätia na päte z výsledkov CPT

Z dát nameraných statickou penetračnou skúškou (odpor na hrote q_c a plášťové trenie f_s) je možné s využitím rôznych korelačných metodík získať v skúšanom mieste medzné plášťové trenie a medzné napätie na päte pilóty. Podľa postupu sú rozlišované metódy:

Priame:

- pre odhad medzného plášťového trenia sú využité priamo hodnoty odporu na hrote q_c a lokálneho plášťového trenia f_s
- pre odvodenie medzného plášťového trenia z CPT skúšky priamou metódou je nutné poznať technológiu zhotovenia pilóty a určenie typu zeminy

Nepriame:

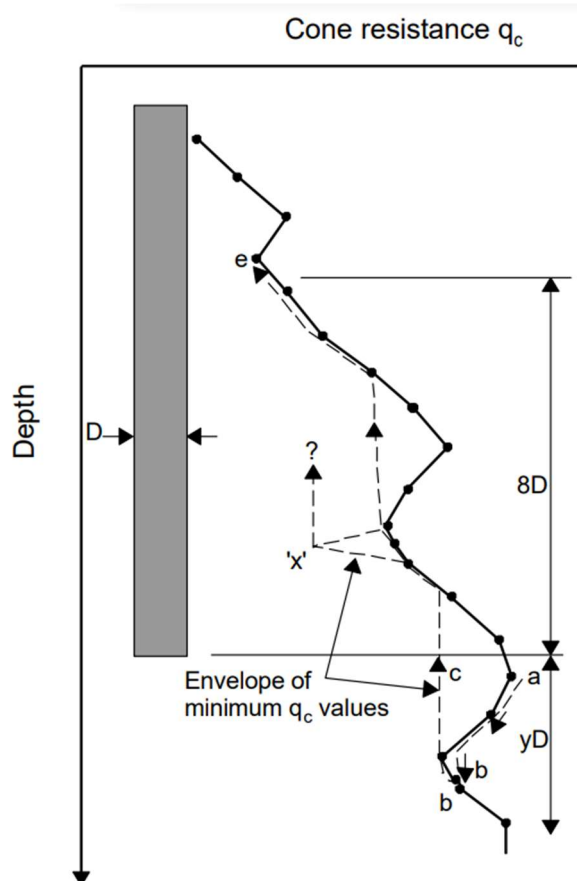
- pomocou q_c a f_s odhadneme parametre šmykovej pevnosti s_{ul} , φ_c a pomocou nich odhadneme medzné plášťové trenie $q_{s,ult}$ (viď. metóda β v kapitole 2.2.2)
- fungujú na základe korelácie medzi veličinami meranými pri statickej penetračnej skúške a parametrami šmykovej pevnosti (pri nesúdržných zeminách sa koreluje hlavne uhol vnútorného trenia, u súdržných zemín neodvodnená šmyková pevnosť)

Schmertmannova metóda

Pre stanovenie únosnosti päty pilóty bol *Johnom H. Schmertmannom*^[13] stanovený nasledujúci vzťah:

$$q_{b,ult} = \frac{q_{c1} + q_{c2}}{2} \quad 2.4$$

Kde q_{c1} je minimum odporu na hrote v zónach od päty pilóty do $0,7 \cdot D$ až $4 \cdot D$ pod päťou pilóty (D – diameter – je priemer pilóty) a q_{c2} je priemer odporov na hrote vo vzdialenosti $8 \cdot D$ nad päťou pilóty. Tieto dve oblasti predstavujú tzv. plochu zlyhania (failure surface), ktorá je graficky vyjadrená logaritmickou špirálou. *Schmertmann*^[13] ďalej odporúča používať hodnotu 15 MPa ako hornú hranicu únosnosti päty pilóty ($q_{b,ult}$).

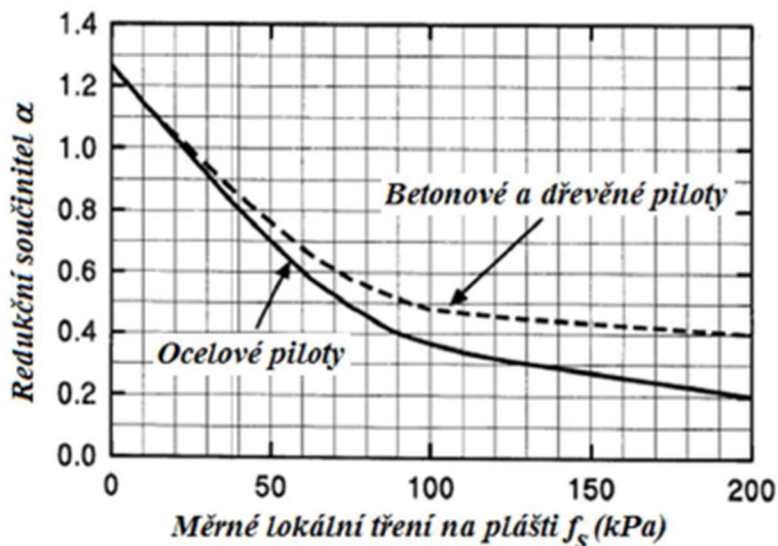


Obrázok č. 2.10: Grafické znázornenie oblastí pre získanie hodnôt súčiniteľov q_{c1} a q_{c2} ^[13]

Plášťové trenie sa v tejto metóde počíta podľa vzorca:

$$q_{s,ult} = \alpha_c \cdot f_s \quad 2.5$$

α_c je korekčný súčiniteľ, ktorého hodnotu je možné získať z grafu č. 2.5 (výber krivky podľa materiálu pilót).


 Graf č. 2.5: Hodnoty súčiniteľa α_s (*Schmertmann*^[13])

Schmertmann odporúča uvažovať s maximálnou hodnotou plášťového trenia $q_{s,ult}$ 120 kPa.

Matysova metóda

Táto metóda uvažuje s teóriou, že penetračnú sondu je možné považovať za zmenšený model pilóty a podľa príslušného výsledku skúšky je možné odhadovať únosnosť pilót (*Matys*^[27], 1990). Hodnoty získané z CPT skúšky je nutné redukovať pre získanie medzného plášťového trenia $q_{s,ult}$ (z odporu na hrote q_c alebo plášťového trenia f_s). Pre stanovenie $q_{s,ult}$ z CPT teda platia nasledujúce vzťahy:

$$q_{s,ult} = \alpha_s \cdot f_s \quad 2.6$$

$$q_{s,ult} = \alpha_c \cdot q_c \quad 2.7$$

Je možné α_s pomenovať ako technologický súčiniteľ, jeho hodnoty sú uvedené v nasledujúcej tabuľke (tabuľka č. 2.6):

| Typ pilóty | súčiniteľ α_s |
|------------|----------------------|
| vibrovaná | 1 |
| VÚIS | 0,8 |
| vrtaná | 0,6 |

 Tabuľka č. 2.5: Hodnoty súčiniteľa α_s podľa technológie vyhotovenia (*Matys*^[27], 1990)

Súčiniteľ α_c je určený podľa typu zeminy z priloženej tabuľky č. 2.7:

| Druh zeminy | q_c [MPa] | súčiniteľ α_c |
|-------------|-------------|----------------------|
| íl | > 3 | < 0,030 |
| íl | < 3 | < 0,020 |
| prach | | < 0,025 |

Tabuľka č. 2.6: Hodnoty súčiniteľa α_c podľa typu zeminy (Matys^[27], 1990)

Podobne ako pri medznom plášťovom trení, pre stanovenie medzného napätia na päte $q_{b,ult}$ je využitý odpor na hrote q_c a redukčný súčiniteľ α_b v nasledujúcom vzťahu:

$$q_{b,ult} = \alpha_b \cdot q_p \quad 2.8$$

Súčiniteľ α_b závisí od technológie vyhotovenia pilóty (1,0 pre pilóty razené; 0,8 pre pilóty vrtané technológiou CFA a 0,6 pre rotačne náberové vrtanie Kelly). Podľa ČSN EN 1997-2^[N7] vstupujú do výpočtu aj súčinitele zohľadňujúce tvar päty pilóty.

Odpor na päte q_p sa stanoví nasledujúcim spôsobom (vzťahy č. 2.9 a 2.10):

$$q_p = \frac{\bar{q}_c}{f_1} \quad 2.9$$

$$f_1 = 1 + 5 \cdot 10^{-5} \cdot \bar{q}_c^{1,3} \cdot A_p \quad 2.10$$

Kde \bar{q}_c je aritmetický priemer hodnôt odporu meraný v pásme 5·D nad úrovňou päty a 3·D pod úrovňou päty, f_1 je koeficient modelovej podobnosti medzi penetračnou sondou a pilótou, A_p je plocha priečného rezu pilóty. Medzné napätie na päte je potrebné ďalej redukovať technologickým faktorom m (v intervale 5 až 30), ktorého hodnota závisí na spôsobe vyhotovenia pilóty (razená 1,0; VÚIS – 0,8; vrtaná 0,6).

$$q_{b,ult} = m \cdot q_p \quad 2.11$$

Horné limity predpokladaného odporu na päte a medzného plášťového trenia nie sú v tejto metóde stanovené.

De Ruiterova a Beringerova metóda

Táto európska metóda (*De Ruiter a Beringer*^[3]) je založená na skúsenostiach získaných v Severnom mori, používa rôzne postupy pre íl a piesok.

V prípade ílovitých zemín je najprv potrebné z odporu na hrote (q_c) určiť neodvodnenú šmykovú pevnosť (S_u). Pre výpočet je použitý vzorec:

$$q_{b,ult} = N_c \cdot S_{u(tip)} \quad 2.12$$

$$S_{u(tip)} = \frac{q_{c(tip)}}{N_k} \quad 2.13$$

Súčiniteľ únosnosti N_c sa v tejto metóde uvažuje s hodnotou 9. N_k je súčiniteľ pre použitý hrot, jeho hodnota sa podľa miestnych skúseností pohybuje v rozmedzí 15 - 20^[3]. Podobne ako pri *Schmertmannovej* metóde, pre danú vrstvu zeminy je využitý priemerný odpor na hrote $q_c(tip)$. Plášťové trenie určíme pomocou vzorca:

$$q_{s,ult} = \beta \cdot S_{u(side)} \quad 2.14$$

β je adhézný faktor, ktorého hodnota je 1 pre normálne konsolidované íly a 0,5 pre prekonsolidované íly. $S_{u(side)}$ predstavuje neodvodnenú šmykovú pevnosť pre každú vrstvu zeminy pozdĺž pilóty, určíme ju zo vzťahu:

$$S_{u(side)} = \frac{q_{c(side)}}{N_k} \quad 2.15$$

V tomto vzťahu reprezentuje $q_{c(side)}$ priemerný odpor na hrote pozdĺž danej vrstvy zeminy.

V pieskoch sa počíta únosnosť päty pilóty podobne ako v prípade *Schmertmannovej* metódy, no trenie na plášti pre každú vrstvu piesčitej zeminy pozdĺž pilóty je získané z nasledujúceho vzťahu:

$$q_{s,ult} = \min \begin{cases} \frac{q_{c(side)}}{300} (kompresia) \\ \frac{q_{c(side)}}{400} (napätie) \end{cases} \quad 2.16$$

Autori tejto metódy opäť uvádzajú odporúčané maximálne limity pre zisťované veličiny, konkrétne sa jedná o hodnotu 15 MPa pre $q_{b,ult}$ a 120 kPa pre medzné plášťové trenie ($q_{s,ult}$) v nesúdržných zeminách.

Metóda LCPC (Bustamanteho a Gianceselliho metóda)

Metóda (*Bustamante a Gianceselli*^[3]) bola vynájdená pre francúzsku *Národnú diaľničnú spoločnosť* na základe analýzy 197 zaťažovacích skúšok rôznych typov pilót v širokom spektre zemín. Okrem skratky LCPC (*Laboratoire Central des Ponts et Chausees*) sa používa aj názov Francúzska metóda. Pri vyhodnocovaní medznej únosnosti plášťa a päty nie je použité namerané plášťové trenie z CPT skúšky (f_s), metóda využíva výlučne nameraný odpor na hrote (q_c).

Medzná únosnosť na päte sa v tejto metóde počíta takto:

$$q_{b,ult} = k_b \cdot q_{eq(tip)} \quad 2.17$$

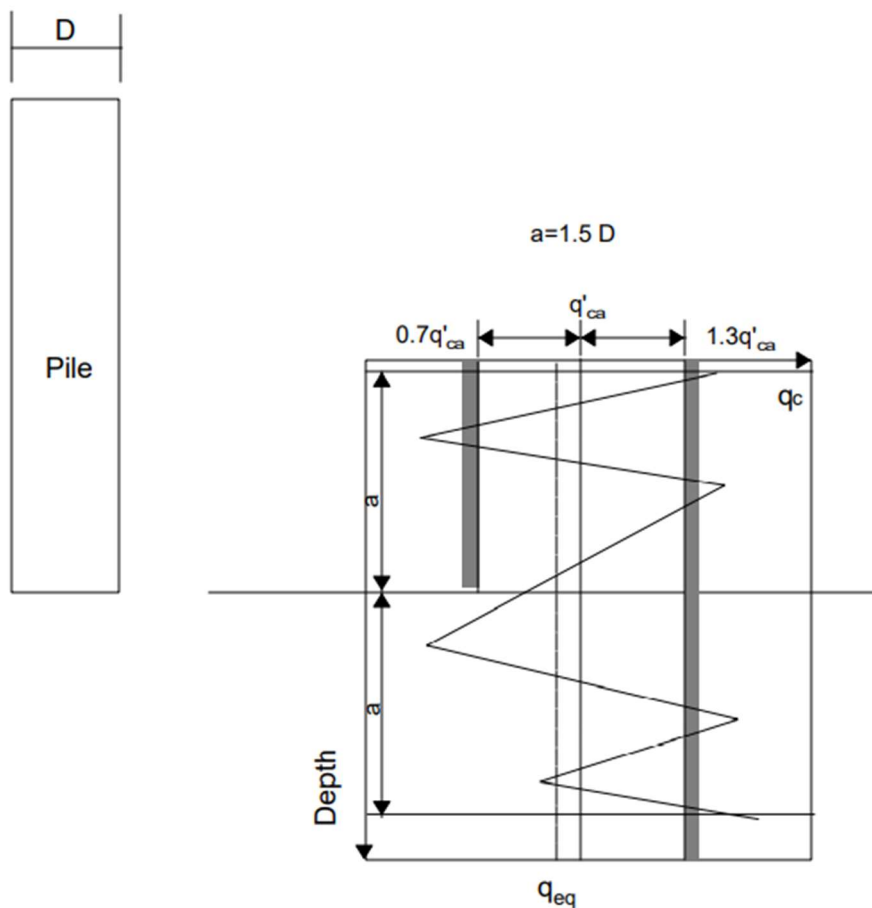
Kde k_b je empirický súčiniteľ, jeho hodnota sa pohybuje v rozsahu 0,15 až 0,60 podľa typu zeminy a technológie vyhotovenia pilóty (tabuľka č. 2.8).

| Druh zeminy | Vŕtané pilóty | Vháňané (driven) pilóty |
|--------------------|---------------|-------------------------|
| Íl - prach | 0,375 | 0,6 |
| Piesok - štrk | 0,15 | 0,375 |
| Kriedové sedimenty | 0,2 | 0,4 |

Tabuľka č. 2.7: Hodnoty súčiniteľa k_b podľa typu zeminy a technológie vyhotovenia pilóty (*Bustamante*^[3])

$q_{eq(tip)}$ je ekvivalentný priemerný odpor na hrote, získaný podľa tohto postupu:

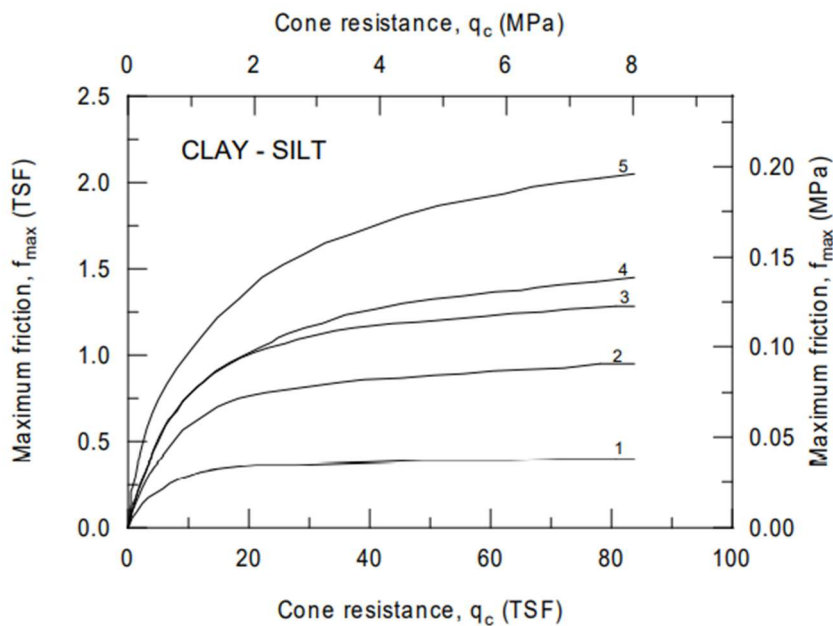
- 1) Vypočíta sa priemerný odpor na hrote (q_{ca}) tak, že je spriemerovaná hodnota q_c v zóne $1,5 \cdot D$ (D je priemer pilóty) pod a $1,5 \cdot D$ nad päťou pilóty.
- 2) Eliminujú sa hodnoty q_c , ktoré sú nižšie než $0,7 \cdot q_{ca}$ a vyššie ako $1,3 \cdot q_{ca}$
- 3) Zo zostávajúcich hodnôt sa vypočíta ekvivalentný priemerný odpor na hrote $q_{eq(tip)}$



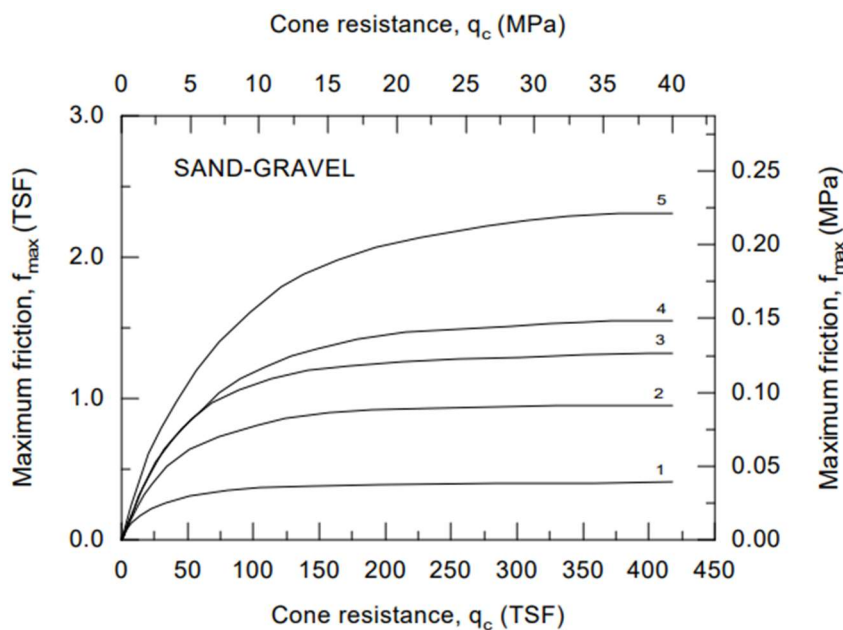
Obrázok č. 2.11: Výpočet $q_{eq(tip)}$ (Bustamante a Gianeselli^[13])

Maximálne plášťové trenie v každej vrstve zeminy sa odhaduje z ekvivalentného priemerného odporu na hrote (vypočítaného pre každú vrstvu pre hrúbku danej vrstvy podľa postupu uvedeného vyššie) a závisí od typu zeminy, typu pilóty a technológie inštalácie pilóty podľa nižšie uvedeného postupu:

- 1) Na základe typu pilóty sa vyberie kategória z tabuľky číslo **2** (Technológie vyhotovenia pilót, uvedené v **[13]**)
- 2) Pre každú vrstvu sa určí typ krivky podľa typu pilóty a zeminy, pre ílovité a prachovité zeminy sa použije tabuľka č. **3** (Vstupné parametre pre íl a prach, **[13]**) a pre piesčité a štrkovité zeminy tabuľka č. **4** (Vstupné parametre pre piesok a štrk, **[13]**)
- 3) V nasledujúcich grafoch (graf č. **2.6** pre íl a prach, graf č. **2.7** pre štrk a piesok) podľa určenej krivky z kroku č. 2 je odčítaná príslušná hodnota maximálneho plášťového trenia podľa daného ekvivalentného priemerného odporu na hrote v zemine



Graf č. 2.6: Odvodenie maximálneho plášťového trenia pre danú vrstvu zeminy (íl a prach) na základe ekvivalentného priemerného odporu na hrote (*Bustamante a Gianeselli*^[13])



Graf č. 2.7: Odvodenie maximálneho plášťového trenia pre danú vrstvu zeminy (piesok a štrk) na základe ekvivalentného priemerného odporu na hrote (*Bustamante a Gianeselli*^[13])

Tumayova a Fakhrova metóda (Metóda CONE-M)

Týka sa hlavne výpočtu medzného plášťového trenia a medznej únosnosti na päte pilóty v ílovitých zeminách. Metóda je určená predovšetkým pre pilóty vŕhané/baranené, do štúdie bola zahrnutá, aby sa ukázalo, ako veľmi sa bude odhadovaný výsledok líšiť od metód určených aj pre vŕtané pilóty. Únosnosť päty sa odhaduje (podobne ako u *Schmertmann*^[13]) podľa vzorca:

$$q_{b,ult} = \frac{q_{c1} + q_{c2}}{4} + \frac{q_a}{2} \quad 2.18$$

V tomto vzorci je q_{c1} priemer hodnôt q_c (odpor na hrote) v zóne $4 \cdot D$ pod päťou pilóty a q_{c2} je priemer hodnôt q_c vo vzdialenosti $8 \cdot D$ pod päťou pilóty. Podobne ako pri ostatných metódach, *Tumay a Fakhro*^[13] odporúčajú limitovať maximálnu únosnosť hodnotou 15 MPa.

Medzné plášťové trenie sa získa z nasledujúceho výrazu:

$$q_{s,ult} = m \cdot f_s \quad 2.19$$

Kde m predstavuje adhézný faktor, získaný takto:

$$m = 0,5 + 9,5 \cdot e^{-9f_{s,loc}} \quad 2.20$$

$$f_{s,loc} = \frac{F_t}{L} \quad 2.21$$

Kde $f_{s,loc}$ je priemerné lokálne plášťové trenie a F_t súčet všetkých hodnôt plášťových trení z CPT pozdĺž pilóty (f_s je namerané plášťové trenie z CPT). Podľa autorov sa uvažuje s maximálnou hodnotou plášťového trenia 72 kPa.

Aokiho a De Alencarova metóda

Podľa *Aokiho a De Alencara Velloso*^[13] je predikovaná medzná únosnosť päty pilóty vypočítaná podľa nasledujúceho vzťahu:

$$q_{b,ult} = \frac{q_{ca(tip)}}{F_b} \quad 2.22$$

Ako už bolo vyššie uvedené, $q_{ca(tip)}$ je priemerný odpor hrotu okolo päty pilóty, no F_b je empirický súčiniteľ, závisiaci na type pilóty, jeho hodnota je získaná z priloženej tabuľky (tabuľka č. 2.9):

| Typ pilóty | F_b | F_s |
|--|-------|-------|
| Vrtaná | 3,5 | 7 |
| Na mieste betónovaná (Franki) | 2,5 | 5 |
| Razená (displacement), prefabrikovaná | 1,75 | 3,5 |

Tabuľka č. 2.8: Hodnoty empirických súčiniteľov F_b a F_s pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa Aokiho a De Alencara^[13]

Pre odhad medzného plášťového trenia je použitý vzorec:

$$q_{s,ult} = q_{c(side)} \cdot \frac{\alpha_s}{F_s} \quad 2.23$$

V tabuľke č. 2.9 sú uvedené hodnoty faktoru F_s podľa typu pilóty, veľkosť súčiniteľa α_s sa odvíja od typu zeminy, používané hodnoty sú uvedené v tabuľke 2.10:

| Typ zeminy | α_s [-] | Typ zeminy | α_s [-] | Typ zeminy | α_s [-] |
|--------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|-------------------------|-------------------|
| Piesok | 1,4 | Piesčitý prach | 2,2 | Piesčitý íl | 2,4 |
| Prachovitý piesok | 2,0 | Piesčitý prach s ílom | 2,8 | Piesčitý s prachom | 2,8 |
| Prachovitý piesok s ílom | 2,4 | Prach | 3,0 | Prachovitý íl s pieskom | 3,0 |
| Ílovitý piesok s prachom | 2,8 | Ílovitý prach s pieskom | 3,0 | Prachovitý íl | 4,0 |
| Ílovitý piesok | 3,0 | Ílovitý prach | 3,4 | Íl | 6,0 |

Tabuľka č. 2.9: Hodnoty súčiniteľa α_s pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa Aokiho a De Alencara^[13]

Aj pri tejto metóde je limitovaná horná hranica únosnosti päty pilóty $q_{b,ult}$ hodnotou 15 MPa a maximálne predikované medzné plášťové trenie ($q_{s,ult}$) je 120 kPa.

Pricova a Wardleova metóda

Podľa *Pricea a Wardla*^[3] je predikovaná únosnosť päty pilóty zistená dosadením do vzťahu:

$$q_{b,ult} = k_b \cdot q_c \quad 2.24$$

Súčiniteľ k_b závisí na type pilóty (0,35 pre vŕhané (driven) pilóty; 0,30 pre pilóty vtláčané (jacked))

Plášťové trenie sa počíta pomocou vzťahu:

$$q_{s,ult} = k_s \cdot f_s \quad 2.25$$

Kde faktor k_s opäť závisí na type pilóty (0,53 pre vŕhané (driven) pilóty; 0,62 pre pilóty vtláčané (jacked) a 0,49 pre vŕtané (bored) pilóty). Hodnoty súčiniteľov k_b a k_s boli odvodené zo zaťažovacích skúšok v londýnskych íloch.

Pri tejto metóde je limitovaná dosiahnuteľná medzná únosnosť na päte pilóty (15 MPa) a medzné plášťové trenie (120 kPa) odporúčanými hodnotami.

Philipponnatova metóda

Philipponnat^[3] pre únosnosť päty pilóty odvodil vzťah:

$$q_{b,ult} = k_b \cdot q_{ca} \quad 2.26$$

Empirický súčiniteľ k_b závisí od typu zeminy:

| Typ zeminy | k_b |
|------------|-------|
| Štrk | 0,35 |
| Piesok | 0,4 |
| Prach | 0,45 |
| Íl | 0,5 |

Tabuľka č. 2.10: Hodnoty súčiniteľa k_b pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa *Philipponnata*^[3]

Odpor na hrote pre dosadenie do tohto vzťahu (q_{ca}) sa priemeruje týmto spôsobom:

$$q_{ca} = \frac{q_{ca(A)} + q_{cb(B)}}{2} \quad 2.27$$

V tomto vzťahu $q_{ca(A)}$ je priemerný odpor vo vzdialenosti 3·D nad päťou pilóty, $q_{cb(B)}$ je priemerný odpor vo vzdialenosti 3·D pod päťou pilóty, extrémne výchylky hodnôt sa eliminujú (podobne ako pri výpočte q_{eq}).

Medzné plášťové trenie pilóty je predikované pomocou vzorca:

$$q_{s,ult} = \frac{\alpha_s}{F_s} \cdot q_{cs} \quad 2.28$$

Tu q_{cs} je priemerný odpor hrotu pozdĺž vrstvy zeminy (porovnateľné s q_{ca}), faktor F_s závisí od typu zeminy:

| Typ zeminy | F_s |
|-------------------------------------|-------|
| Íl a vápenatý íl | 50 |
| Prach, piesčitý íl a ílovitý piesok | 60 |
| Sypký piesok | 100 |
| Piesok strednej zrnitosti | 150 |
| Hrubozrnný piesok a štrk | 200 |

Tabuľka č. 2.11: Hodnoty súčiniteľa F_s pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa *Philipponnat*^[13]

Faktor α_s zohľadňuje typ pilóty a technológiu vyhotovenia (napríklad 1,25 pre hnané prefabrikované betónové pilóty). *Philipponnat* obmedzil maximálne trenie jednotky plášťa hodnotou 120 kPa.

Metóda Penpile

Na základe požiadavky *Oddelenia dopravy štátu Mississippi* v USA vytvoril *Clisby*^[13] metódu pre priamy odhad parametrov únosnosti pilót v miestnych zeminách z výsledkov CPT skúšok. Medzný odpor na päte pilóty sa určí zo vzťahu:

$$q_{b,ult} = \begin{cases} 0,25 \cdot q_{ca} & \text{pre päť pilóty v íloch} \\ 0,125 \cdot q_{ca} & \text{pre päť pilóty v pieskoch} \end{cases} \quad 2.29$$

Uvažujeme, že q_{ca} je priemerný odpor troch najbližších nameraných hodnôt k úrovni päty. Medzné plášťové trenie sa získa priamo z nameraných hodnôt pre danú vrstvu takto:

$$q_{s,ult} = \frac{f_s}{1,5 + 0,1 \cdot f_s} \quad 2.30$$

Horné limity predpokladaného medzného odporu na päte a medzného plášťového trenia nie sú v tejto metóde stanovené.

Sumarizácia použitých metód v prehľadnej tabuľke

V práci budú priame korelačné metódy využité na predikciu medzného plášťového trenia pilót na základe nameraných dát z CPT, metódy a najdôležitejšie využité vzťahy boli zhrnuté do tabuľky č. 2.13:

| Poradové číslo metódy | Názov metódy | Vzorec pre výpočet plášťového trenia | Maximálne odporúčané aplikované plášťové trenie [kPa] | Metóda určená pre technológie zhotovenia pilót: | Krajina pôvodu metódy: |
|-----------------------|---|---|---|---|----------------------------|
| 1 | Schmertmannova metóda | $q_{s,ult} = \alpha_c f_s$ | 120 | bez rozlíšenia | USA (Florida) |
| 2 | Matysova metóda | $q_{s,ult} = \alpha_s f_s$ $q_{s,ult} = \alpha_c q_c$ | žiadna limitácia | vibrované, VÚIS, vŕtané | Slovensko |
| 3 | De Ruiterova a Beringenova metóda | $q_{s,ult} = \beta S_{u(side)}$ $q_{s,ult} = \min \left(\begin{array}{l} f_s \\ q_{c(side)} \\ 300 \\ q_{c(side)} \\ 400 \end{array} \right)$ | 120 | bez rozlíšenia | Holandsko/krajiny Beneluxu |
| 4 | Metóda LCPC (Bustamanteho a Gianceselliho metóda) | - | podľa hodnotiacej krivky z grafu | pre takmer všetky typy pilót | Francúzsko |
| 5 | Tumayova a Fakhroova metóda (Metóda CONE-M) | $m = 0.5 + 9.5e^{-9f_s/loc}$ $q_{s,ult} = m f_s$ | 72 | bez rozlíšenia | USA (Louisiana) |
| 6 | Aokiho a De Alencarova metóda | $q_{s,ult} = q_{c(side)} \frac{\alpha_s}{F_s}$ | 120 | zarážané, na mieste betónované, razené | Japonsko/Brazília |
| 7 | Pricova a Wardleova metóda | $q_{s,ult} = k_s f_s$ | 120 | vŕtané, razené, injektované | Anglicko |
| 8 | Philipponatova metóda | $q_{s,ult} = \frac{\alpha_s}{F_s} q_{cs}$ | 120 | bez rozlíšenia | Francúzsko |
| 9 | Metóda Penpile | $q_{s,ult} = \frac{f_s}{1.5 + 0.1 f_s}$ | žiadna limitácia | bez rozlíšenia | USA (Mississippi) |

Tabuľka č. 2.12: Zhrnutie priamych korelačných metód a vzťahov na výpočet predikovaného medzného plášťového trenia z výsledkov CPT

2.2 Metóda prenosových funkcií

2.2.1 Základný princíp

Všeobecná charakteristika

Poulos^[20] vo svojej publikácii *Pile behavior* člení postupy pre stanovenie zvislej únosnosti pilóty a jej medznej zaťažovacej krivky nasledujúcim spôsobom:

Empirické metódy – nezohľadňujú teoretické princípy mechaniky zemín, korelácia návrhových parametrov s výsledkami (napr. zaťažovacích) skúšok v teréne, prípadne laboratóriu.

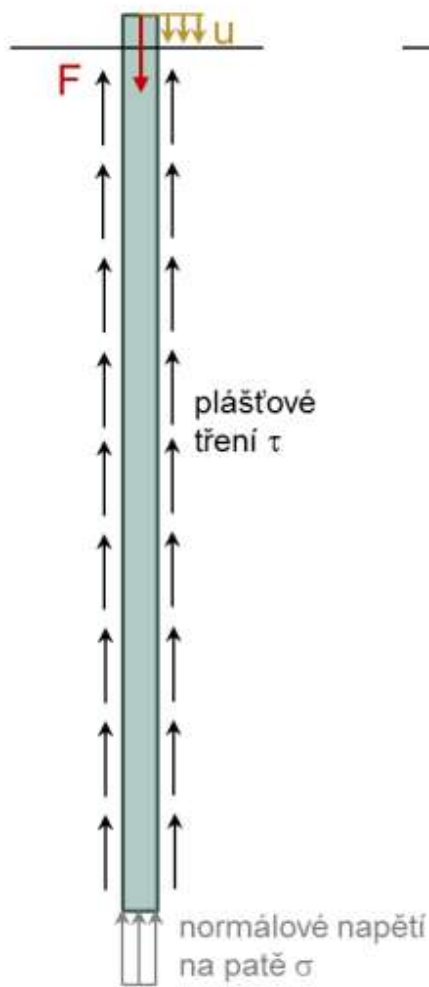
Semi-empirické metódy – čiastočne zohľadňujú teoretické princípy mechaniky zemín, v týchto metódach je však použitých mnoho empirických konštánt.

Komplexné prístupy – vychádzajú z mechaniky zemín, patrí sem napríklad metóda prenosových funkcií, metóda hraničných prvkov, metóda konečných prvkov

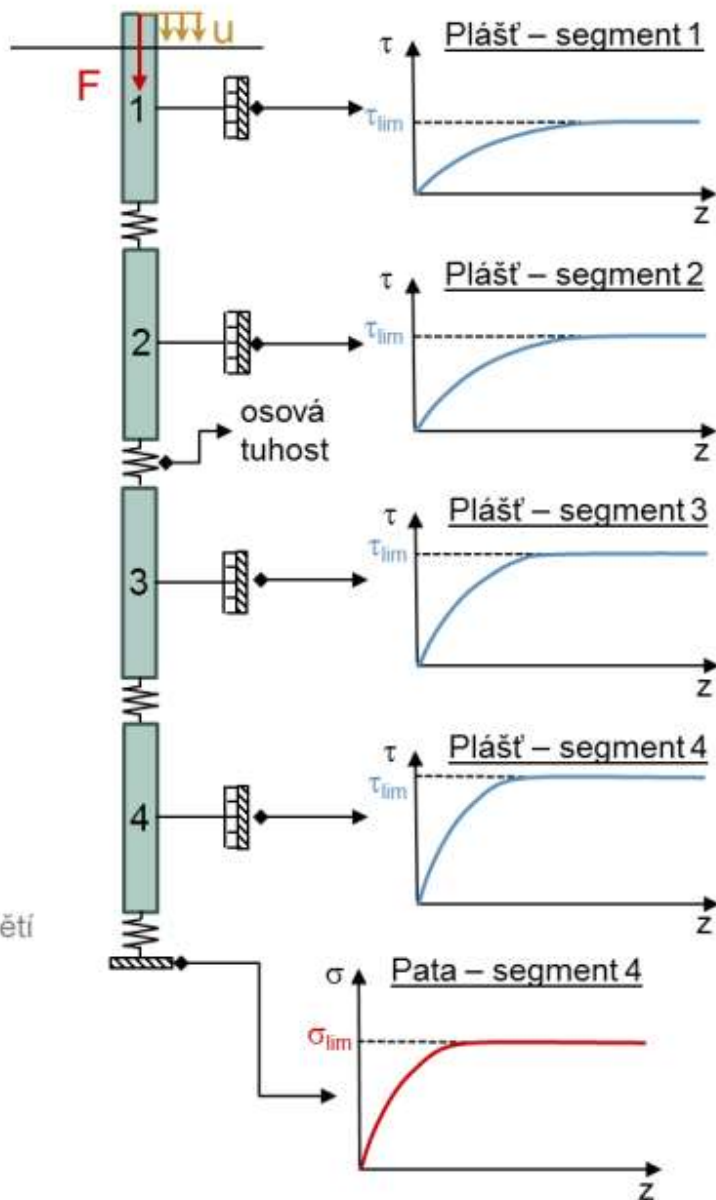
Veľkou nevýhodou využívania empirických a semi-empirických metód je práve použitie značného množstva empirických konštánt. MPF (Metóda prenosových funkcií) je založená na jasných fyzikálnych princípoch a snaží sa v maximálnej miere obmedziť používanie empirických konštánt, navyše poskytuje vo výstupe aj priebeh mobilizovaného plášťového trenia (stupne využitia plášťového trenia), osovú silu a posunutie pozdĺž pilóty.

Metóda funguje na princípe náhrady interakcie zemného prostredia a pilóty pomocou prenosovej funkcie (mobilizačnej krivky), pričom prenosová funkcia pre plášť je definovaná ako závislosť medzi posunom pilóty s_s a mobilizovaným plášťovým trením q_s . Prenosová funkcia pre päť je definovaná závislosťou medzi zvislým posunutím päty pilóty s_b a normovým napätím mobilizovaným na päte (q_b). Hĺbka a typ zeminy definujú tvar prenosovej funkcie, v ktorej sa segment základu nachádza, pričom každý tvar prenosovej funkcie je riadený jedným alebo viacerými parametrami. V prípade aplikácie metódy prenosových funkcií je hlbinný základ v počiatočnom kroku rozdelený na predpísaný počet segmentov (prvkov), každému z nich je priradená nezávislá prenosová funkcia pre plášť a päť je priradená samostatná prenosová funkcia. Tento princíp je schematicky znázornený na obrázku č. 2.12.

SKUTEČNOST



MATEMATICKÝ MODEL
METODA PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ



Obrázok č. 2.12: Rozdelenie pilóty na jednotlivé segmenty a priradenie jednotlivých prenosových funkcií segmentom plášťa a päte (Chalmovský^[16])

Algoritmus výpočtu hlbinného základu pomocou základnej varianty MPF

1. Rozdelenie pilóty na segmenty (n_{seg})
2. V päte posledného segmentu je predpísané malé posunutie s_b^n (n je poradové číslo segmentu)
3. Na základe zvolenej prenosovej funkcie (pre päť) na päte posledného segmentu sa vypočíta mobilizované napätie q_b^n a silu P_b^n
4. Predpoklad rovinnosti posunu na päte, v strede a v hlave posledného segmentu

$$(s_c^n = s_b^n = s_t^n) \quad 2.31$$

5. Podľa vybranej prenosovej funkcie pre plášť sa zistí mobilizované plášťové trenie q_s^n
6. Vypočíta sa sila uprostred segmentu P_m^n a v hlave segmentu P_t^n

$$P_m^n = P_b^n + 0,5\pi \cdot D_s^n \cdot L_s^n \cdot q_s^n \quad 2.32$$

$$P_t^n = P_b^n + \pi \cdot D_s^n \cdot L_s^n \cdot q_s^n \quad 2.33$$

7. D_s^n a L_s^n sú priemer a dĺžka daného segmentu.
8. Výpočet elastickej deformácie w_{el}^n pre daný segment, kde $E_p \cdot A_s^n$ je osová tuhosť daného segmentu

$$w_{el}^n = \frac{P_m^n \cdot L_s^n}{E_p \cdot A_s^n} \quad 2.34$$

9. Na základe elastickej deformácie vypočítanej v predchádzajúcom kroku prebehne aktualizácia posunutia $s_c^{n'}$ stredového bodu

$$s_c^{n'} = s_c^n + 0,5 \cdot w_{el}^n \quad 2.35$$

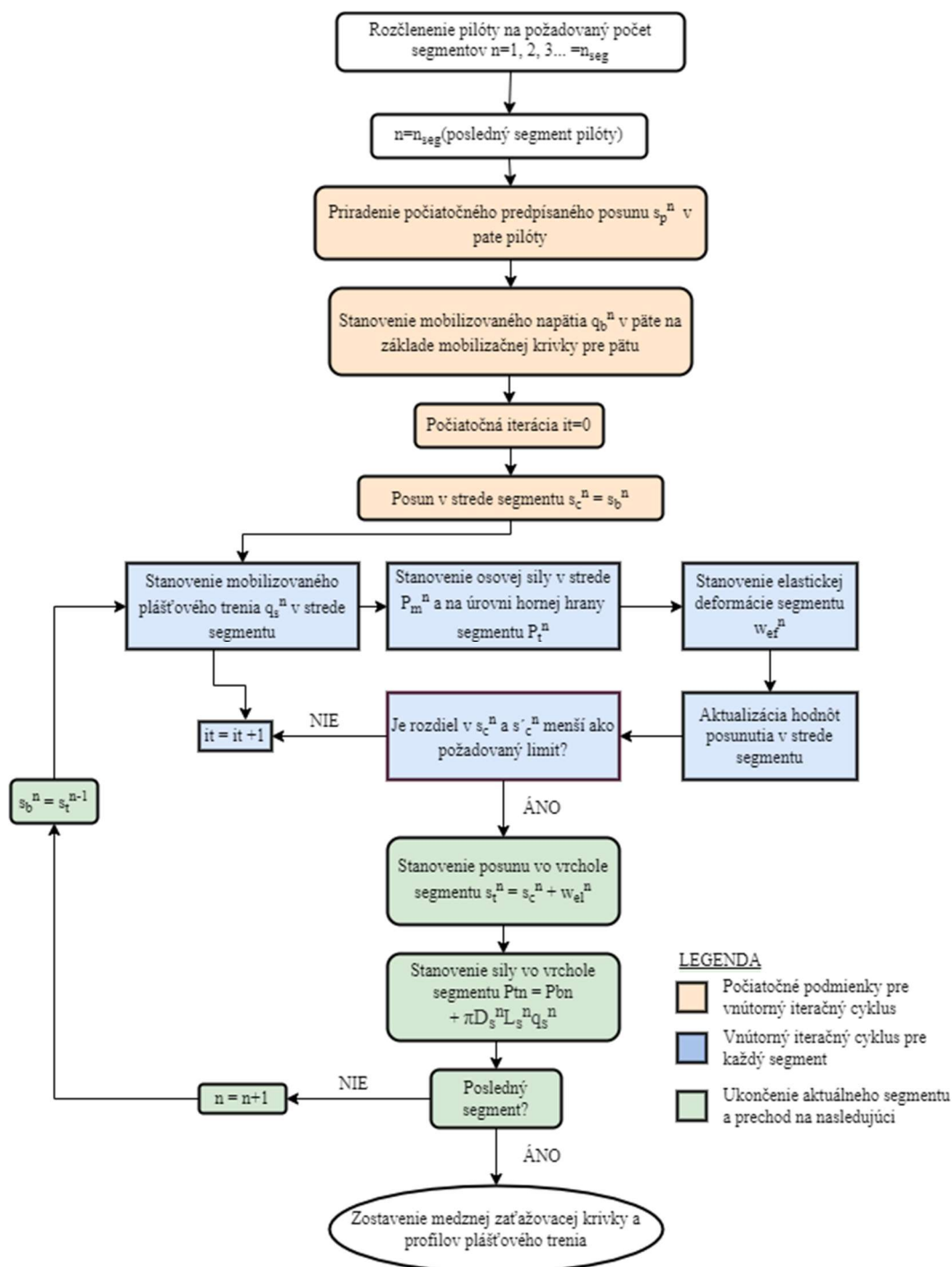
10. Po aktualizácii posunutia stredového bodu segmentu je upravené mobilizované plášťové trenie $q_s^{n'}$ a kroky 6 – 9 sa opakujú tak, aby bol rozdiel s_c^n a $s_c^{n'}$ v požadovanej tolerancii
11. Výpočet sily (P_t^n) a posunu (s_t^n) v hlave segmentu

$$s_t^n = s_c^{n'} + 0,5 \cdot w_{el}^n \quad 2.36$$

$$P_t^n = P_b^n + \pi \cdot D_s^n \cdot L_s^n \cdot q_s^n \quad 2.37$$

12. Kroky č. 3 – 10 sa opakujú pre všetky segmenty. Sila v hlave (P_t^0) a posun v hlave (s_t^0) prvého segmentu predstavujú bod celkovej medznej zaťažovacej krivky (päty a plášťa). Sila v päte (P_b^n) posledného segmentu n v závislosti na posune s_t^0 predstavuje bod medznej zaťažovacej krivky päty.

13. Pre získanie ďalších predpísaných posunutí sú iterované body č. 1 – 11



Obrázok č. 2.13: Vývojový diagram pre jeden zaťažovací krok^[16]

Zhrnutie výhod MPF

- Explicitne zohľadňuje vplyv tuhosti pilóty na rovnomernosť mobilizácie plášťového trenia a teda na tvar medznej zaťažovacej krivky
- Zahrnutie heterogenity geologického prostredia, každý segment môže mať nezávislú prenosovú funkciu
- Ovplyvnenie zmeny prierezu pilóty na výsledný tvar MZK – každý segment môže mať definovaný nezávislý priemer, čo je možné zahrnúť vo výpočte
- MPF je založená na fyzikálne reálnom princípe nárastu mobilizovaného napätia na plášti/päte v závislosti na relatívnom posune pilóta – zemina
- Variabilné prenosové funkcie

2.2.2 Metóda efektívnych napätí (β metóda)

Do každej prenosovej funkcie vstupuje parameter medzné plášťové trenie ($q_{s,ult}$) a medzné napätie na päte ($q_{b,ult}$).

Metóda efektívnych napätí (β metóda) pomocou koeficientu β vzťahuje medzné plášťové trenie k efektívnemu geostatickému napätiu σ'_{or} . K_s je súčiniteľ bočného tlaku (pôsoiaceho na plášť pilóty) a δ je trecí uhol na rozhraní pilóty a zeminy (odporúča sa použiť uhol vnútorného trenia v kritickom stave φ_{cv}).

$$q_{s,ult} = \sigma'_{ho} \cdot \tan \delta \quad 2.38$$

$$q_{s,ult} = \sigma'_{or} \cdot K_s \cdot \tan \delta \quad 2.39$$

$$q_{s,ult} = \beta \cdot \sigma'_{or} \quad 2.40$$

$$\beta = K_s \cdot \tan \delta \quad 2.41$$

Teoretickú hodnotu súčiniteľa β pre normálne konsolidované zeminy je možné zistiť podľa vzťahu:

$$K_s = K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi_{cv} \quad 2.42$$

$$\beta = (1 - \sin \varphi_{cv}) \tan \varphi_{cv} \quad 2.43$$

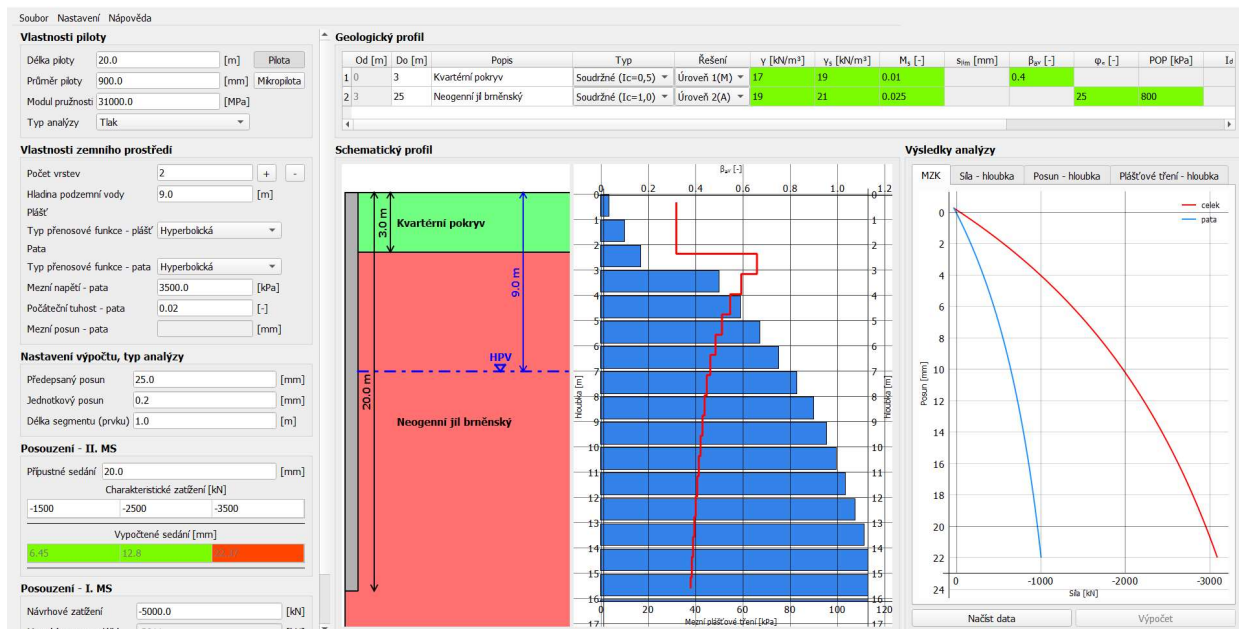
Pre uhol vnútorného trenia v rozsahu 20 až 30 stupňov sa teoretická hodnota koeficientu β pohybuje približne v rozmedzí 0,24 až 0,29; podľa experimentálnych hodnôt zo zaťažovacích skúšok 0,25 – 0,40.

Podstatne väčším problémom je určenie súčiniteľa K_s pre prekonsolidované súdržné zeminy, keďže túto hodnotu je možné určiť rôznym spôsobom podľa jednotlivých autorov. Všetky teórie však majú spoločné to, že vodorovné napätie sa v priebehu zaťažovania nemení.

Napríklad *Burland*^[36] (1973) pre prekonsolidované vrтанé pilóty v londýnskych íloch zostavil závislosť medzi dĺžkou pilóty a priemerným medzným plášťovým trením. Na jej základe odhadol hodnotu β faktoru v intervale 0,8 až 1,2 (vyššie hodnoty v dôsledku vyššieho súčiniteľa K_0)

2.2.3 PMpLTO (Pile-Micropile Load Transfer Optimization)

Inverzná analýza zaťažovacích skúšok pilót prebehne v softwari *PMpLTO* (Pile-Micropile Load Transfer Optimization), určenom pre návrh a posúdenie hlbinných základových prvkov pomocou metódy prenosových funkcií.



Obrázok č. 2.14: Uživat'ské prostredie softwaru PMpLTO

Keďže sa ani pri jednej skúške nepodarilo dosiahnuť dostatočnú hĺbku pre analýzu päty pilóty, práca sa bude zaoberať výlučne analýzou plášťa pilóty. V podmienkach ČR sú volené hyperbolické prenosové funkcie (*Bohr*^[4], 2016), pretože za daných okolností s dostatočnou presnosťou vystihujú deformačné chovanie vrтанých pilót.

Vstupné parametre, ktoré definujú prenosové funkcie, sú v tomto prípade pre plášť pilóty:

- deformačný parameter M_s , riadiaci počiatočnú tuhosť pilóty
- medzné plášťové trenie $q_{s,ult}$

Parameter M_s ovplyvňuje počiatočný sklon hyperbolickej prenosovej funkcie. V zahraničí bol odvodený niekoľkými autormi a odporúčané intervaly sú podrobne popísané v manuáli k softvéru (*Chalmovsky*^[16]). Podľa *Flemminga*^[24] sa hodnota tohoto parametru pohybuje v intervale od 0,001 (prekonsolidované súdržné zeminy s tuhou až pevnou konzistenciou) do 0,004 (súdržné zeminy s mäkkou konzistenciou). *Bohr*^[4] odporúča využívať priemernú hodnotu 0,0038 (hodnota ovplyvnená spoločným vyhodnotením vrtaných a razených pilót, pre pilóty vrtané sa parameter pohybuje v intervale 0,0025 až 0,0030). Medzné napätie na päte je vo väčšine prípadov dosiahnuté pri relatívnom posune segmentu do 15 mm, pre mobilizáciu medzného napätia na päte je vo všeobecnosti potrebný posun, ktorý sa rovná 10% priemeru pilóty. Tým pádom je hodnota parametru M_s výrazne vyššia, dosahuje úrovne 0,01. Na stanovenie medzného plášťového trenia je v programe použitá β metóda.

Analýza v uvedenom softvéri bola v praktickej časti práce využitá v dvoch stupňoch, základné atribúty oboch použitých úrovní sú uvedené v tabuľke č. 2.14.

| Stupeň analýzy | Variabilná β | Variabilné radiálne napätie | Vhodnosť | Vstupy |
|----------------|--------------------|-----------------------------|--|---------------------------|
| I | NE | NE | NC súdržné zeminy | β_{av}/φ_{cv} |
| II | ANO | NE | OC súdržné zeminy, nesúdržné zeminy | POP, φ_{cv} |

Tabuľka č. 2.13: Stupne analýz v softvéri *PMpLTD*^[16]

Stupeň analýzy I

V úrovni I je uvažovaný rovnaký súčiniteľ β pre každý segment pilóty (priemerný súčiniteľ β_{av}). Predpokladá sa, že vplyvom technológie vyhotovenia je zemina na kontakte s pilótou porušená, preto je použitý kritický uhol vnútorného trenia φ_{cv} . Tento postup je z hľadiska princípov mechaniky zemín vhodný pre normálne konsolidované súdržné zeminy, kde nie je súčiniteľ bočného tlaku závislý na hĺbke, no je možné ho využiť aj v podmienkach ČR v prípade výskytu prekonsolidovaných terciérnych zemín s nadložíím z kvartérneho pokryvu (zmena koeficientu zemného tlaku v klúde nebude až tak výrazná). V metóde 1M, ktorá bola použitá pre účely tejto práce, sa tento faktor vkladá do softvéru priamo, ale softvér ho vo variante 1A dokáže dopočítať aj automaticky pomocou vzťahov:

$$\beta_{av} = K_s \cdot \tan \delta = K_s \cdot \tan \varphi_{cv} \quad 2.44$$

$$\beta_{av} = K \cdot \tan \delta = K_0^{nc} \cdot \tan \varphi_{cs} = (1 - \sin \varphi_{cv}) \cdot \tan \varphi_{cv} \quad 2.45$$

Z vyhodnotenia statických penetračných skúšok boli získané aj priemerné kritické uhly vnútorného trenia, no v štandardnom prípade je možné nájsť odporúčané hodnoty v literatúre, prípadne pomocou kruhovej šmykovej skúšky alebo triaxiálnej šmykovej skúšky v laboratóriu.

Stupeň analýzy II

Pre popis správania sa prekonsolidovaných **súdržných zemín** je v úrovni II zohľadnená závislosť súčiniteľa bočného tlaku na hĺbke. Program je v tomto prístupe inšpirovaný metodikou amerického úradu *Federal Highway Administration*, do výpočtu koeficientu β vstupuje aj *OCR* (pomer najväčšieho napätia pôsobiaceho v minulosti a aktuálneho napätia):

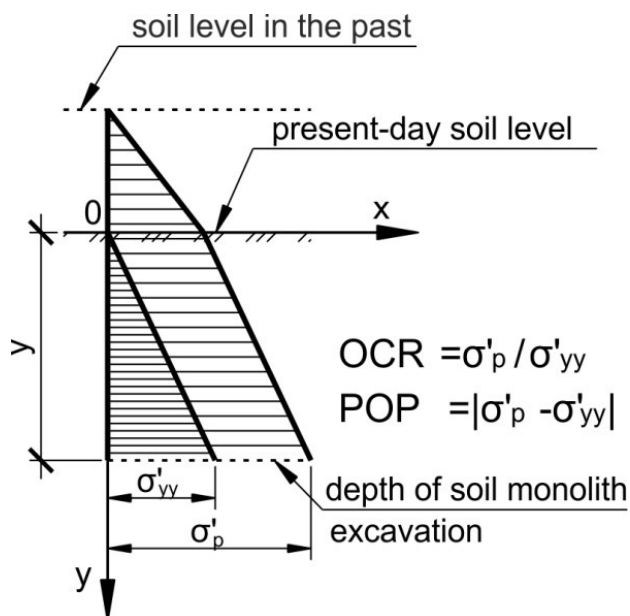
$$\beta = K_s \cdot \tan \delta = K_0^{OC} \cdot \tan \varphi_{cv} = (1 - \sin \varphi_{cv})(OCR)^{\sin \varphi_{cv} \tan \varphi_{cv}} \quad 2.46$$

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{or}} \quad 2.47$$

Zásadnou nevýhodou *OCR* je závislosť na hĺbke, pre účely výpočtu bol teda nahradený parametrom *POP* (pre-overburden pressure, rozdiel maximálneho napätia pôsobiaceho v minulosti a aktuálneho napätia), ktorý je s hĺbkou konštantný (vzťahy č. 2.48 a 2.49)

$$\beta = K \cdot \tan \delta = K_0^{OC} \cdot \tan \varphi_{cS} = (1 - \sin \varphi_{cv}) \left(\frac{POP}{\sigma'_{or}} + 1 \right)^{\sin \varphi_{cv}} \tan \varphi_{cv} \quad 2.48$$

$$POP = \sigma'_p - \sigma'_{or} \quad 2.49$$



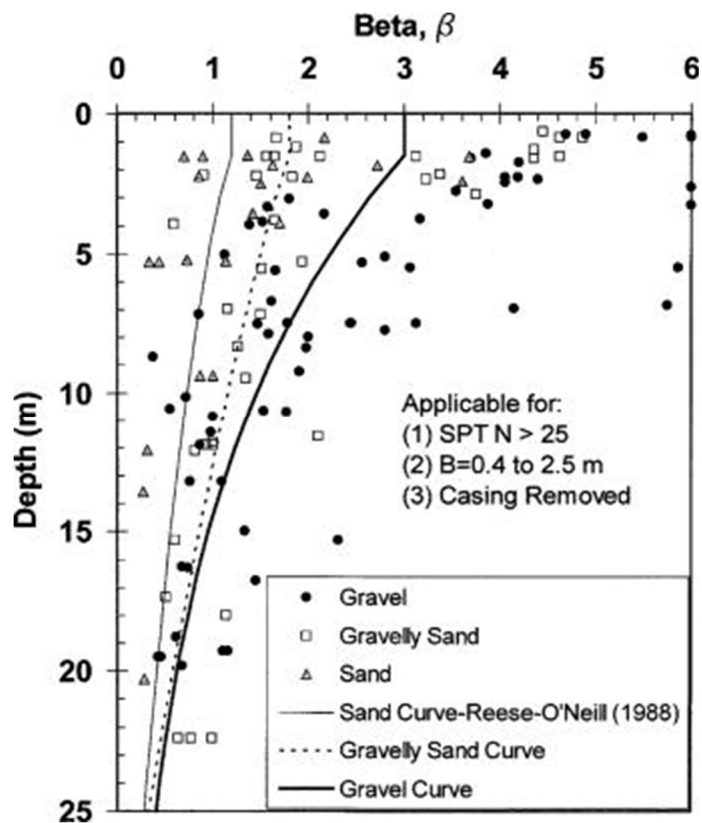
Obrázok č. 2.15: Rozdiel medzi parametrami OCR a POP ^[W7]

Pre **nesúdržné zeminy** sú na stanovenie hodnoty faktoru β použité empirické vzťahy, ktoré boli odvodené zo zaťažovacích skúšok v Severnej Amerike (*Rollins*^[44]).

$$\beta = 2,00 - 0,15 \cdot z^{0,75}; 0,25 \leq \beta \leq 1,80 \quad 2.50$$

$$\beta = 3,40 \cdot e^{(-0,085 \cdot z)}; 0,25 \leq \beta \leq 3,00 \quad 2.51$$

Vzťah **2.50** je určený predovšetkým pre piesok štrkovitý (obsah štrkovitých frakcií 25 - 50%), maximálna uvažovaná hodnota súčiniteľa β je v tomto prípade 1,80. V prípade väčšieho podielu štrkovitých frakcií ako 50% je faktor β stanovený podľa vzťahu **5.21** s maximálnou hodnotou 3,00. Priebeh oboch závislostí na hĺbke je zobrazený v grafe č. **2.8**.



Graf č. 2.8: Závislosť faktoru β na hĺbke pre nesúdržné zeminy (Rollins^[43])

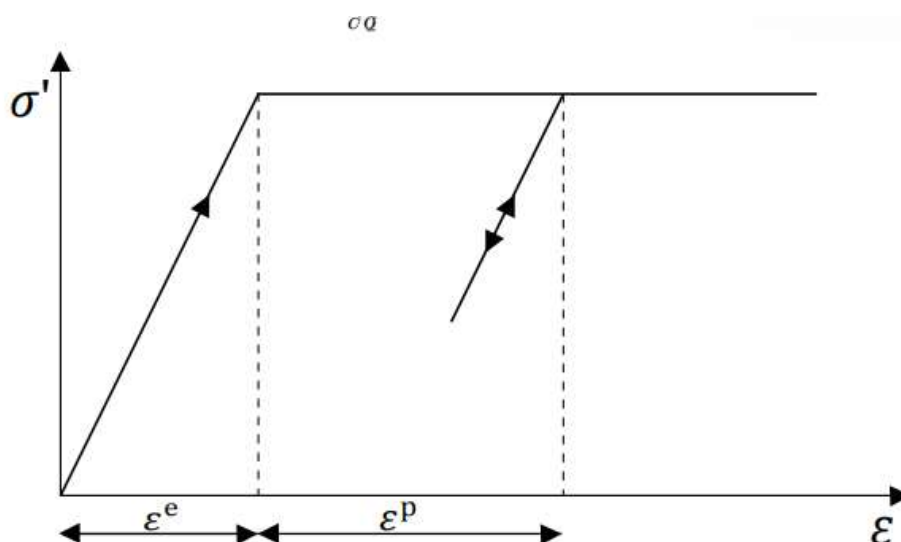
Pre účely tejto práce bola v praktickej časti (kapitola 5) použitá metóda 2A, kde je po zadaní POP a uhlu vnútorného trenia φ_{cv} koeficient β dopočítaný automaticky.

2.3 Metóda konečných prvkov – popis použitých materiálových modelov

Jednou z klíčových činností numerického modelovania je voľba správneho materiálového modelu. V tomto prípade pre riešené zeminy pripadali do úvahy tieto materiálové modely:

2.3.1 Mohr-Coulombov materiálový model

Na prvotnú aproximáciu správania sa zeminy sa často používa tento jednoduchý a známy lineárne-elastický perfektne-plastický model. Lineárne-elastická časť je založená na Hookovom zákone izotropnej elasticity a perfektne-plastická časť na Mohr-Coulombovom kritériu napätia, formulovanom v rámci neasociovanej plasticity. Reálne sa však pri zmene normálového alebo šmykového napätia zeminy chovajú skôr nelineárne, preto je vhodné použiť niektorý z pokročilejších materiálových modelov.



Obrázok č. 2.16: Základný pracovný diagram elastického perfektne-plastického správania materiálu^[w7]

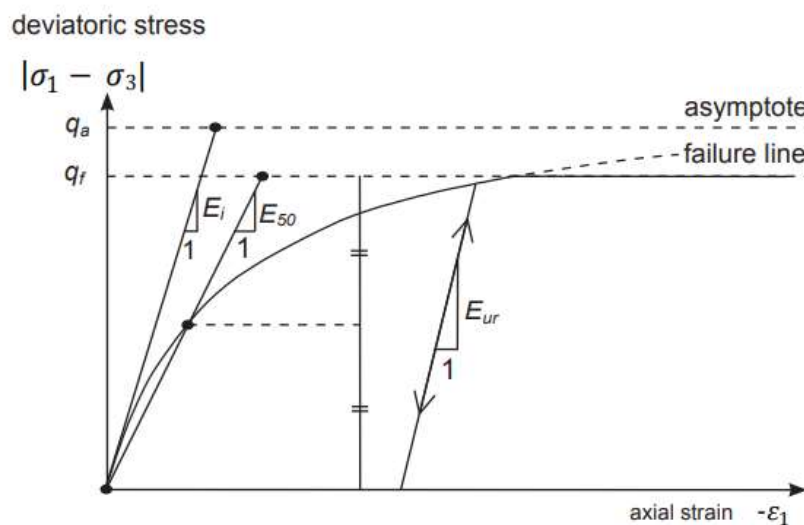
2.3.2 Hardening Soil materiálový model

Tento pokročilý materiálový model je určený na simuláciu vlastností mäkkých aj tuhých pôd. V porovnaní s modelom elastickým perfektne-plastickým nie je plocha plasticity fixovaná v priestore hlavného napätia, ale môže v dôsledku plastickej deformácie expandovať.

V tomto modeli rozlišujeme medzi dvoma hlavnými typmi spevňovania zeminy (hardening), a to šmykovým a kompresným spevňovaním (oba typy sú v modeli zahrnuté). Šmykové spevňovanie sa používa na modelovanie ireverzibilných deformácií v dôsledku primárneho deviátorového zaťaženia. Kompresné spevňovanie sa používa na modelovanie nevratných plastických deformácií spôsobených primárnou kompresiou pri edometrickom zaťažovaní a izotropnom zaťažovaní.

Pri primárnom deviátorovom zaťažovaní vykazuje zemina klesajúcu tuhosť a zároveň vznikajú nevratné plastické deformácie. Základné charakteristiky modelu sú:

- mocninná závislosť tuhosti od napätia podľa: vstupný parameter m (power)
- plastické namáhanie v dôsledku primárneho deviátorového zaťaženia: vstupný parameter E_{50}^{ref}
- plastická deformácia v dôsledku primárneho stlačenia: vstupný parameter E_{oed}^{ref}
- elastické odľahčovanie a opätovné zaťažovanie: vstupný parameter E_{ur}^{ref}
- Mohr-Coulombovo kritérium zlyhania: vstupné parametre c , φ and ψ



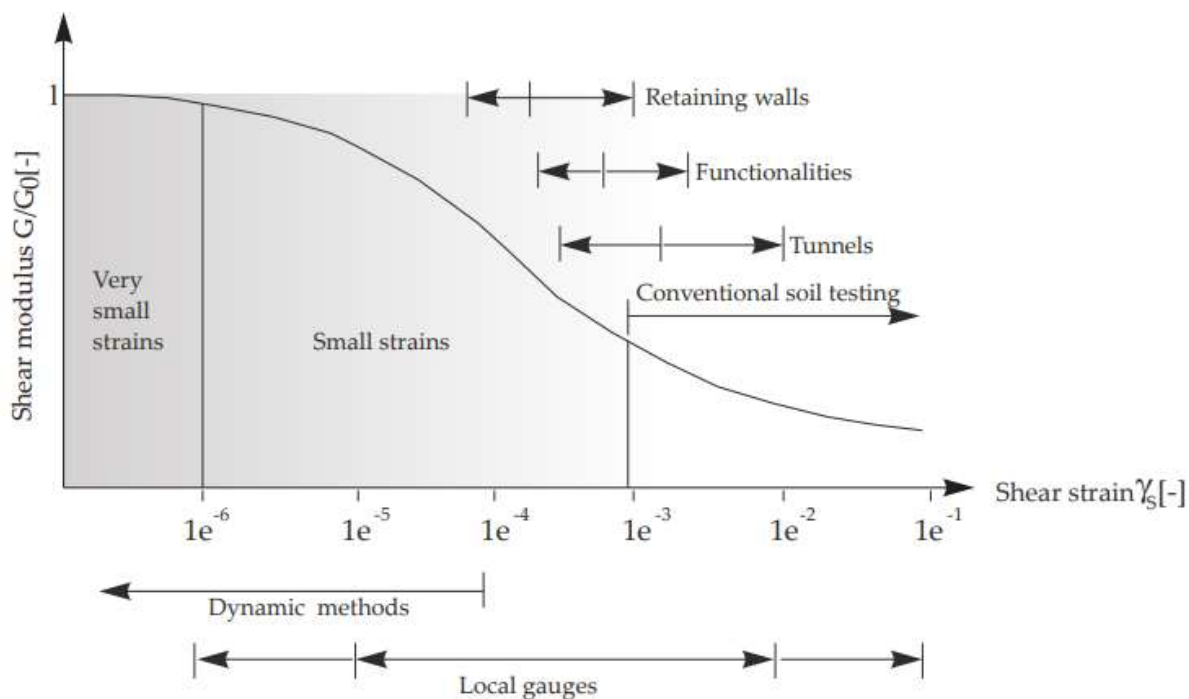
Obrázok č. 2.17: Hyperbolický pracovný diagram pre model Hardening Soil^[w7]

2.3.3 Hardening Soil + Small Strain Stiffness materiálový model

Pôvodný model Hardening Soil predpokladá elastické správanie materiálu počas odľahčovania a opätovného zaťažovania. Rozsah deformácie, v ktorom možno zeminy považovať za skutočne elastické, t. j. kde sa takmer úplne zotavia z aplikovaného namáhania, je však veľmi malý. So zvyšujúcou sa amplitúdou šmykovej deformácie tuhosť pôdy klesá nelineárne.

Na popis zmeny tuhosti s deformáciou sú potrebné iba dva dodatočné parametre (v porovnaní s HS modelom):

- počiatočný alebo modul pružnosti v šmyku pri veľmi malých deformáciách G_0 .
- úroveň šmykovej deformácie $\gamma_{0,7}$, pri ktorej je sečný šmykový modul G_s znížený na približne 70% G_0 .



Obrázok č. 2.18: Charakteristické tuhostne-deformačné správanie pôdy s typickými rozsahmi deformácií pre laboratórne testy^[w7]

2.4 Analytický spôsob stanovenia MZK podľa Masopusta (nelineárna metóda)

Získané dáta a poznatky z predchádzajúcich častí budú použité na úpravu regresných koeficientov pre výpočet únosnosti pilót v 2. medznom stave (sadanie) v nelineárnej teórii (*Masopust*^[2]). V krátkom teoretickom úvode bude pripomenutá úloha týchto koeficientov v celkovom výpočtovom postupe.

Pre stanovenie medznej únosnosti na plášti pilóty R_{su} sa vychádza z rovníc regresných kriviek zistených na základe statickej analýzy 236 statických zaťažovacích skúšok. Rovnice plášťového trenia pre príslušný tvar zeminy majú tvar:

$$q_{s,ult} = a - \frac{b}{D_1/d_i} \quad 2.52$$

V tomto vzorci je D_1 hĺbka od povrchu terénu (resp. hlavy pilóty) do stredu príslušnej i-tej vrstvy, d_i reprezentuje priemer pilóty v tejto vrstve. Keďže pilóta prenáša zaťaženie aj na päte, napätie na päte pilóty q_p je mobilizované pri dosiahnutí medzného odporu na plášti a riadi sa rovnicou č. 2.54 (d_p profil pilóty v päte, L je dĺžka pilóty):

$$q_{b,ult} = e - \frac{f}{L/d_p} \quad 2.53$$

Koeficienty (a , b) sú v práci riešené regresné faktory. Ich hodnota závisí od typu zeminy a je uvedená v tabuľke č. 2.15:

| Zemina/Hornina | | a [kPa] | b [kPa] | e [kPa] | f [kPa] |
|----------------|------------------|---------|---------|---------|---------|
| Poloskalná | R3 | 246,02 | 225,95 | 2841,31 | 1298,96 |
| | R4 | 169,98 | 139,45 | 1616,22 | 1155,34 |
| | R5 | 131,92 | 94,96 | 957,61 | 703,89 |
| Nesúdržná | $I_D = 0,5$ | 62,46 | 16,06 | 268,11 | 174,89 |
| | $I_D = 0,7$ | 91,22 | 48,44 | 490,34 | 445,42 |
| | $I_D = 1$ | 154,03 | 115,88 | 1596,70 | 1399,88 |
| Súdržná | $I_C = 0,5$ | 46,39 | 20,81 | 197,74 | 150,22 |
| | $I_C \geq 1, R6$ | 97,31 | 108,59 | 987,60 | 1084,26 |

Tabuľka č. 2.14: Regresné koeficienty v nelineárnej metóde^[2]

3 GEOTECHNICKÁ INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK

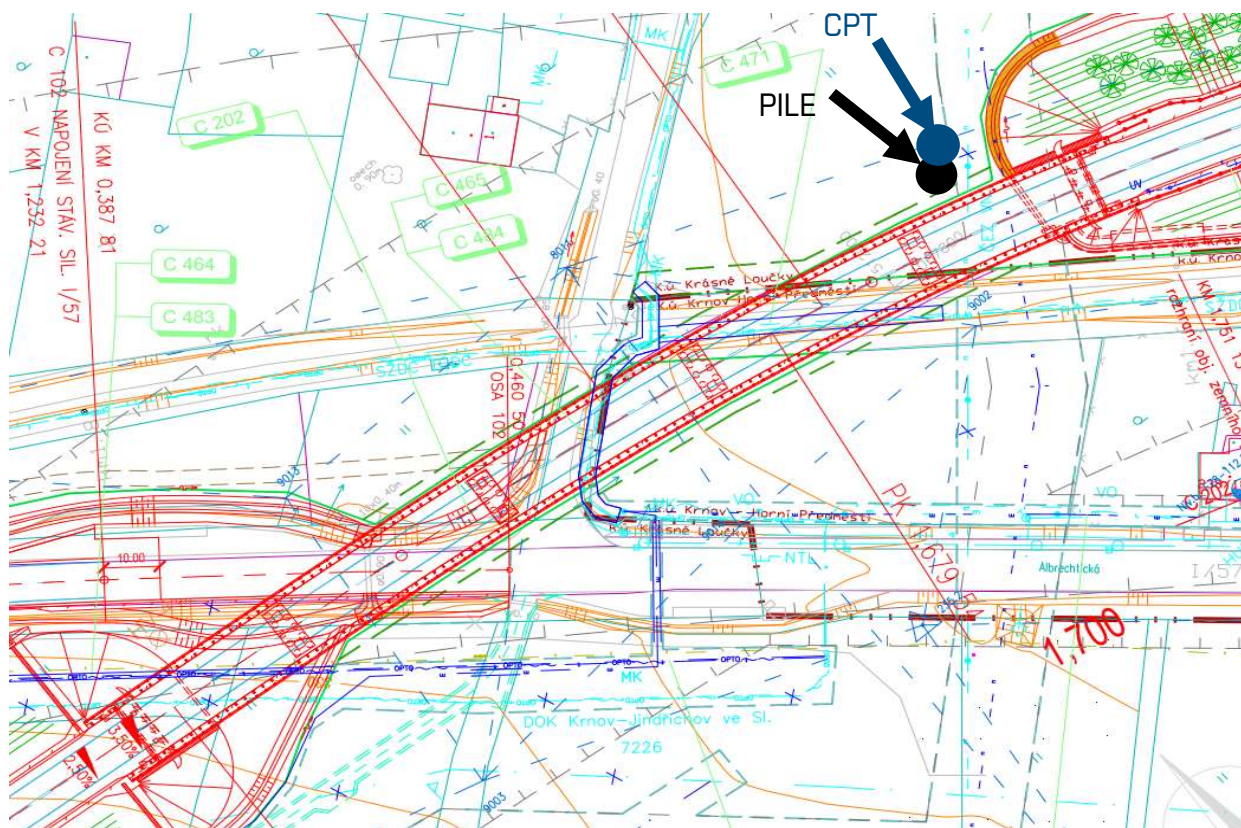
3.1 Statická zaťažovacia skúška mimosystémovej pilóty Z202 (mostný objekt č. C202 – Krnov, cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat)

3.1.1 Základné informácie

Dáta pre nasledujúce vyhodnotenie boli získané zo správy o vyhodnotení zaťažovacích skúšok na mimosystémových vŕtaných veľkopriemerových pilotách Z202 a Z204 na mostných objektoch C202 a C204 (*Masopust*^[17]), ktoré sú súčasťou novobudovaného SV obchvatu mesta Krnov na ceste I. triedy I/57. Geotechnická interpretácia je vykonaná pre pilótu Z202, keďže v mieste pilóty Z204 nebola realizovaná CPT skúška (v čase vykonávania terénnych skúšok bol mostný objekt C204 vo výstavbe a k pilóte nebol umožnený prístup). Skúšobné pilóty boli vzhľadom k budúcim systémovým pilótam umiestnené tak, aby nedošlo ku kolízii kotiev statickej zaťažovacej skúšky a budúcich systémových pilót. Pracovná plošina, na ktorej sa daná skúška vykonala, sa nachádzala vo výškovej úrovni 328,35 m. n. m. Bpv. Hlava pilóty nad plošinu vyčnievala 0,48 m (328,83 m. n. m.).

| Parameter pilóty | Z202 |
|--|-----------------|
| Priemer zapaženej časti pilóty [mm] a jej dĺžka [m] | 1180/16,30 |
| Celková dĺžka pilóty [m] | 16,7 |
| Dĺžka pilóty v zemi [m] | 16,4 |
| Dátum vyhotovenia skúšobnej pilóty | 23.11.2017 |
| Kvalita betónu | C25/30 XA1 |
| Teoretická spotreba betónu [m ³] | 18,25 |
| Skutočná (deklarovaná) spotreba betónu [m ³] | 21 |
| Dátum vyhotovenia zaťažovacej skúšky | 23. – 24.1.2018 |

Tabuľka č. 3.1: Hlavné parametre zaťažovanej pilóty Z202 (*Masopust*^[17])



Obrázok č. 3.1: Situácia mostného objektu C202 - cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat

3.1.2 Inžiniersko-geologické podmienky v lokalite

Predkvartérne podložie je tvorené paleozoickými sedimentami Českého masívu (konkrétne sa jedná o kulmské droby, prachovce, ílovcy a eventuálne aj zlepenec vo flyšovom vývoji). Toto skalné podložie je však prekryté mohutným pleistocenným súvrstvom, tvoreným hlavne štrkami a pieskami, pochádzajúcimi z doby kontinentálneho zaľadnenia. Mocnosť týchto vrstiev dosahuje lokálne aj 20 m. Terén je následne vyrovnaný navážkou malej mocnosti. Zastihnuté súvrstvia je možné rozdeliť do príslušných geotechnických typov:

GT1 – jemnozrnné zeminy triedy F4 – F6, prípadne navážky

GT2A – fluviálne a glaciálne štrky a prímiesou jemnozrnej zeminy G3 - G4, väčšinou uľahlé a zvodnelé

GT3A – podložie tvoriace kulmské horniny – zvetralá droba až drobový pieskovec triedy R5/R6 (sondami zastihnuté pri objekte C202)

GT3B – kulmské horniny tvorené navetralou až technicky zdravou drobou a drobovým pieskovcom triedy R3 (zastihnuté pri objekte C204)

Podzemná voda bola zistená pri oboch vrtoch s nízkou uhličitou agresivitou XA1, maximálne stredne vysokou agresivitou XA2.

Geologický profil zistený v konkrétnom mieste vrtanej pilóty Z202 z protokolu o vyhotovení vrtanej pilóty (voľný popis):

| Geologický profil v mieste skúšanej pilóty (objekt C202) | |
|--|-------------------------------------|
| Hĺbka [m] | Typ zeminy |
| 0,00 - 1,50 | HLINA ílovitá (tuhá) |
| 1,50 - 15,00 | ŠTRK ílovitý, piesčitý |
| 15,00 - 16,22 | PIESOK so štrkom (uľahlý, zvodnelý) |

Tabuľka č. 3.2: Geologický profil v mieste skúšanej pilóty Z202 (*Masopust*^[17])

Skutočný geologický profil teda v podstate súhlasí s vyššie uvedenými projektovými predpokladmi.

3.1.3 Charakteristika pilóty a zaťažovacej skúšky

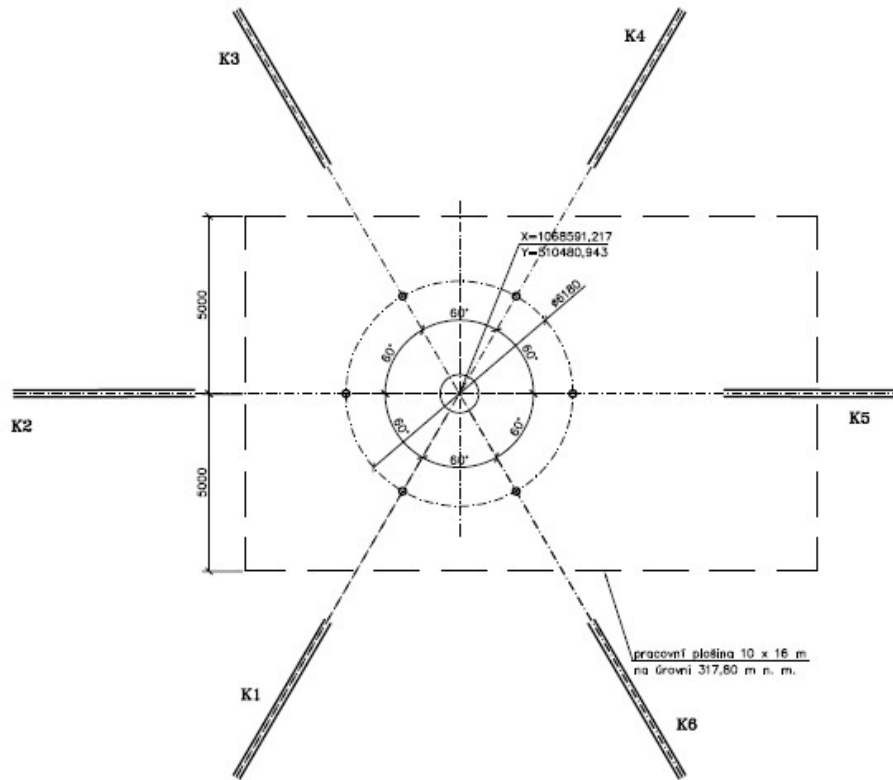
Pre zaťažovaciu skúšku bol vybudovaný skúšobný most, kotvený šiestimi zemnými predpäťmi pramencovými kotvami (6x Lp 15,7 mm/1570/1770 MPa), ktoré sú rozmiestnené po obvodu kruhu s priemerom 6340 mm rovnomerne, jednotlivé kotvy spolu zvierajú uhol 60°. Kotvenie bolo priamo nadimenzované na uvažovanú zaťažovaciu skúšku s maximálnym zaťažením $P = 6,0 - 6,1$ MN.

Dĺžka kotiev:

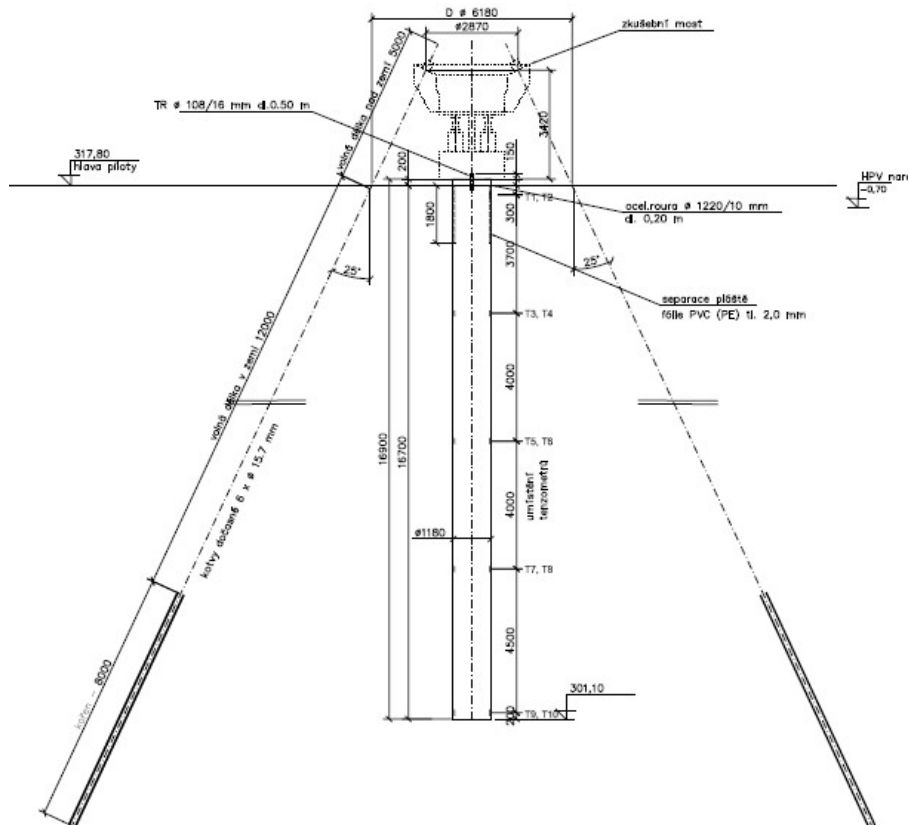
12,0 m – voľná dĺžka v zemi

8,0 m – dĺžka koreňa kotvy

20,0 m – celková dĺžka vrtu



Obrázok č. 3.2: Kotvenie skúšobného mostu pre pilótu Z202 - pôdorys (Masopust^[17])



Obrázok č. 3.3: Kotvenie skúšobného mostu pre pilótu Z202 - rez (Masopust^[17])



Obrázok č. 3.4: Skúšobný most typu „hrbik“ (Masopust⁴⁸¹)

Tenzometrami (Geokon, model 4200) je možné stanoviť priebeh síl pozdĺž pilóty a následne odvodiť hodnoty mobilizovaného plášťového trenia pre jednotlivé úseky. Z kontrolných dôvodov boli v každom priereze osadené dva strunové tenzometre, ktoré boli vo zvislom smere naviazané na betonársku výstuž. Konkrétne pre pilótu Z202 sú tenzometre osadené v úrovniach:

- 1. prierez v hĺbke 3,40 m pod terénom
- 2. prierez v hĺbke 5,90 m pod terénom
- 3. prierez v hĺbke 8,40 m pod terénom
- 4. prierez v hĺbke 10,90 m pod terénom
- 5. prierez v hĺbke 13,40 m pod terénom
- 6. prierez v hĺbke 16,40 m pod terénom



Obrázok č. 3.5: Inštalácia strunových tenzometrov na armokôš pilóty (*Masopust⁽¹⁷⁾*)

Vo vrchnej časti pilóty je umiestnená plášťová separácia z PVC fólie na výšku 1,80 m. Zatažovacia skúška prebiehala v zatažovacích a odľahčovacích stupňoch uvedených v tabuľke 3.3. Pri jednotlivých stupňoch je uvedené aj príslušné posunutie v hlave.

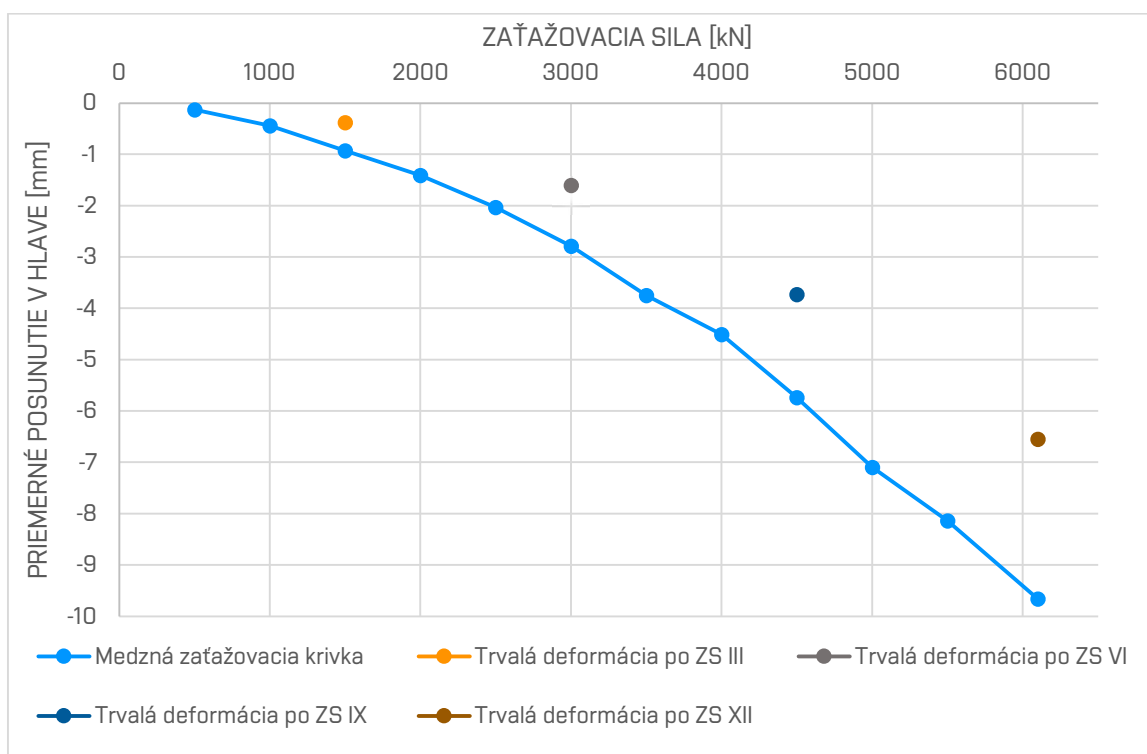
| Zatažovací stupeň | Odľahčenie [kN] | Zataženie P [kN] | Priemerné zatláčenie - s [mm] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|---------------------------------------|
| Odľahčovací stupeň | | | |
| I | | 500 | -0,13 |
| II | | 1000 | -0,44 |
| III | | 1500 | -0,93 |
| I | 0,00 | | -0,38 |
| IV | | 2000 | -1,41 |
| V | | 2500 | -2,03 |
| VI | | 3000 | -2,79 |
| II | 0,00 | | -1,60 |
| VII | | 3500 | -3,75 |
| VIII | | 4000 | -4,51 |
| IX | | 4500 | -5,74 |
| III | 0,00 | | -3,73 |
| X | | 5000 | -7,10 |
| XI | | 5500 | -8,14 |
| XII | | 6100 | -9,66 |
| IV | 0,00 | | -6,55 |

Tabuľka č. 3.3: Priebeh zatažovacej skúšky a namerané hodnoty posunutia v hlave
 (Z202) (*Masopust⁽¹⁷⁾*)

3.1.4 Interpretácia výsledkov zaťažovacej skúšky

Pri zaťažovacej skúške nebolo dosiahnuté zaťaženie medzné (zatlačenie sa rovná 10% priemeru päty pilóty) ani smerné (odpovedajúce sadaniu hlavy 25 mm). Najväčšie dosiahnuté sadanie pri maximálnom zaťažení $P = 6,1$ MN bolo 9,66 mm, trvalé sadanie po odľahčení potom 6,55 mm, teda 67,8%. Trvalá deformácia pri tomto zaťažovacom stupni sa rovnala 3,11 mm (32,2%).

Na základe nameraných hodnôt je možné stanoviť závislosť medzi priemerným posunutím v hlave pilóty a silami v daných zaťažovacích stavoch. Graficky je táto závislosť znázornená tzv. medznou zaťažovacou krivkou (graf č. 3.1). Po štyroch odľahčovacích stavoch boli získané štyri hodnoty trvalej deformácie pilóty po odľahčení.



Graf č. 3.1: Medzná zaťažovacia krivka pilóty Z202 pri mostnom objekte C202

Pilóta bola pre účely interpretácie výsledkov zaťažovacej skúšky rozdelená na segmenty, veľkosť každého segmentu je definovaná dvomi po sebe nasledujúcimi úrovňami tenzometrického merania.

V prvom kroku je z nameraného pretvorenia v danom priereze na základe osovej tuhosti stanovený priebeh síl v pilóte v závislosti na hĺbke (rovnica č. 3.1, tabuľka č. 3.4).

$$F_{h,i} = E \cdot A_p \cdot \varepsilon_i$$

3.1

$F_{h,i}$ sila prenesená do danej hĺbky

EA_p osová tuhosť pilóty (pilóta Z202 má konštantný prierez po celej dĺžke)

ε_i namerané pretvorenie v riešenom priereze

| Hĺbka pilóty [m] | 0 | 3,4 | 5,9 | 8,4 | 10,9 | 13,4 | 16,4 |
|-----------------------------|------|------|------|------|------|------|------|
| Prenesená sila ZS I [kN] | 500 | 393 | 328 | 287 | 254 | 178 | 39 |
| Prenesená sila ZS II [kN] | 1000 | 819 | 743 | 623 | 470 | 262 | 69 |
| Prenesená sila ZS III [kN] | 1500 | 1289 | 1158 | 940 | 656 | 372 | 83 |
| Prenesená sila ZS IV [kN] | 2000 | 1748 | 1508 | 1268 | 710 | 437 | 94 |
| Prenesená sila ZS V [kN] | 2500 | 2186 | 1858 | 1584 | 885 | 568 | 118 |
| Prenesená sila ZS VI [kN] | 3000 | 2637 | 2252 | 1891 | 1158 | 699 | 130 |
| Prenesená sila ZS VII [kN] | 3500 | 3125 | 2601 | 2229 | 1329 | 738 | 78 |
| Prenesená sila ZS VIII [kN] | 4000 | 3612 | 2792 | 2267 | 1360 | 650 | 0 |
| Prenesená sila ZS IX [kN] | 4500 | 4085 | 3311 | 2918 | 1858 | 973 | 189 |
| Prenesená sila ZS X [kN] | 5000 | 4542 | 3988 | 3595 | 2524 | 1398 | 578 |
| Prenesená sila ZS XI [kN] | 5500 | 4970 | 4033 | 3497 | 2459 | 1060 | 207 |
| Prenesená sila ZS XII [kN] | 6100 | 5510 | 4427 | 3856 | 2732 | 1115 | 242 |

Tabuľka č. 3.4: Sily prenesené pilótou do daných hĺbok (Z202)

Priebeh prenesených síl po dĺžke pilóty do hĺbky (podľa dát v tabuľke **3.4**) je graficky vykreslený v grafe č. **3.2**. Následne sa pomocou rozdielu síl prenesených v prierezoch v úrovni hornej hrany segmentu a spodnej hrany segmentu dopočítali sily, ktoré každý segment prenáša (tabuľka č. **3.5**).

Pri tomto výpočte bol použitý vzorec:

$$\Delta F_i = F_{h,i-1} - F_{h,i} \quad 3.2$$

ΔF_i sila prenesená daným segmentom pilóty

$F_{h,i-1}$ sila prenesená do úrovne hornej hrany počítaného segmentu pilóty – v prípade prvého segmentu pilóty sa rovná zaťaženiu P

$F_{h,i}$ sila prenesená do úrovne spodnej hrany počítaného segmentu pilóty

| Hĺbkový interval segmentu [m] | | 1,8 - 3,4 | 3,4 - 5,9 | 5,9 - 8,4 | 8,4 - 10,9 | 10,9 - 13,4 | 13,4 - 16,4 |
|------------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|------------|-------------|-------------|
| Dĺžka príslušného segmentu (a) [m] | | 1,6 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 2,5 | 3 |
| ΔF ZS I [kN] | ZS 500 kN | 107 | 65 | 41 | 33 | 76 | 139 |
| ΔF ZS II [kN] | ZS 1000 kN | 181 | 76 | 120 | 153 | 208 | 193 |
| ΔF ZS III [kN] | ZS 1500 kN | 211 | 131 | 218 | 284 | 284 | 289 |
| ΔF ZS IV [kN] | ZS 2000 kN | 252 | 240 | 240 | 558 | 273 | 343 |
| ΔF ZS V [kN] | ZS 2500 kN | 314 | 328 | 274 | 699 | 317 | 450 |
| ΔF ZS VI [kN] | ZS 3000 kN | 363 | 385 | 361 | 733 | 459 | 569 |
| ΔF ZS VII [kN] | ZS 3500 kN | 375 | 524 | 372 | 900 | 591 | 660 |
| ΔF ZS VIII [kN] | ZS 4000 kN | 388 | 820 | 525 | 907 | 710 | 762 |
| ΔF ZS IX [kN] | ZS 4500 kN | 415 | 774 | 393 | 1060 | 885 | 784 |
| ΔF ZS X [kN] | ZS 5000 kN | 458 | 554 | 393 | 1071 | 1126 | 820 |
| ΔF ZS XI [kN] | ZS 5500 kN | 530 | 937 | 536 | 1038 | 1399 | 853 |
| ΔF ZS XII [kN] | ZS 6100 kN | 590 | 1083 | 571 | 1124 | 1617 | 873 |

Tabuľka č. 3.5: Sily prenesené jednotlivými segmentami pilóty (Z202)

Z nameraných deformácií je možné stanoviť aj prírastok posunu Δu_i v jednotlivých meraných prierezoch (graf č. 3.4). Ako východzí bod s Δu_i rovným nule je volená päta pilóty, výpočet prebehol od päty k hlave pilóty podľa rovnice (3.3).

$$\Delta u_i = \Delta u_{i+1} + \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_{i+1} + \varepsilon_i) \cdot (h_{i+1} - h_i) \quad 3.3$$

ε_{i+1} namerané pretvorenie v nasledujúcom priereze

ε_i namerané pretvorenie v počítanom priereze

h_{i+1} hĺbková pozícia nasledujúceho prierezu (vzdialenosť od hlavy pilóty)

h_i hĺbková pozícia počítaného prierezu (vzdialenosť od hlavy pilóty)

Δu_{i+1} prírastok posunu v predchádzajúcom priereze (vo väčšej hĺbke)

Z prírastkov posunov Δu_i bol stanovený priebeh absolútnych posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (graf č. 3.5), tentokrát s východzím bodom v hlave pilóty, kde bol posun počas zaťažovacej skúšky monitorovaný a zaznamenaný. Absolútny posun každého prierezu u_i bol stanovený podľa rovnice 3.4.

$$u_i = s + (\Delta u_i - \Delta u_h) \quad 3.4$$

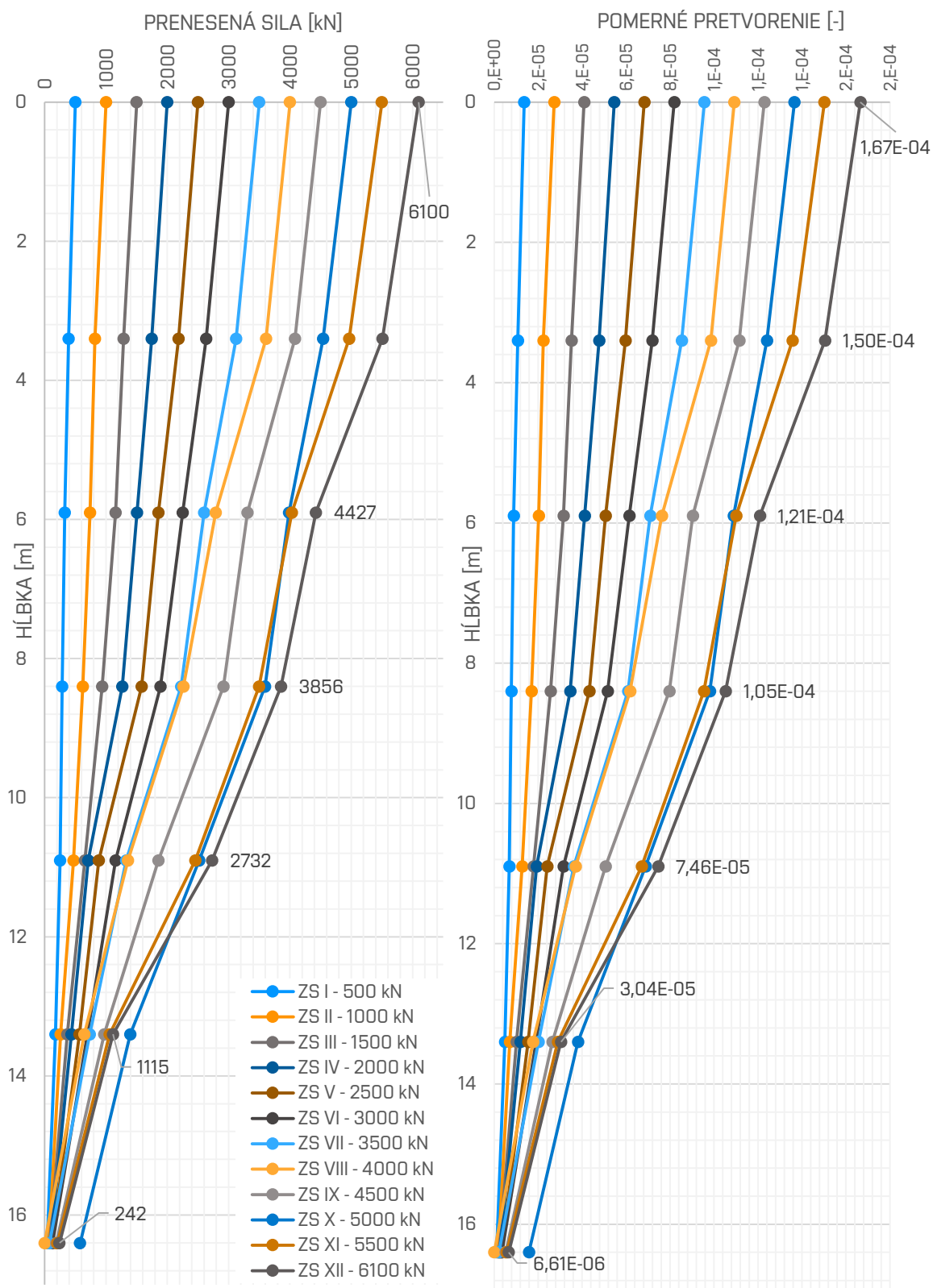
u_i absolútny posun prierezu

s namerané sadanie v hlave pre daný zaťažovací stupeň

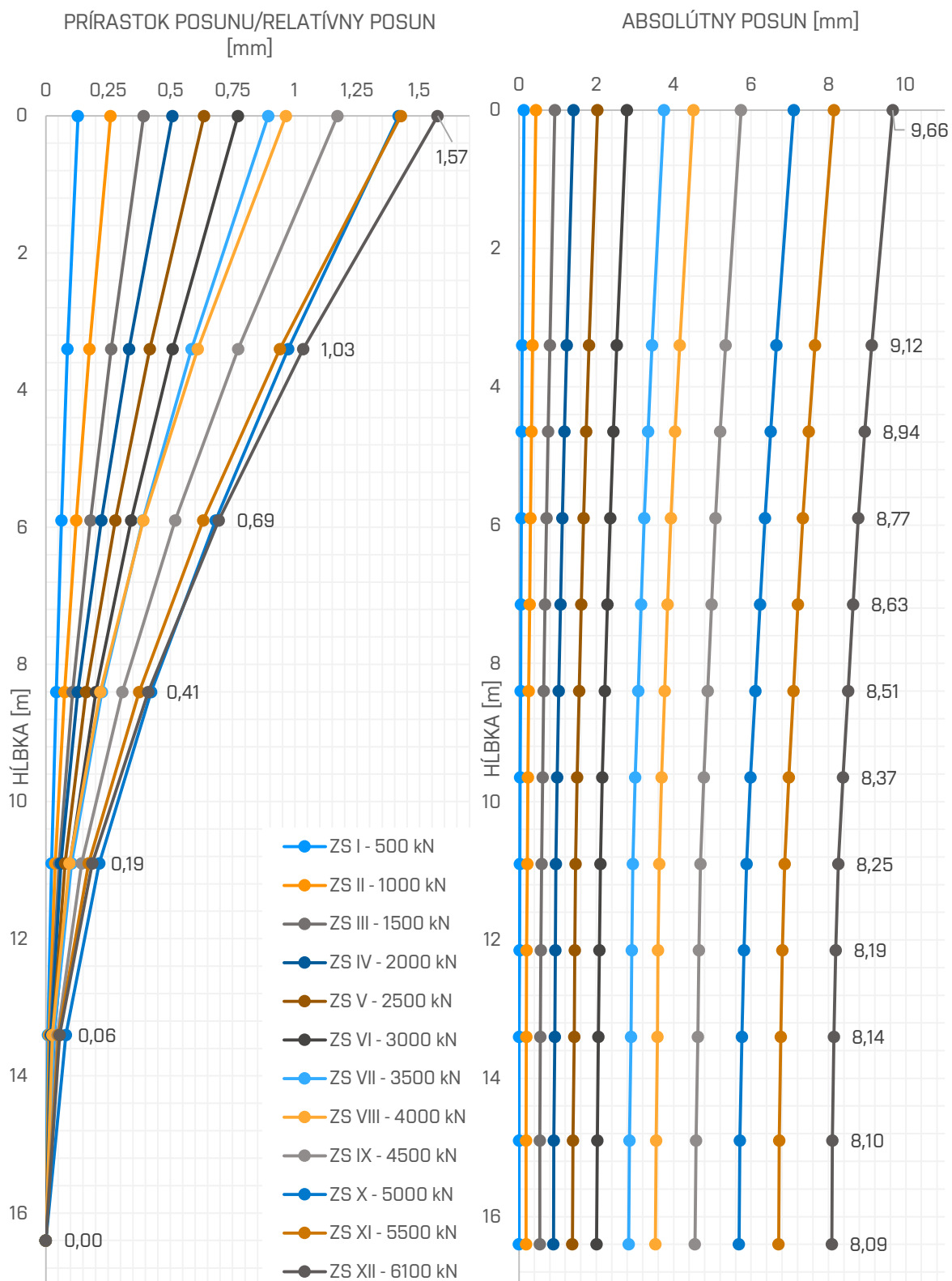
Δu_i prírastok posunu v riešenom priereze

Δu_h prírastok posunu v hlave pilóty v danom zaťažovacom stupni

S priebehom pretvorenia ε po dĺžke pilóty sa vo vyhodnotení priebehu relatívnych a absolútnych posunov s narastajúcou hĺbkou pilóty uvažovalo v dvoch variantoch. Prvý variant uvažuje s konštantným pretvorením segmentu, ktorého hodnota sa rovná pretvoreniu v úrovni (prierezu) hornej hrany segmentu. V druhom variante bola na dopočítaná smernica lineárneho priebehu pretvorenia zo známeho zaťaženia v hlave pilóty pre prvý segment a následne zo známych pretvorení v úrovni hornej hrany segmentu a spodnej hrany segmentu pre každý ďalší segment (s dopočítaným pretvorením uprostred každého segmentu). Pretvorenie pozdĺž pilóty má v teda v tomto variante tvar lineárnej lomenej funkcie. V práci je vždy z oboch variantov umiestnený ten s väčšou vypovedajúcou hodnotou.



Graf č. 3.2 (vľavo): Sily prenesené po dĺžke pilóty do príslušnej hĺbky v jednotlivých zaťažovacích stavoch (Z202); Graf č. 3.3 (vpravo): Priebeh pomerného pretvorenia pozdĺž pilóty (Z202)



Graf č. 3.4 (vľavo): Priebehy prírastku posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z202); Graf č. 3.5 (vpravo): Priebehy absolútnych posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z202)

Zo známých veľkostí síl prenesených každým segmentom (tabuľka č. 3.5) sú vypočítané priebehy plášťových trení q_s po dĺžke pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (rovnica 3.5, tabuľka č. 3.6, graf č. 3.6).

$$q_s = \frac{\Delta F_i}{\pi \cdot d \cdot a} \quad 3.5$$

ΔF_i sila prenesená daným segmentom pilóty

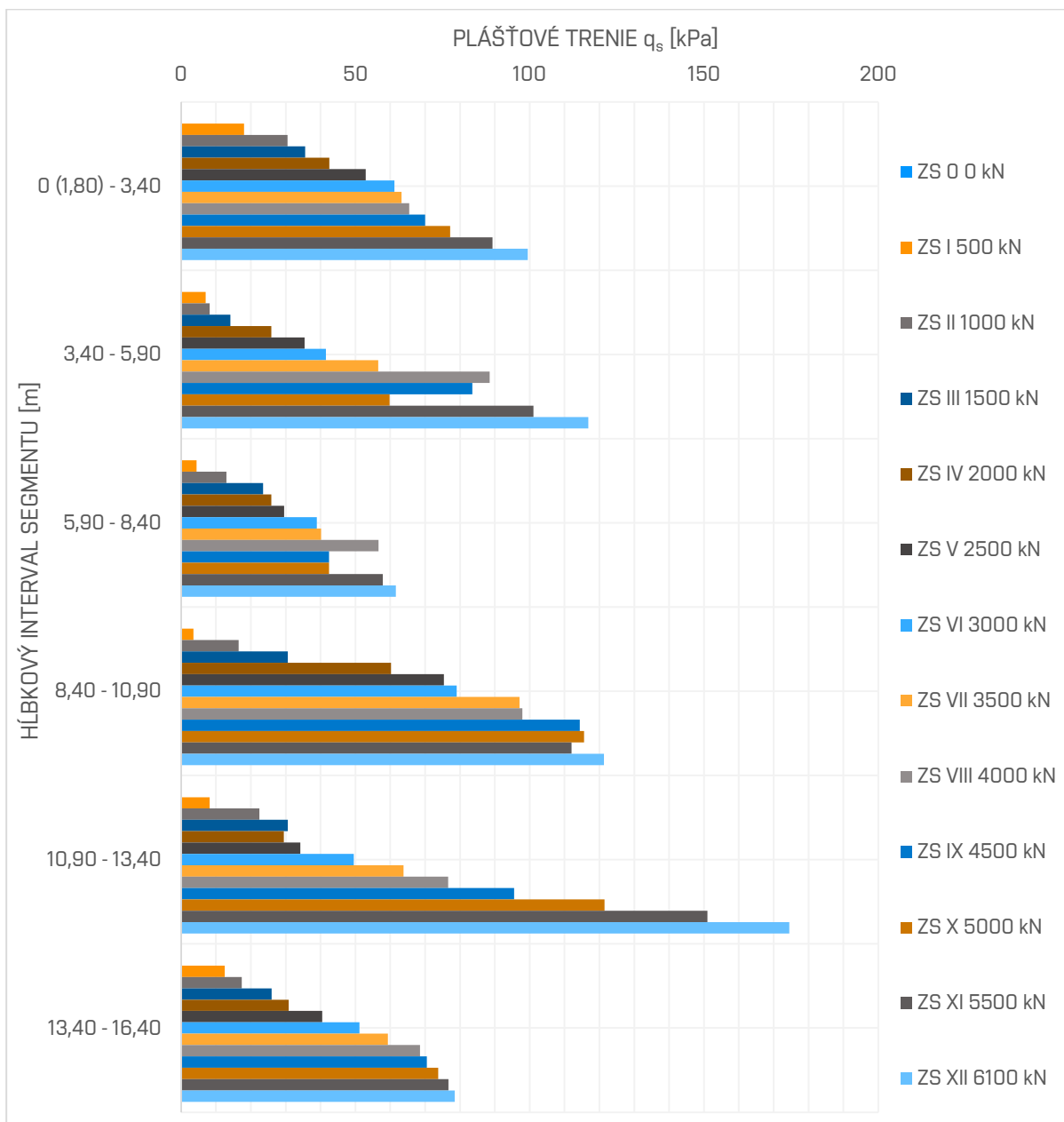
a dĺžka príslušného segmentu pilóty

d priemer pilóty v danom mieste (konštantný po celej výške)

q_s mobilizované plášťové trenie segmentu pilóty

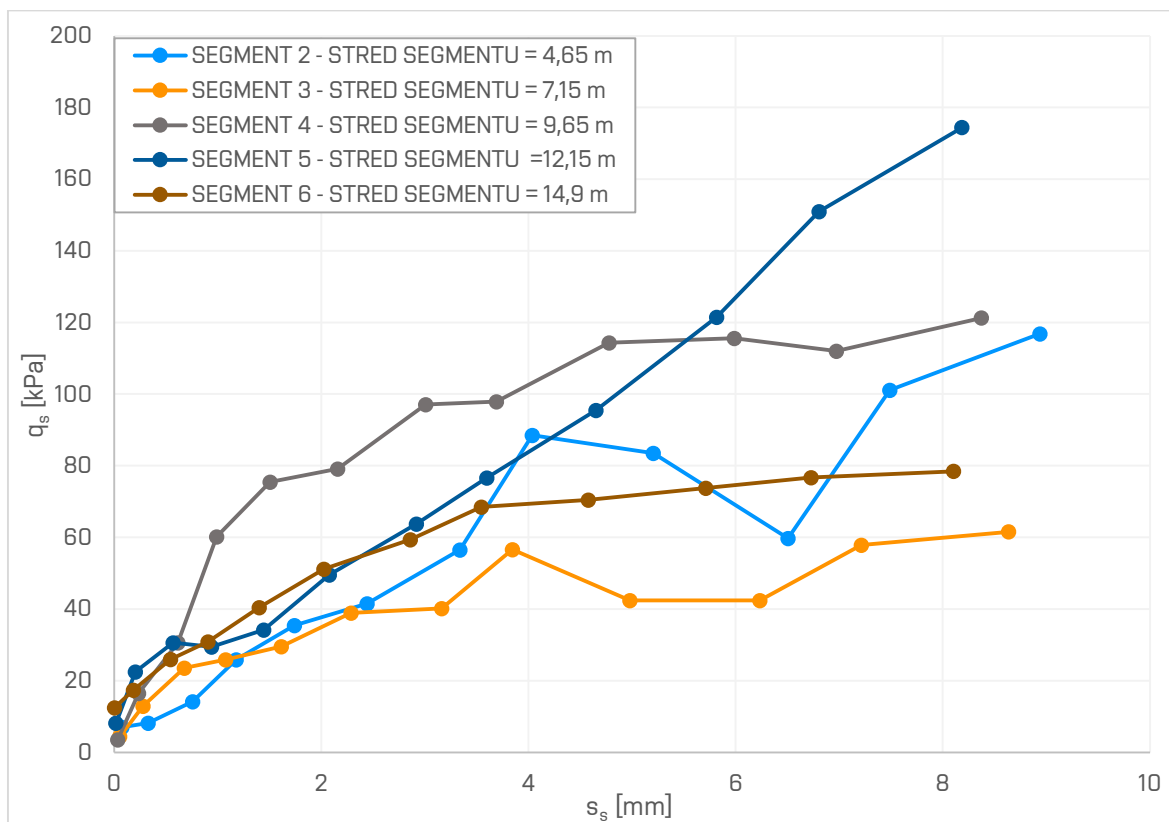
| Hĺbkový interval segmentu [m] | | 0 (1,80) - 3,40 | 3,40 - 5,90 | 5,90 - 8,40 | 8,40 - 10,90 | 10,90 - 13,40 | 13,40 - 16,40 |
|-------------------------------|-----------------|-----------------|-------------|-------------|--------------|---------------|---------------|
| Plášťové trenie q_s [kPa] | ZS 0 kN | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| | ZS I 500 kN | 18,04 | 7,01 | 4,42 | 3,56 | 8,20 | 12,50 |
| | ZS II 1000 kN | 30,52 | 8,20 | 12,95 | 16,51 | 22,44 | 17,35 |
| | ZS III 1500 kN | 35,57 | 14,14 | 23,52 | 30,64 | 30,64 | 25,99 |
| | ZS IV 2000 kN | 42,49 | 25,90 | 25,90 | 60,21 | 29,46 | 30,84 |
| | ZS V 2500 kN | 52,94 | 35,39 | 29,57 | 75,42 | 34,20 | 40,46 |
| | ZS VI 3000 kN | 61,20 | 41,54 | 38,95 | 79,09 | 49,53 | 51,16 |
| | ZS VII 3500 kN | 63,22 | 56,54 | 40,14 | 97,11 | 63,77 | 59,35 |
| | ZS VIII 4000 kN | 65,42 | 88,48 | 56,65 | 97,87 | 76,61 | 68,52 |
| | ZS IX 4500 kN | 69,97 | 83,52 | 42,41 | 114,38 | 95,49 | 70,50 |
| | ZS X 5000 kN | 77,22 | 59,78 | 42,41 | 115,56 | 121,50 | 73,73 |
| | ZS XI 5500 kN | 89,36 | 101,10 | 57,84 | 112,00 | 150,95 | 76,70 |
| ZS XII 6100 kN | 99,47 | 116,86 | 61,61 | 121,28 | 174,48 | 78,50 | |

Tabuľka č. 3.6: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z202)



Graf č. 3.6: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z202)

Zo závislosti trenia plášťa segmentu na posune stredu segmentu boli graficky znázornené prenosové funkcie jednotlivých segmentov (graf č. 3.7, s výnimkou prvého segmentu, kde je z technologických dôvodov osadená PVC fólia):

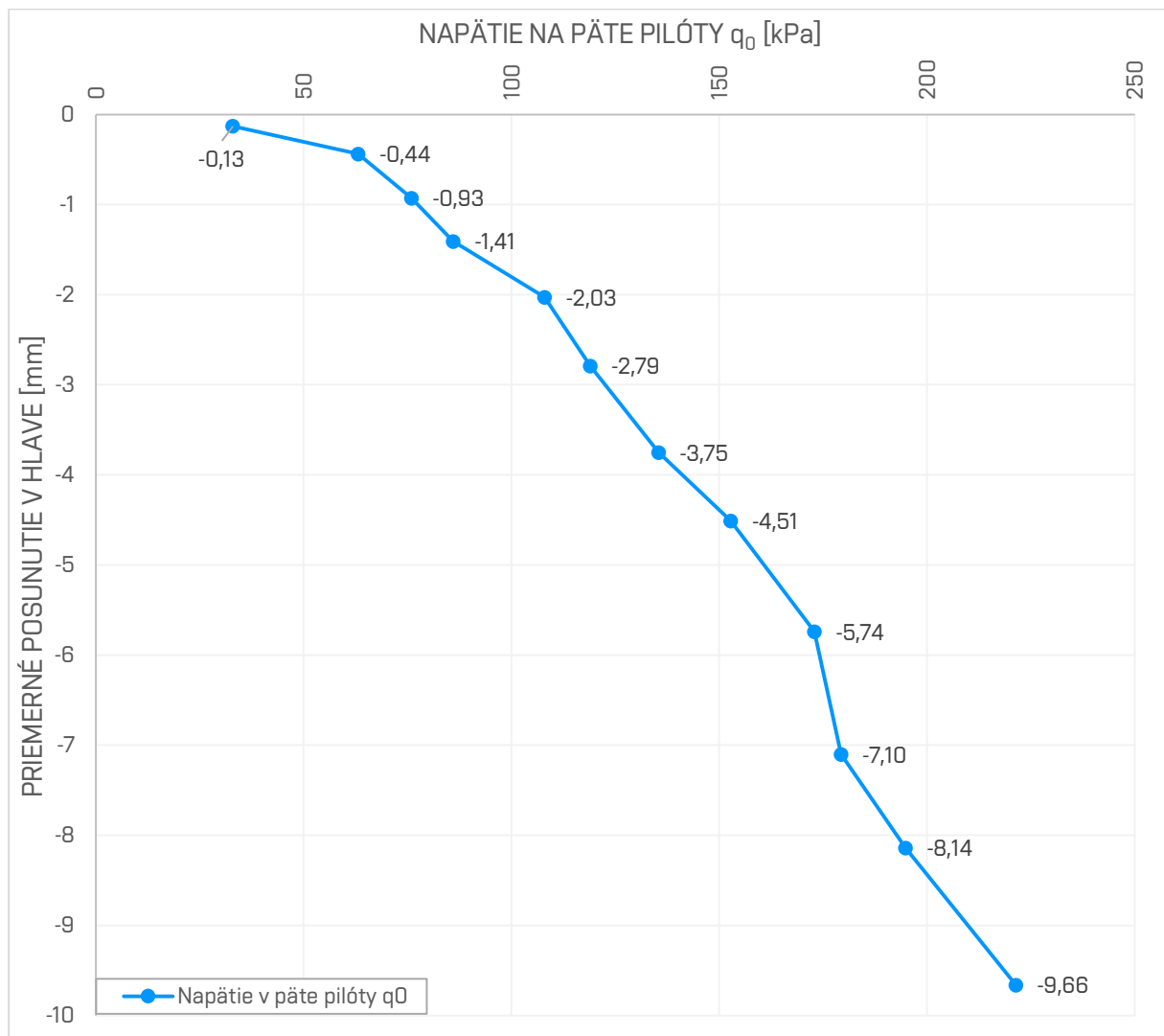


Graf č. 3.7: Prenosové funkcie plášťov jednotlivých segmentov (Z202)

Pre jednotlivé zaťažovacie stavy je možné vyhodnotiť aj priebeh napätia na päte pilóty q_0 (v závislosti na sadaní pilóty, tabuľka č. 3.7, graf č. 3.8). Hodnota výsledného napätia na päte sa získa po odčítaní síl prenesených všetkými segmentami v danom zaťažovacom stave z pôvodnej zaťažovacej sily P .

| Hĺbka päty pilóty [m] | | 16,4 |
|------------------------------------|-----------------|--------|
| Napätie na päte pilóty q_0 [kPa] | ZS 0 kN | 0 |
| | ZS I 500 kN | 32,94 |
| | ZS II 1000 kN | 63,13 |
| | ZS III 1500 kN | 75,94 |
| | ZS IV 2000 kN | 86 |
| | ZS V 2500 kN | 107,96 |
| | ZS VI 3000 kN | 118,94 |
| | ZS VII 3500 kN | 135,41 |
| | ZS VIII 4000 kN | 152,79 |
| | ZS IX 4500 kN | 172,92 |
| | ZS X 5000 kN | 179,32 |
| | ZS XI 5500 kN | 194,88 |
| ZS XII 6100 kN | 221,41 | |

Tabuľka č. 3.7: Napätie na päte pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (Z202)



Graf č. 3.8: Závislosť napätia v päte pilóty na sadaní hlavy pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (Z202)

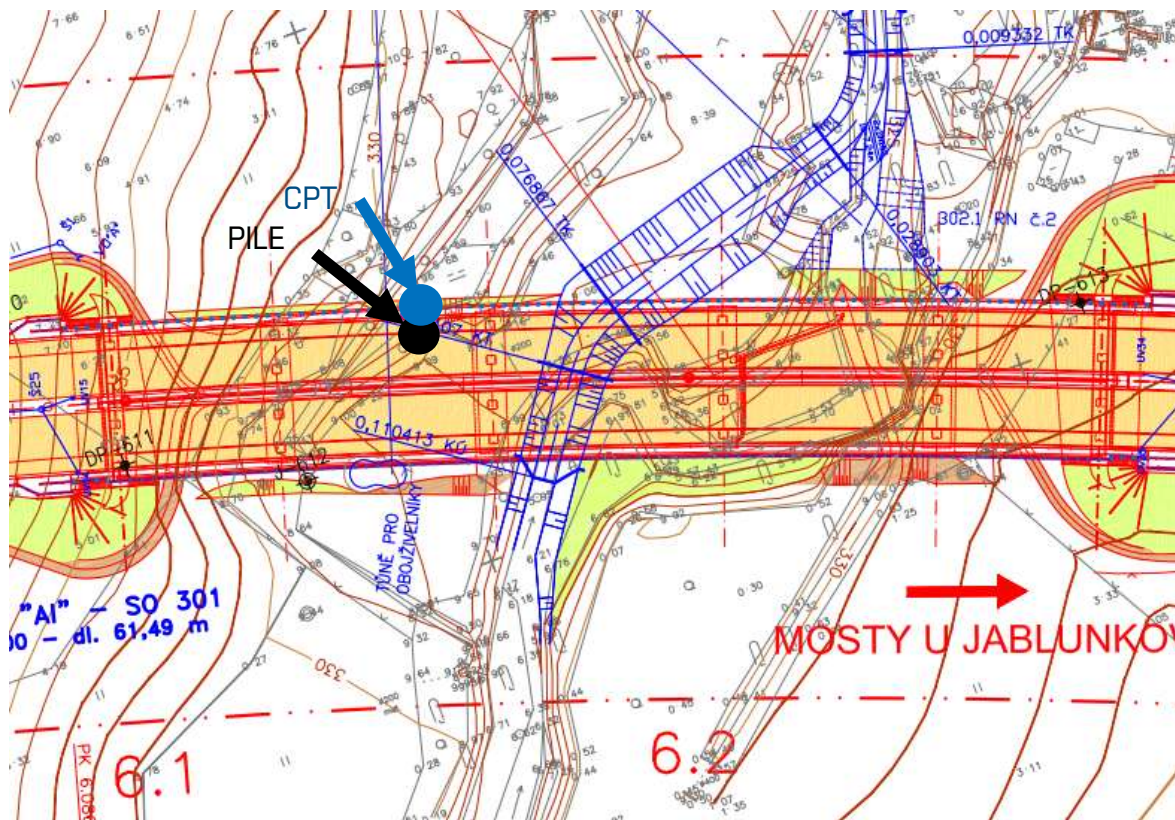
3.2 Statická zaťažovacia skúška mimosystémovej pilóty Z203 (mostný objekt č. SO 203 – Nebory, cesta I. triedy I/11 Nebory - Oldřichovice)

3.2.1 Základné informácie

Dáta boli získané zo správy o vyhodnotení zaťažovacích skúšok na mimosystémových vrtaných pilotách Z203, Z207 a Z210 na mostných objektoch SO 203, SO 207 a SO 210 (*Masopust^[18]*). Tieto objekty sú súčasťou novovybudovaného úseku cesty prvej triedy I/11, konkrétne úseku Nebory – Oldřichovice. Geotechnická interpretácia je tentokrát vykonaná pre pilótu Z203, pri objektoch SO 207 a SO 210 sa CPT skúšky nepodarilo vyhotoviť. Podobne ako v predchádzajúcej lokalite, skúšobné pilóty boli vzhľadom k budúcim systémovým pilótam umiestnené tak, aby nedošlo ku kolízii kotiev statickej zaťažovacej skúšky a budúcich systémových pilót. Pracovná plošina, na ktorej sa daná skúška vykonala, sa nachádzala vo výškovej úrovni 331,3 m. n. m. (v piatom mostnom poli) Bpv. Hlava pilóty nad plošinu vyčnievala 0,40 m (331,7 m. n. m.).

| Parameter pilóty | Z203 |
|--|-----------------------|
| Priemer zapaženej časti pilóty [mm] a jej dĺžka [m] | 880/7,00 |
| Priemer nezapaženej časti pilóty /mm/ a jej dĺžka [m] | 800/17,80 |
| Celková dĺžka pilóty [m] | 25,2 |
| Dĺžka pilóty v zemi [m] | 24,8 |
| Dátum vyhotovenia skúšobnej pilóty | 05.12.2014 |
| Kvalita betónu | C25/30 XA1 |
| Teoretická spotreba betónu [m ³] | 13,61 |
| Skutočná (deklarovaná) spotreba betónu [m ³] | 15,5 |
| Datum vyhotovenia zaťažovacej skúšky | 20.1.2015 - 21.1.2015 |

Tabuľka č. 3.8: Hlavné parametre zaťažovanej pilóty (Z203) (*Masopust^[18]*)



Obrázok č. 3.6: Situácia mostného objektu C203 - cesta I. triedy I/11 Nebory - Oldřichovice

3.2.2 Inžiniersko-geologické podmienky v lokalite

Predkvartérne podložie je budované kriedovými sedimentami charakteru ílovcov, ktoré sú však silno zvetralé do značnej hĺbky. V ich nadloží sa vyskytujú málo mocné sedimenty kvartérne, tvorené jednak vrstvou piesčitých štrkov, ktoré sú zväčša zvodnelé, tak aj vrstvou ílovitých hlín piesčitých pri povrchu terénu. Podzemná voda, vyskytujúca sa v kvartérnej štrkovej zvodni, vykazuje nízku až strednú agresivitu XA1, eventuálne aj XA2 na betónové konštrukcie. Nové sondovanie pomocou jadrových vrtov a dynamickej penetrácie potvrdilo predpokladané pomery na stavenisku, charakterizovanom mocným súvrstvom kriedových poloskalných hornín triedy R5/R6 s povrchovou vrstvou úplne rozpadnutých ílovcov charakteru zemín pevnej konzistencie a málo mocným nadložím kvartérnych zemín.

Geologický profil zistený v konkrétnom mieste vrtanej pilóty Z203 z protokolu o vyhotovení vrtanej pilóty (tabuľka č. 3.9, voľný popis):

| Geologický profil v mieste skúšanej pilóty (objekt Z203) | |
|--|------------------------------------|
| Hĺbka [m] | Typ zeminy |
| 0,0 - 0,50 | ŠTRK (spevnenie pracovnej plošiny) |
| 0,50 - 3,00 | ÍL piesčitý (tuhý) |
| 3,00 - 4,50 | ŠTRK piesčitý (uľahlý, zvodnelý) |
| 4,50 - 24,80 | ÍLOVEC/PRACHOVEC, zvetralý |

Tabuľka č. 3.9: Geologický profil v mieste skúšanej pilóty Z203 (*Masopust*^[18])

Skutočný geologický profil aj v tomto prípade súhlasí s vyššie uvedenými projektovými predpokladmi.

3.2.3 Charakteristika pilóty a zaťažovacej skúšky

Pre zaťažovaciu skúšku bol rovnako ako pre pilótu Z202 vybudovaný skúšobný most, ktorý bol kotvený šiestimi zemnými predpätými pramencovými kotvami (6x Lp 15,7 mm/1570/1770 MPa), tie sú rozmiestnené po obvode kruhu s priemerom 6340 mm - 3 kotvy pôdorysne po 30° a ďalšie 3 symetricky oproti nim. Kotvenie bolo priamo nadimenzované na uvažovanú zaťažovaciu skúšku s maximálnym zaťažením $P = 6,5 - 7,0$ MN.

Dĺžka kotiev:

14,0 m – voľná dĺžka v zemi

12,0 m – dĺžka koreňa kotvy

26,0 m – celková dĺžka vrtu

Aj v tomto prípade pre podrobné stanovenie priebehu síl pozdĺž pilóty a medzného plášťového trenia v jednotlivých vrstvách zemín a hornín boli skúšobné pilóty osadené pomocou strunových tenzometrov (opäť Geokon, model 4200, v každom priereze boli dva strunové tenzometre, naviazané na betonársku výstuž). Pre pilótu Z203 sú tenzometre osadené v úrovniach:

- 1. prierez v hĺbke 0,50 m pod terénom
- 2. prierez v hĺbke 3,10 m pod terénom
- 3. prierez v hĺbke 13,90 m pod terénom
- 4. prierez v hĺbke 24,70 m pod terénom

Vo vrchnej časti pilóty je umiestnená plášťová separácia z PVC fólie na výšku 1,80 m.

Zaťažovacia skúška prebiehala v zaťažovacích a odľahčovacích stupňoch uvedených v tabuľke č. 3.10. Pri jednotlivých stupňoch je uvedené aj príslušné posunutie v hlave.

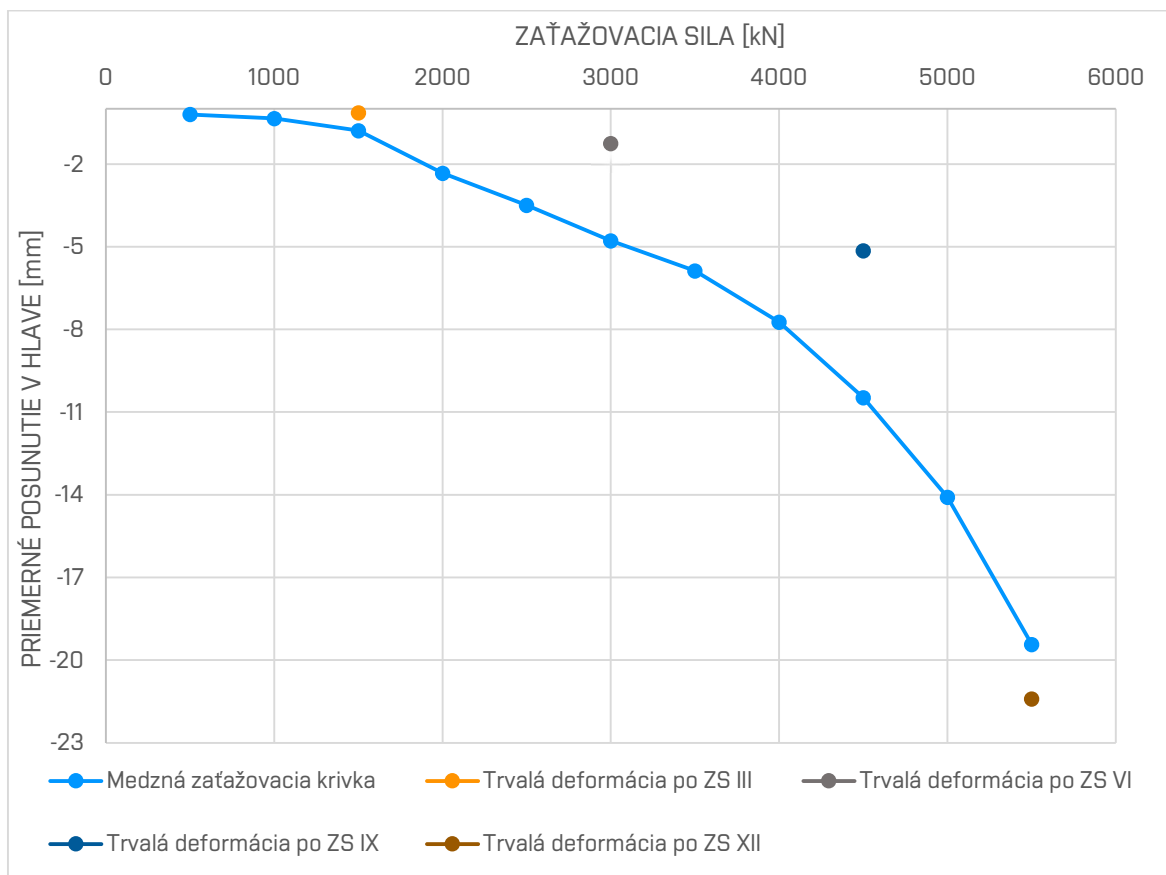
| Zaťažovací stupeň | Odľahčenie [kN] | Zaťaženie P [kN] | Priemerné zatlačenie - s [mm] |
|--------------------|--------------------|-----------------------|------------------------------------|
| Odľahčovací stupeň | | | |
| I | | 500 | -0,20 |
| II | | 1000 | -0,35 |
| III | | 1500 | -0,79 |
| I | 0,00 | | -0,14 |
| IV | | 2000 | -2,33 |
| V | | 2500 | -3,49 |
| VI | | 3000 | -4,79 |
| II | 0,00 | | -1,25 |
| VII | | 3500 | -5,88 |
| VIII | | 4000 | -7,73 |
| IX | | 4500 | -10,47 |
| III | 0,00 | | -5,15 |
| X | | 5000 | -14,09 |
| XI | | 5500 | -19,43 |
| XII | | 6000 | >-30 |
| IV | 0,00 | | -21,40 |

Tabuľka č. 3.10: Priebeh zaťažovacej skúšky a namerané hodnoty posunutia v hlave
 (Z203) (*Masopust*^[18])

3.2.4 Interpretácia výsledkov zaťažovacej skúšky

Statická zaťažovacia skúška pilóty Z203 prebehla podľa projektu, pri skúške nebolo dosiahnuté medzné zaťaženie (rovnajúce sa 10% priemeru päty pilóty) a pri pokuse o stanovenie zaťaženia smerného (odpovedajúce sadaniu hlavy 25 mm) sa deformácia pilóty pri zaťažovacom stupni 6,0 MN neustálila.

Grafické znázornenie medznej zaťažovacej krivky pilóty je uvedené nižšie (graf č. 3.9). Po štyroch odľahčovacích stavoch boli získané štyri hodnoty trvalej deformácie pilóty po odľahčení.



Graf č. 3.9: Medzná zaťažovacia krivka pilóty Z203 pri mostnom objekte C203

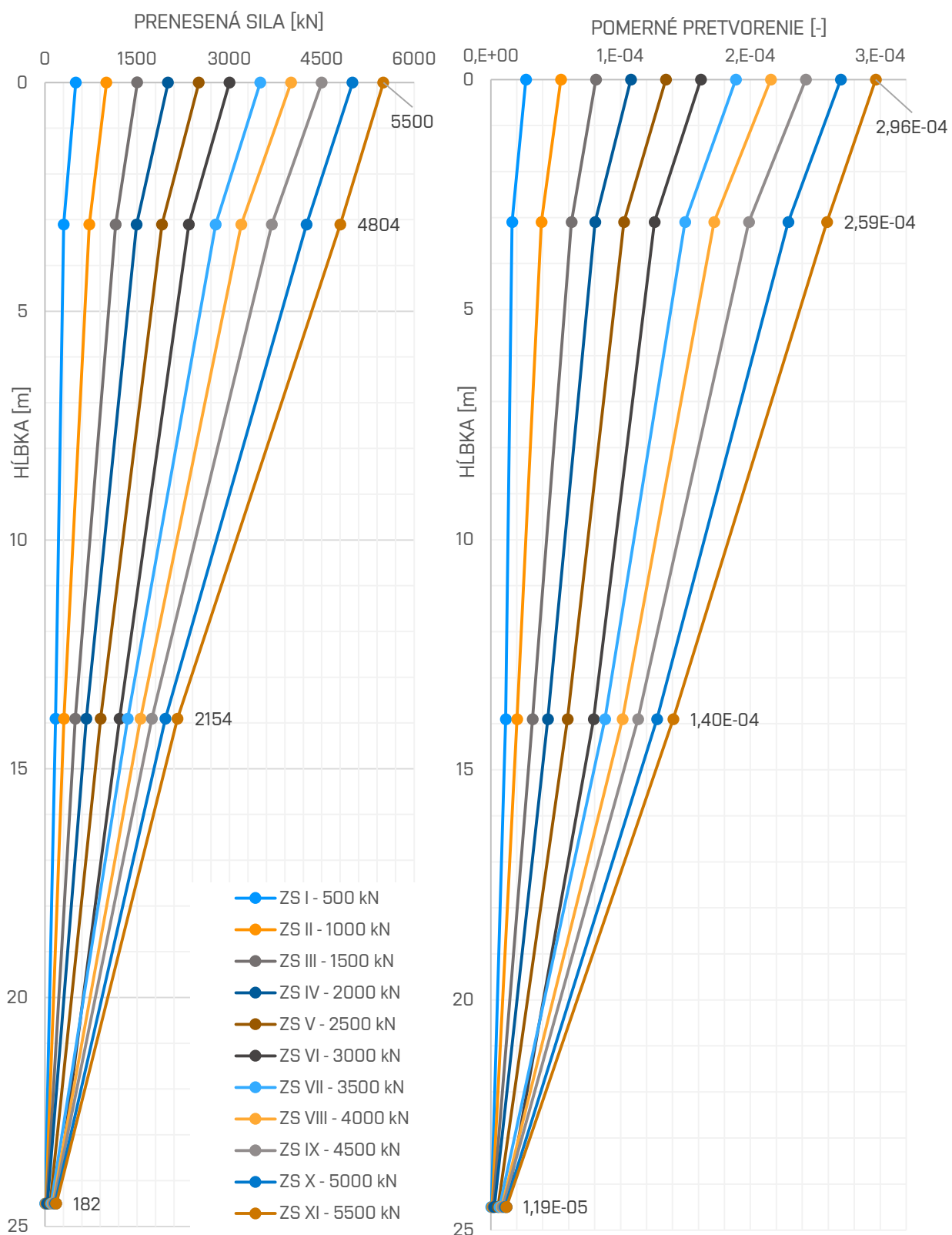
Postup geotechnickej interpretácie statickej zaťažovacej skúšky pilóty Z203 prebehol identickým spôsobom ako v prípade pilóty Z202. Z nameraného pretvorenia na základe osovej tuhosti pilóty (v tomto prípade nebola tuhosť konštantná po celej výške pilóty – vid'. tabuľka č. 3.8) bol stanovený priebeh síl v závislosti na hĺbke (rovnica č. 3.1, tabuľka č. 3.4). Potom prebehol výpočet síl, ktoré jednotlivé segmenty prenášajú (rovnica č. 3.2, tabuľka č. 3.12). Z deformácií sa stanovili prírastky posunov Δu_i v jednotlivých prierezoch (rovnica č. 3.3, graf č. 3.12) a z nich priebehy absolútnych posunov v závislosti na hĺbke (rovnica č. 3.4, graf č. 3.13). Zo síl prenesených segmentami v určitých zaťažovacích stavoch boli zistené plášťové trenia (rovnica č. 3.5, tabuľka č. 3.13, graf č. 3.14). Aj v prípade pilóty Z203 je súčasťou interpretácie vykreslenie prenosových funkcií (graf č. 3.15) a vyhodnotenie napätia na päte pilóty (tabuľka č. 3.14, graf č. 3.16).

| Hĺbka pilóty [m] | 0,00 | 3,1 | 13,9 | 24,5 |
|-----------------------------|------|------|------|------|
| Prenesená sila ZS I [kN] | 500 | 304 | 175 | 5 |
| Prenesená sila ZS II [kN] | 1000 | 722 | 308 | 15 |
| Prenesená sila ZS III [kN] | 1500 | 1152 | 492 | 26 |
| Prenesená sila ZS IV [kN] | 2000 | 1490 | 673 | 39 |
| Prenesená sila ZS V [kN] | 2500 | 1902 | 906 | 83 |
| Prenesená sila ZS VI [kN] | 3000 | 2338 | 1214 | 183 |
| Prenesená sila ZS VII [kN] | 3500 | 2776 | 1347 | 100 |
| Prenesená sila ZS VIII [kN] | 4000 | 3192 | 1556 | 127 |
| Prenesená sila ZS IX [kN] | 4500 | 3688 | 1737 | 138 |
| Prenesená sila ZS X [kN] | 5000 | 4252 | 1961 | 164 |
| Prenesená sila ZS XI [kN] | 5500 | 4804 | 2154 | 182 |

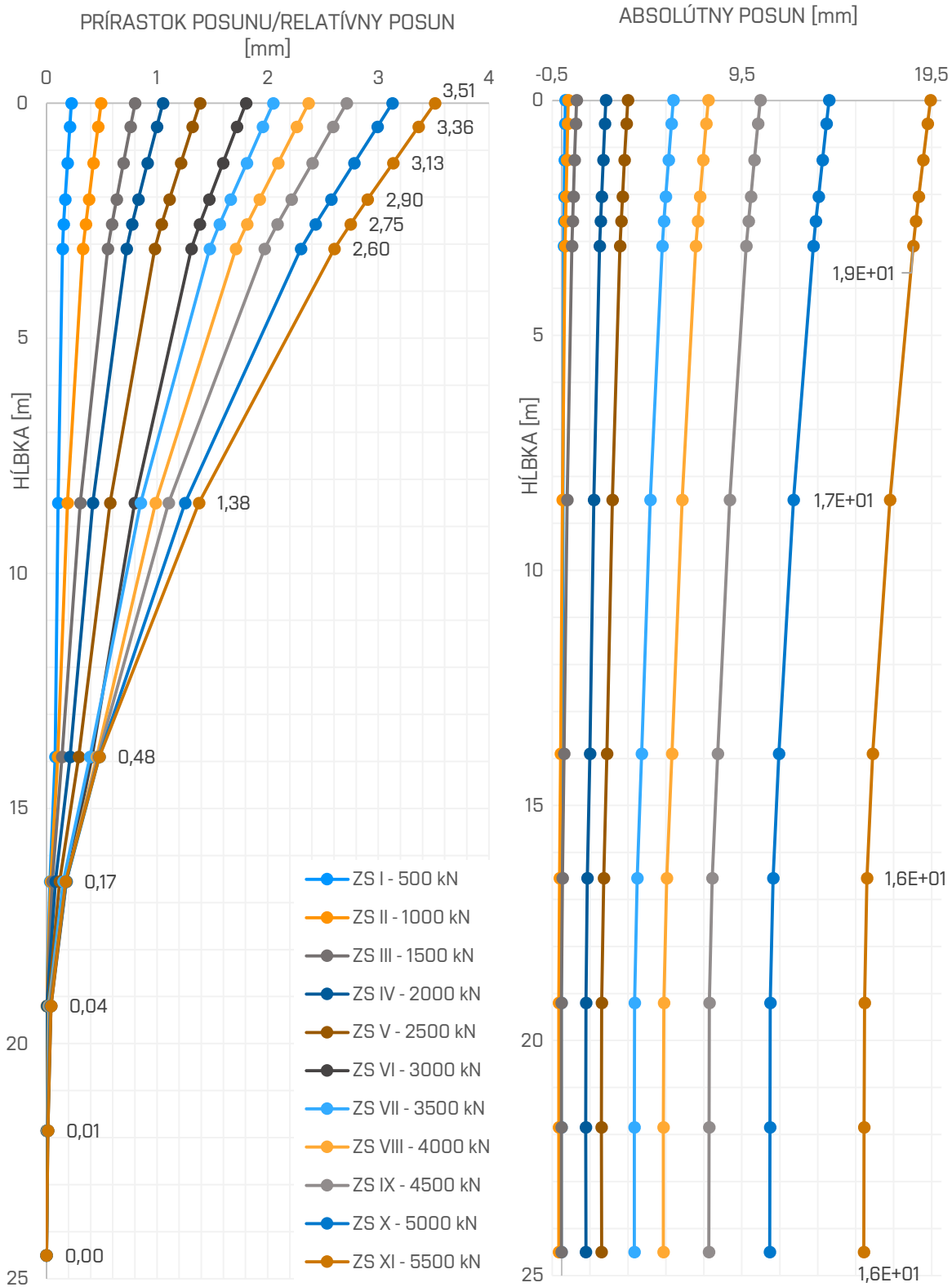
Tabuľka č. 3.11: Sily prenesené pilótou do daných hĺbok (Z203)

| Hĺbkový interval segmentu [m] | | 0,0 - 3,1 | 3,1 - 13,9 | 13,9 - 24,5 |
|------------------------------------|------------|-----------|------------|-------------|
| Dĺžka príslušného segmentu (a) [m] | | 3,1 | 10,8 | 10,6 |
| ΔF ZS I [kN] | ZS 500 kN | 196 | 129 | 170 |
| ΔF ZS II [kN] | ZS 1000 kN | 278 | 414 | 293 |
| ΔF ZS III [kN] | ZS 1500 kN | 348 | 660 | 466 |
| ΔF ZS IV [kN] | ZS 2000 kN | 510 | 817 | 634 |
| ΔF ZS V [kN] | ZS 2500 kN | 598 | 996 | 823 |
| ΔF ZS VI [kN] | ZS 3000 kN | 662 | 1124 | 1031 |
| ΔF ZS VII [kN] | ZS 3500 kN | 724 | 1429 | 1247 |
| ΔF ZS VIII [kN] | ZS 4000 kN | 808 | 1636 | 1429 |
| ΔF ZS IX [kN] | ZS 4500 kN | 812 | 1951 | 1599 |
| ΔF ZS X [kN] | ZS 5000 kN | 748 | 2291 | 1797 |
| ΔF ZS XI [kN] | ZS 5500 kN | 696 | 2650 | 1972 |

Tabuľka č. 3.12: Sily prenesené jednotlivými segmentami pilóty (Z203)



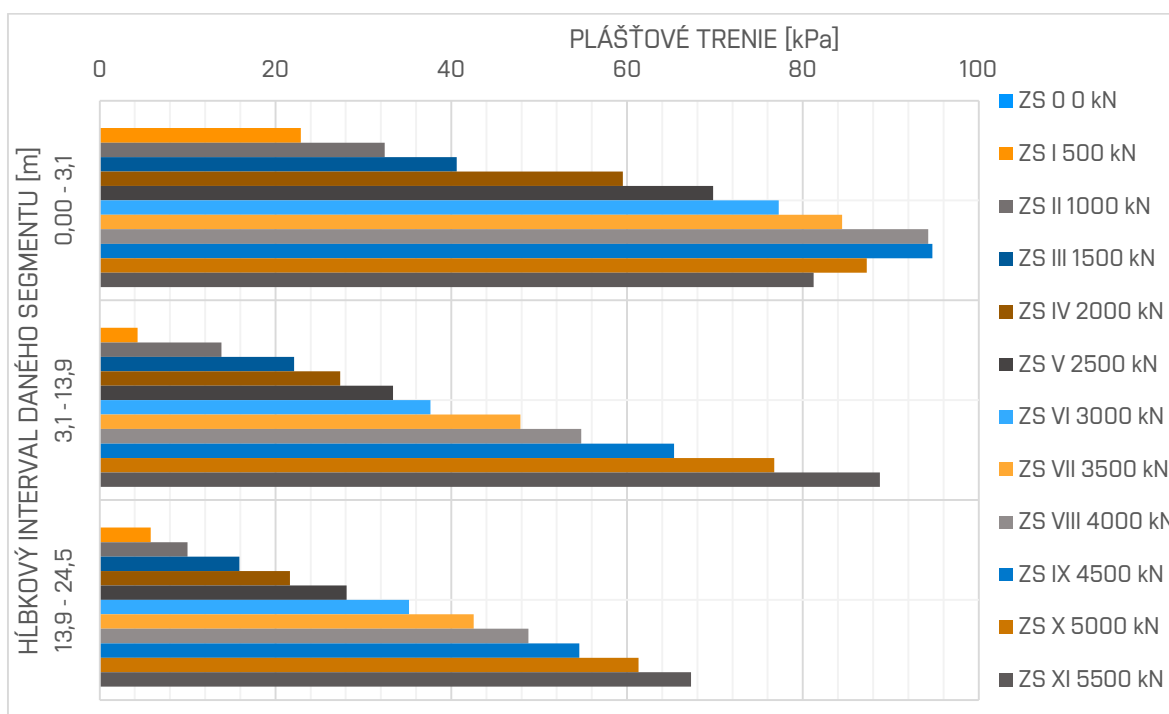
Graf č. 3.10 (vľavo): Sily prenesené po dĺžke pilóty do príslušnej hĺbky v jednotlivých zaťažovacích stavoch (Z203); Graf č. 3.11 (vpravo): Priebeh pomerného pretvorenia pozdĺž pilóty (Z203)



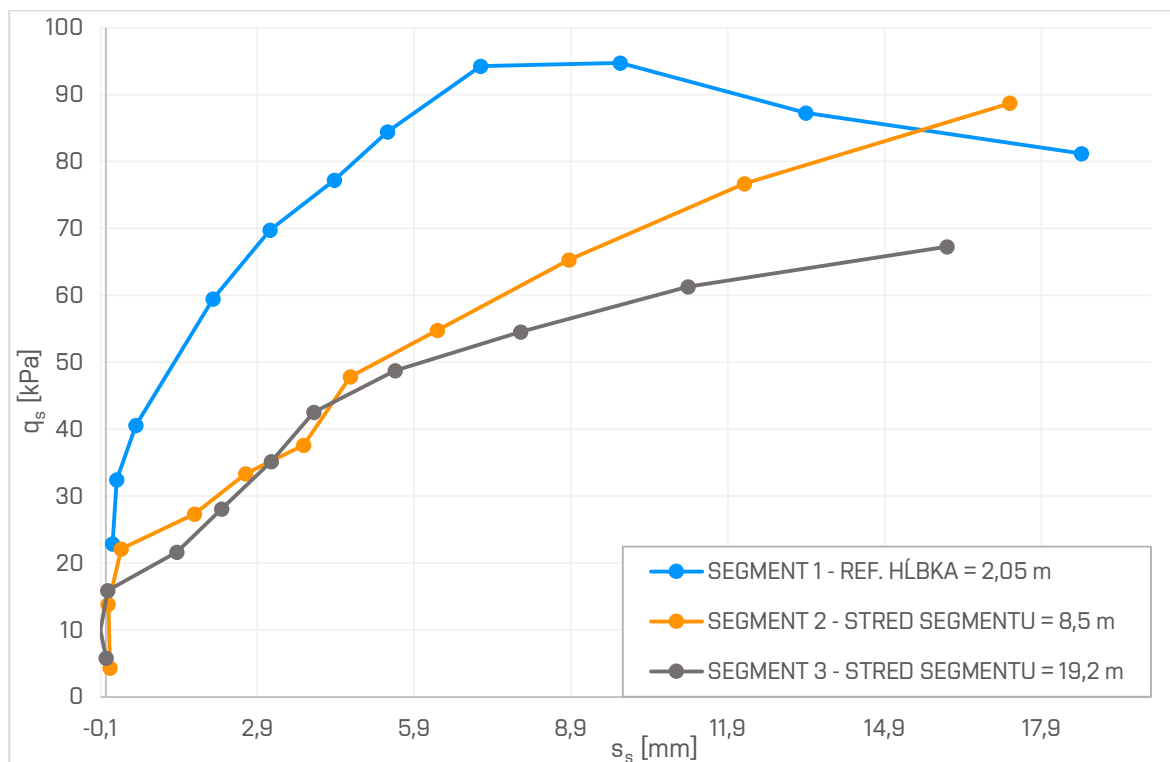
Graf č. 3.12 (vľavo): Priebehy prírastku posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z203); Graf č. 3.13 (vpravo): Priebehy absolútnych posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z203)

| Hĺbkový interval [m] | 0,00 - 3,1 | 3,1 - 13,9 | 13,9 - 24,5 | |
|-----------------------------|-----------------|------------|-------------|-------|
| Plášťové trenie q_s [kPa] | ZS 0 kN | 0 | 0 | 0 |
| | ZS I 500 kN | 22,87 | 4,32 | 5,80 |
| | ZS II 1000 kN | 32,44 | 13,87 | 10,00 |
| | ZS III 1500 kN | 40,61 | 22,10 | 15,90 |
| | ZS IV 2000 kN | 59,51 | 27,36 | 21,63 |
| | ZS V 2500 kN | 69,78 | 33,36 | 28,08 |
| | ZS VI 3000 kN | 77,24 | 37,65 | 35,18 |
| | ZS VII 3500 kN | 84,48 | 47,86 | 42,55 |
| | ZS VIII 4000 kN | 94,28 | 54,79 | 48,76 |
| | ZS IX 4500 kN | 94,75 | 65,34 | 54,56 |
| | ZS X 5000 kN | 87,28 | 76,73 | 61,32 |
| | ZS XI 5500 kN | 81,21 | 88,75 | 67,29 |
| ZS XII 6100 kN | - | - | - | |

Tabuľka č. 3.13: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z203)



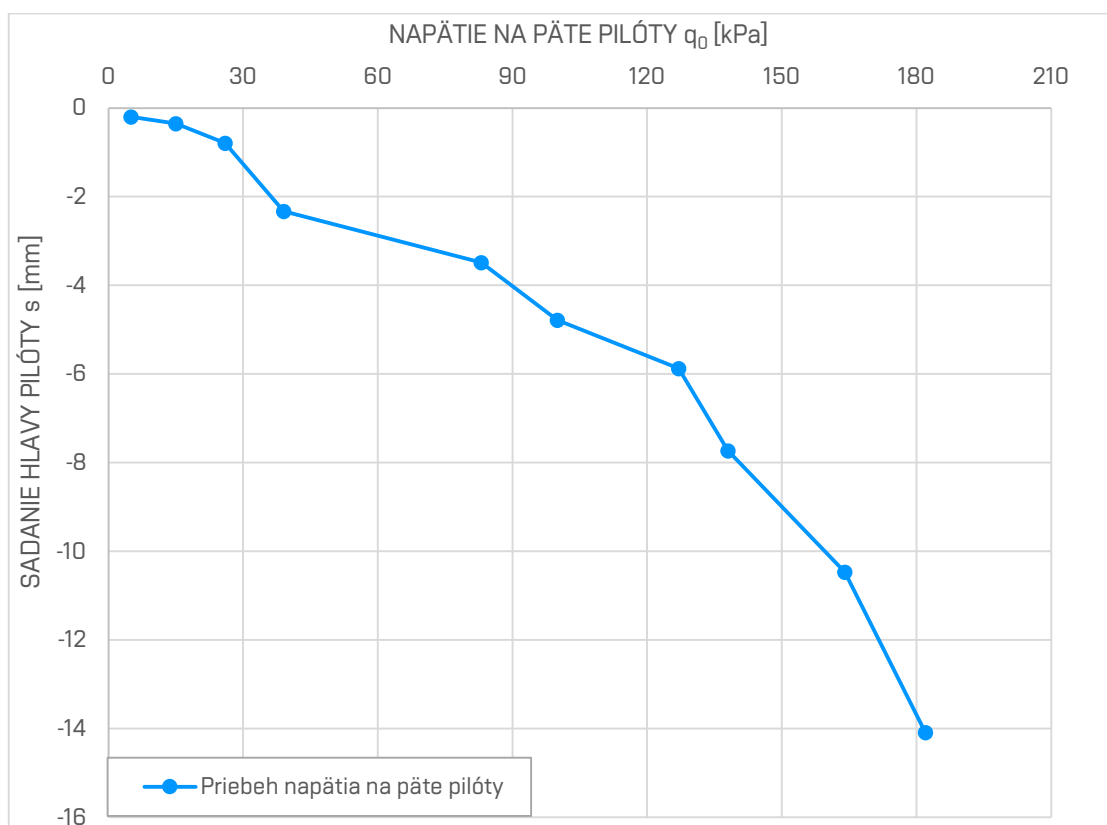
Graf č. 3.14: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z203)



Graf č. 3.15: Prenosové funkcie plášťov jednotlivých segmentov (Z203)

| Hĺbková úroveň päty [m] | | 24,5 |
|------------------------------------|-----------------|------|
| Napätie na päte pilóty q_0 [kPa] | ZS 0 kN | 0 |
| | ZS I 500 kN | 5 |
| | ZS II 1000 kN | 15 |
| | ZS III 1500 kN | 26 |
| | ZS IV 2000 kN | 39 |
| | ZS V 2500 kN | 83 |
| | ZS VI 3000 kN | 91 |
| | ZS VII 3500 kN | 100 |
| | ZS VIII 4000 kN | 127 |
| | ZS IX 4500 kN | 138 |
| | ZS X 5000 kN | 164 |
| | ZS XI 5500 kN | 182 |
| ZS XII 6100 kN | - | |

Tabuľka č. 3.14: Napätie v päte pilóty pre dané zaťažovacie stavy (Z203)



Graf č. 3.16: Závislosť napätia na päte pílóty na sadaní hlavy pílóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (Z203)

4 INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV CPT SKÚŠOK

4.1 Interpretácia CPT pri skúšobnej zaťažovacej pilóte Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat

V bezprostrednej blízkosti skúšobnej pilóty bola úspešne vykonaná skúška CPTu (obrázok č. 4.1, s meraním pórového tlaku u). Počítač prístroja Pagani TG63-150 zaznamenával hodnoty namerané elektrickým hrotom v intervale 10 mm. Súprave sa podarilo dosiahnuť hĺbku 10,20 m, hĺbka teda nie je dostatočná pre vyhodnotenie (medznej) únosnosti päty pilóty. Hladina podzemnej vody bola nameraná v hĺbke 2,8 m.



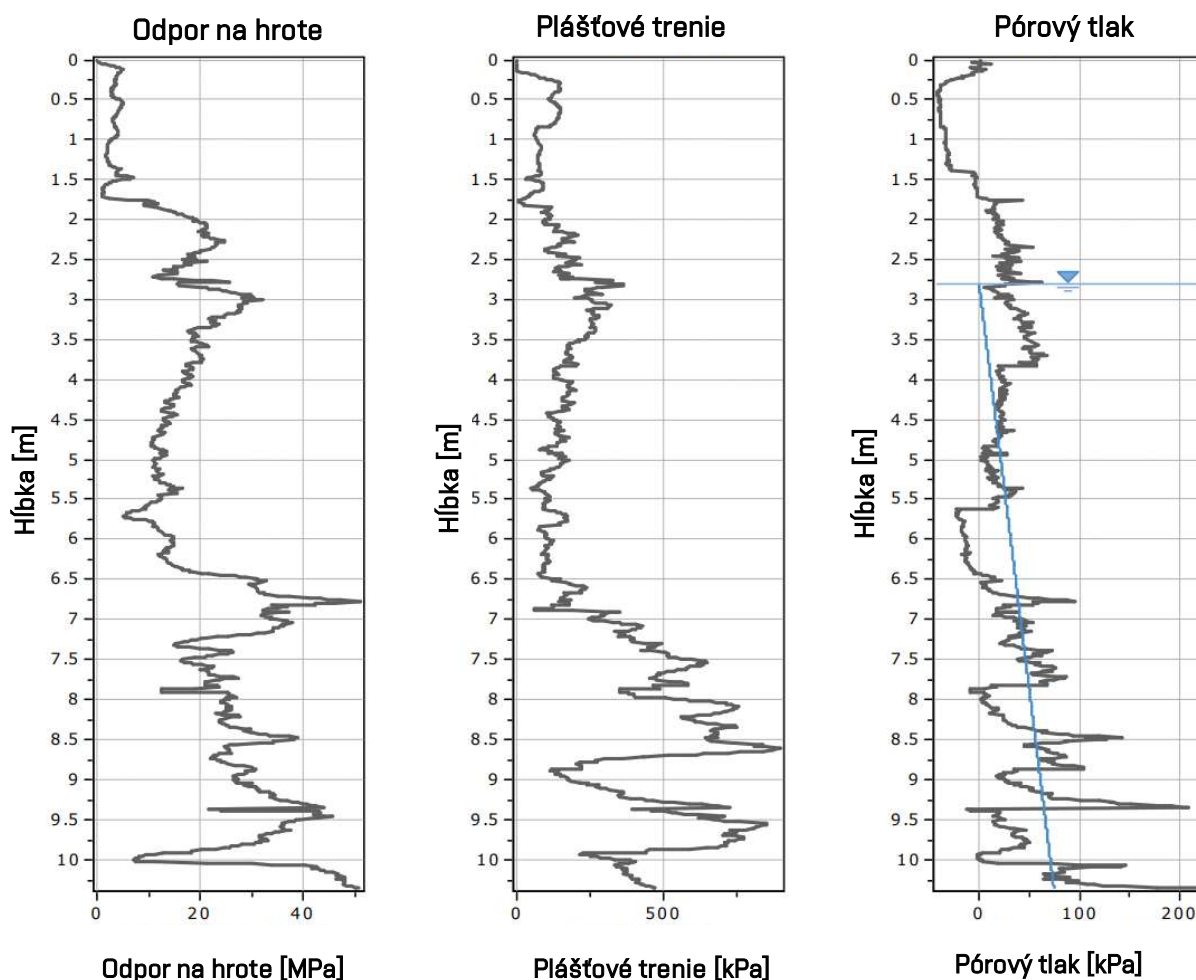
Obrázok č. 4.1: Prebiehajúca skúška CPT pri mostnom objekte C202

Vyhodnotenie získaných dát prebehlo dvomi spôsobmi:

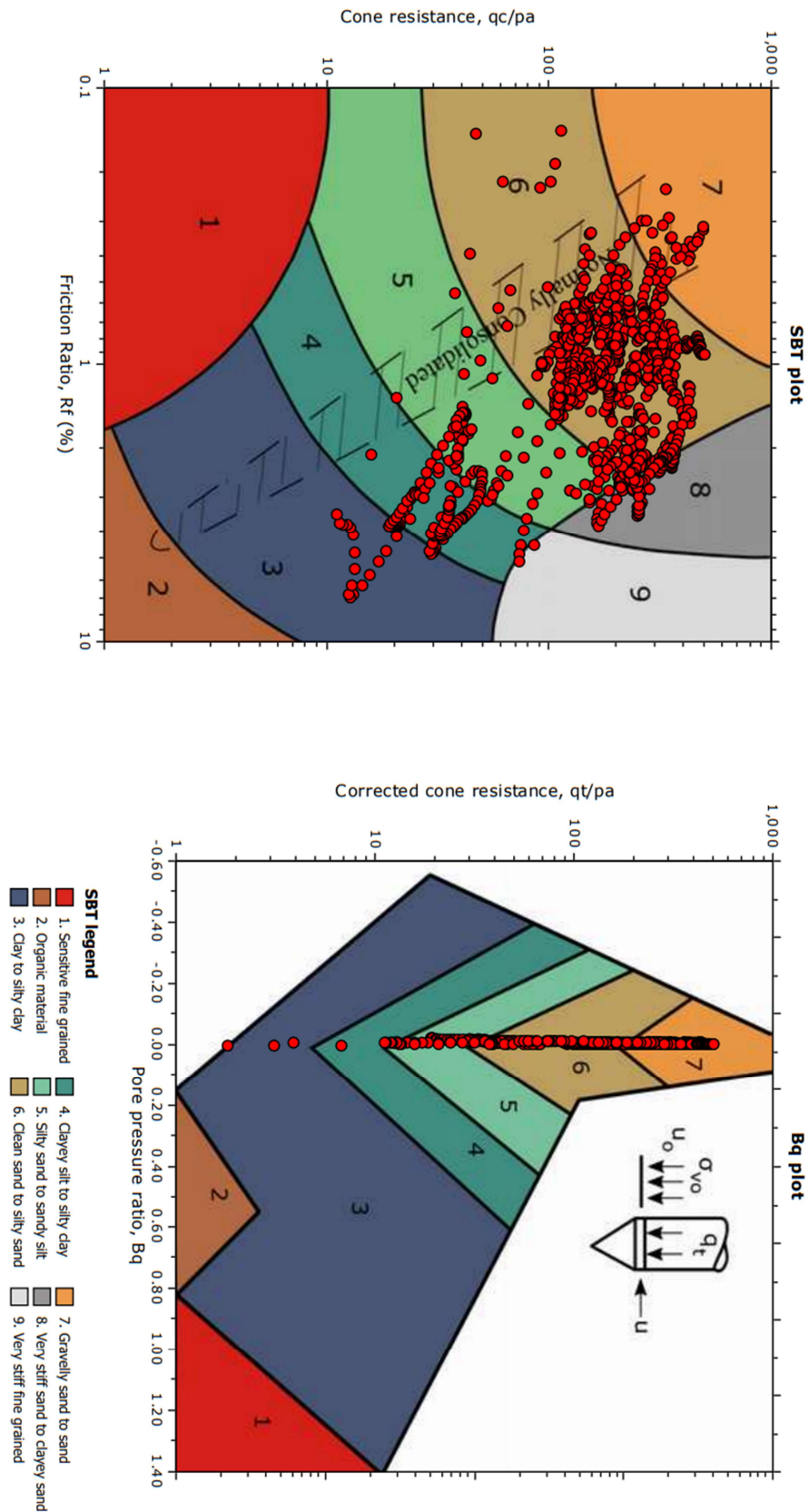
- 1) Bol použitý softvér **CPeT-IT** od spoločnosti *Geolgismikl*^[W5]
- 2) V programe **MS Excel** za použitia vzťahov a korelácií uvedených v publikácii: *Interpretation of cone penetration tests – A unified approach* (P. K. Robertson)^{[10][W6]} so zohľadnením noriem ČSN EN ISO 22476-1^[N5], ČSN EN ISO 14688-1^[N2], ČSN 73 6133^[N4], ČSN 75 2410^[N1], ČSN P 73 1005^[N3]

Oba vyššie uvedené varianty pracujú s rovnakou metodikou vyhodnotenia podľa *Robertsona*^[10] (CPeT-IT naviac aj so *Schneiderovou*^[W5] metódou). V nasledujúcej časti sú uvedené fragmenty vyhodnotení, potrebné pre ďalší postup. Všetky protokoly z vyhodnotení v plnom rozsahu je možné nájsť v prílohách (príloha č. 4.1.1, 4.1.2, 4.1.3).

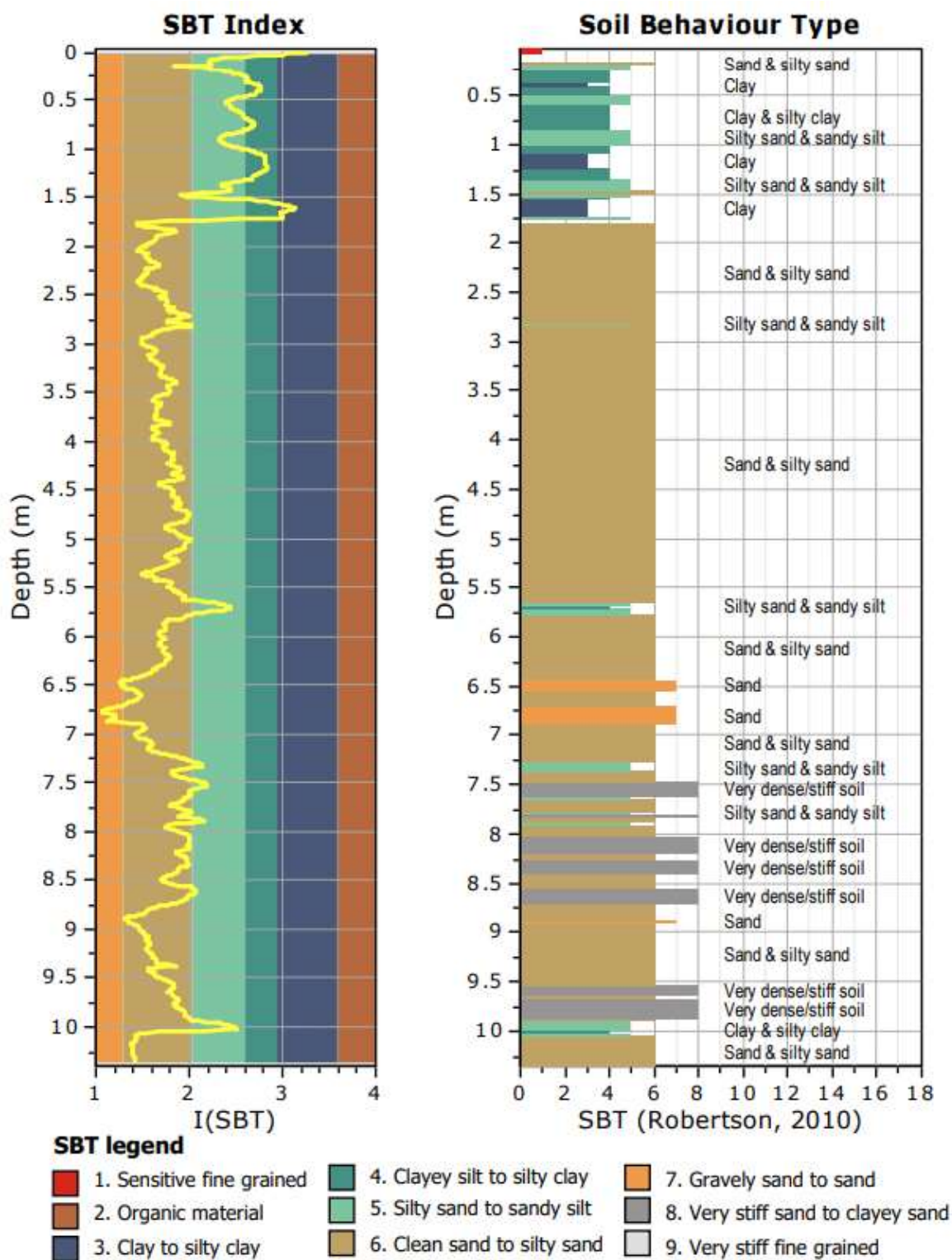
4.1.1 CPeT-IT



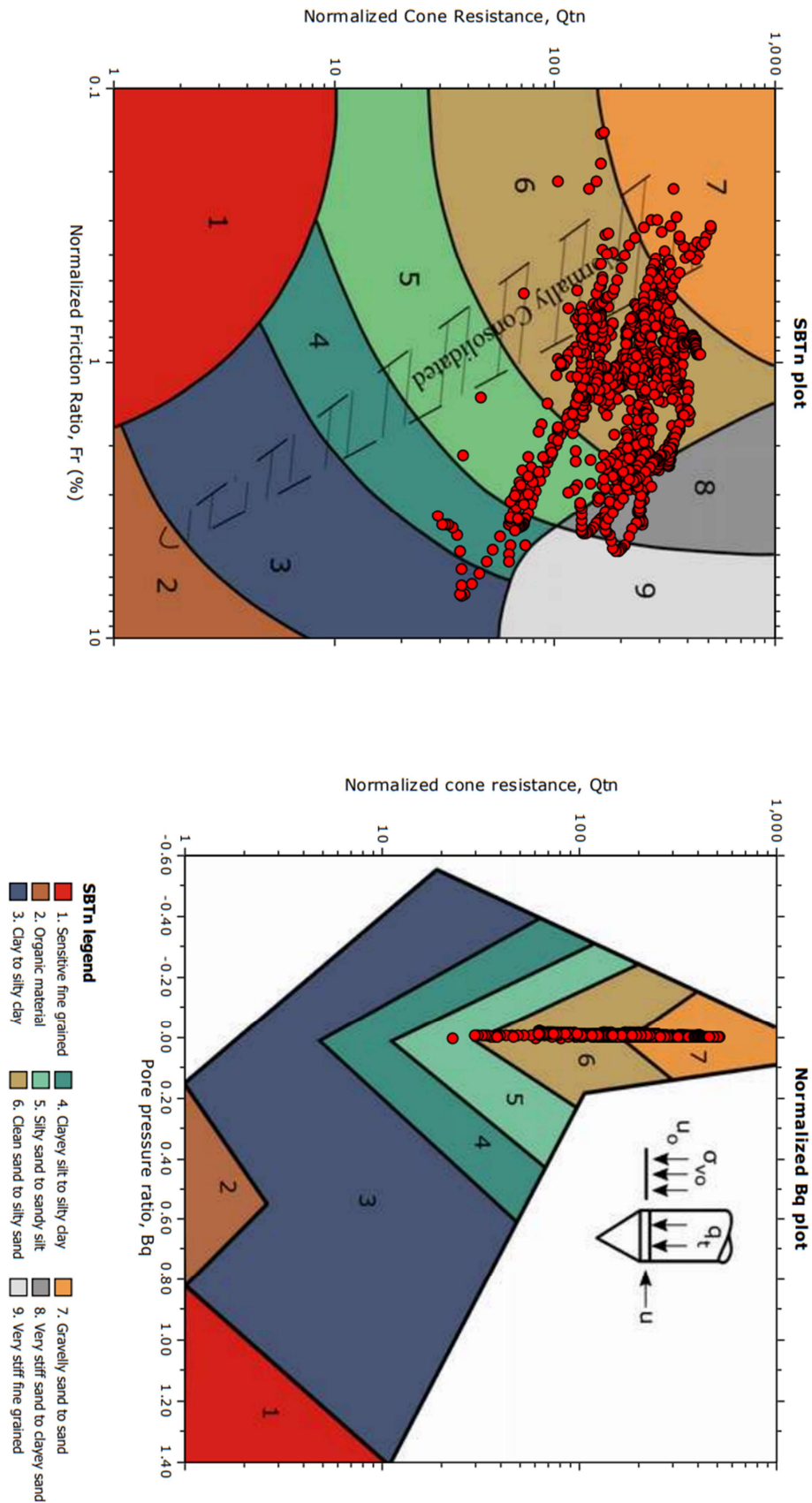
Graf č. 4.1: Grafické zobrazenie nameraného odporu na hrote, plášťového trenia a pórového tlaku (pilóta Z202, mostný objekt C202)



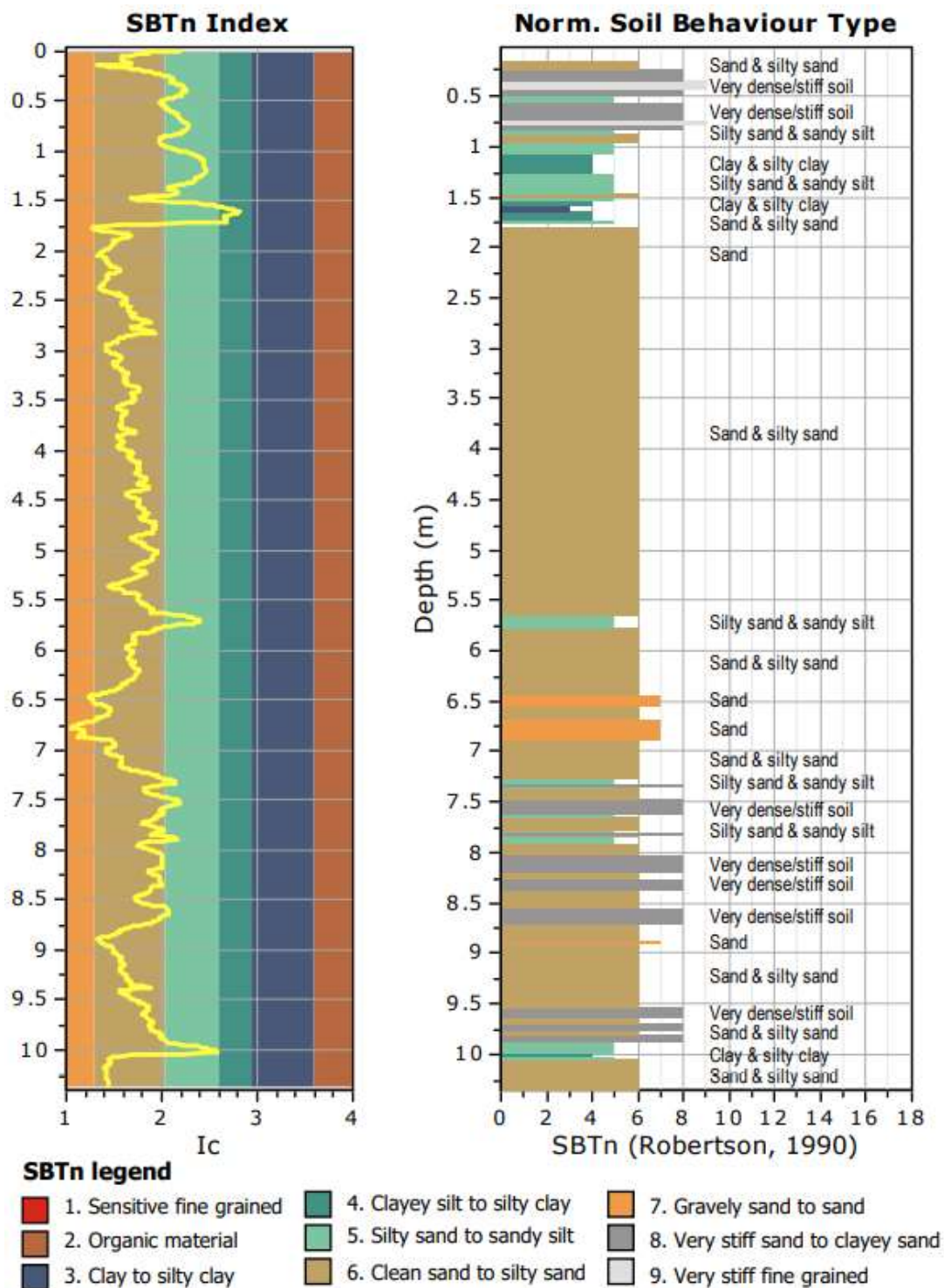
Graf č. 4.2: Vloženie dát do Robertsonovho nenormalizovaného SBT grafu (pilóta Z202, mostný objekt C202)



Graf č. 4.3: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – nenormalizované (pilóta Z202, mostný objekt C202)



Graf č. 4.4: Vloženie dát do Robertsonovho normalizovaného SBT grafu (pilóta Z202, mostný objekt C202)



Graf č. 4.5: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – normalizované (pilóta Z202, mostný objekt C202)

4.1.2 Vlastné vyhodnotenie v MS Excel

Použitie vzorcov uvedených v publikácií *Interpretation of cone penetration tests – A unified approach* (P. K. Robertson^{[10][W6]}) so zohľadnením noriem ČSN EN ISO 22476-1^[N5], ČSN EN ISO 14688-1^[N2], ČSN 73 6133^[N4], ČSN 75 2410^[N1], ČSN P 73 1005^[N3].

Vyhodnotenie je z dôvodu prehľadnosti a nekompatibilného formátu umiestnené v prílohe práce (príloha č. 4.1.2).

4.1.3 Zostavenie výsledného profilu v mieste pilóty

Zo všetkých dostupných zdrojov bolo potrebné zostaviť finálne profily pre ďalšie výpočty, modely a analýzy. Boli použité vstupy:

- konfigurácia zemín nájdená v mieste pilóty počas realizácie vrtu
- vlastné vyhodnotenie CPT v MS Excel (podľa manuálu od *Robertsona*^[10])
- protokol z programu CPeT-IT (príloha č. 4.1.1), použité prístupy SBT a SBTn

Na základe všetkých získaných informácií z danej lokality bol vytvorený nasledujúci profil (protokol v prílohe č. 4.1.3):

| | |
|--------------|--|
| 0,00 - 1,40 | HLINA fľovitá (tuhá) |
| 1,60 - 5,80 | PIESOK štrkovitý |
| 6,00 - 10,20 | PIESOK štrkovitý/so štrkom/fľovitý |

Tabuľka č. 4.1: Výsledný profil pre ďalší výpočet (pilóta Z202)

Z oboch variantov vyhodnotenia iz nálezů počas realizácie pilóty je vysoko pravdepodobné, že veľká časť pilóty leží v súvrstvách, ktoré je tvorené zvodnelými a uľahlými štrkami a pieskami s prímiesou jemnozrnnej zeminy (ako bolo uvedené v kapitole 3.1.2, pravdepodobne fluvialného a glaciálneho pôvodu). Súčasťou vyhodnotenia sú aj korelačnými vzťahmi odvodené vybrané pevnostné, deformačné parametre a stavové veličiny zemín.

4.2 Interpretácia CPT pri skúšobnej zaťažovacej pilóte Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice

Pri druhej skúške (obrázky č. 4.2, 4.3) súprava dosiahla hĺbku 11,80 m. Hladina podzemnej vody bola nameraná v hĺbke 3,0 m.



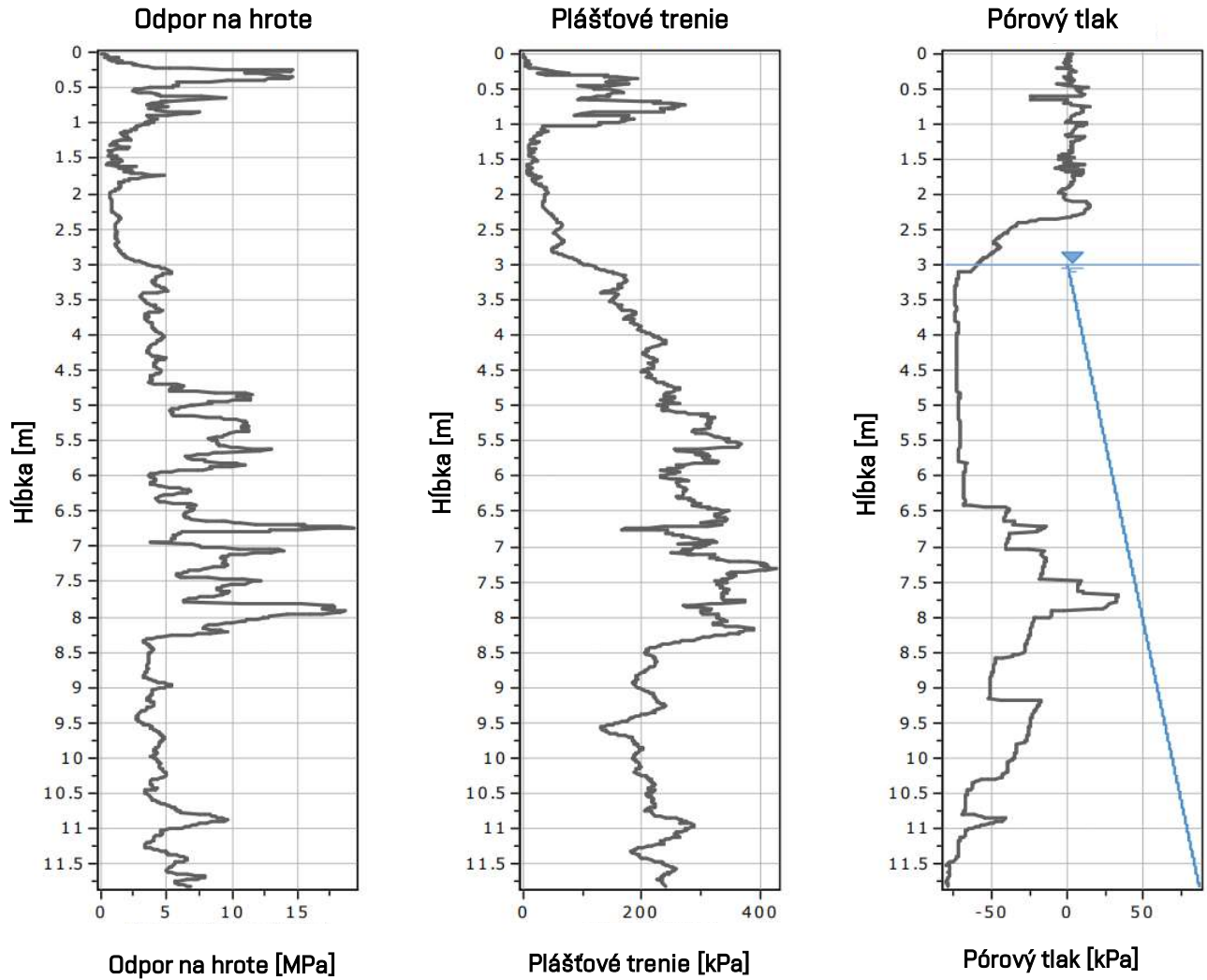
Obrázok č. 4.2: Prebiehajúca skúška CPT pri mostnom objekte C203



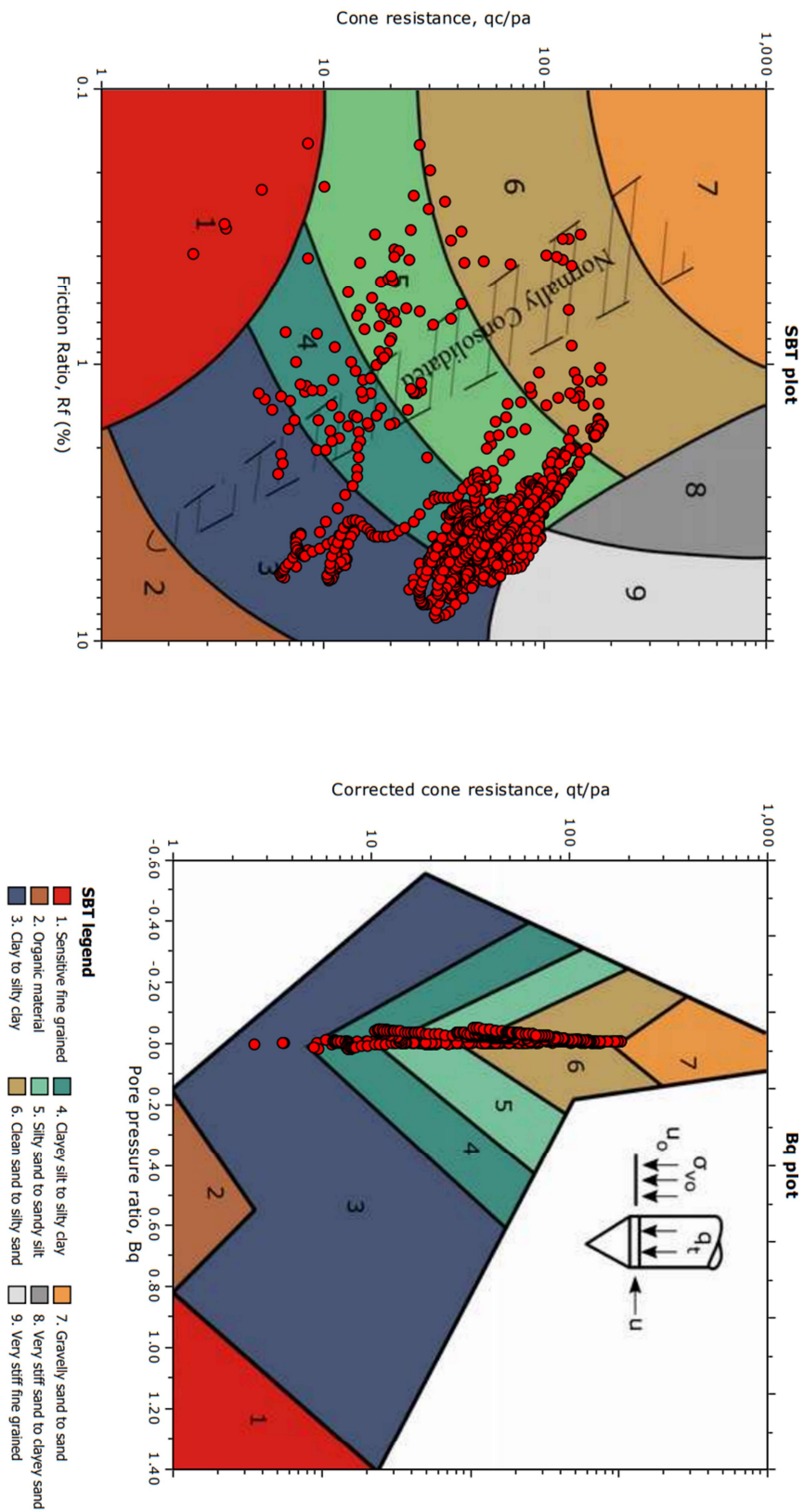
Obrázok č. 4.3: Príprava na skúšku pri mostnom objekte C203

Vyhodnotenie dát prebehlo opäť dvomi spôsobmi (viď kapitola 4.1).

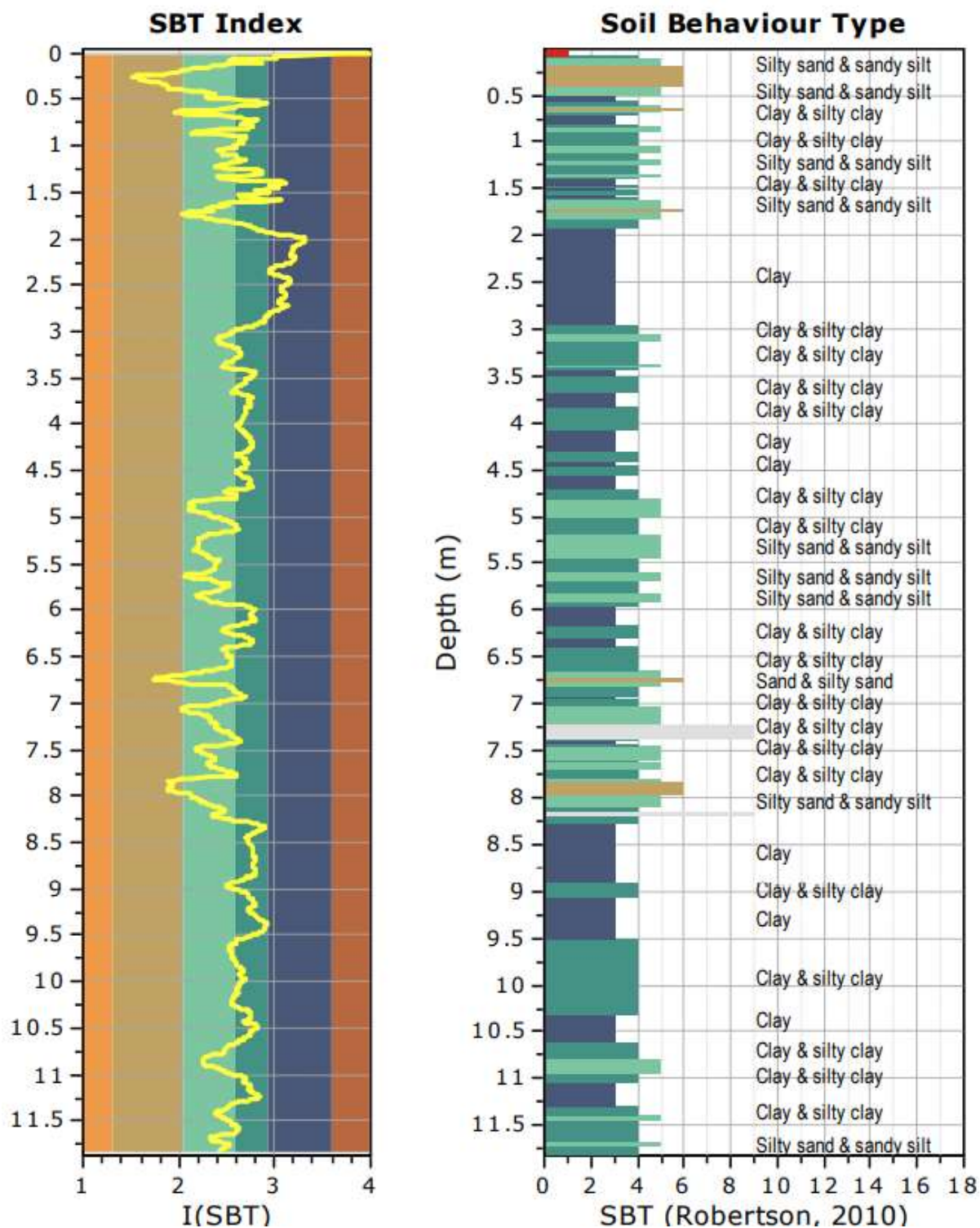
4.2.1 CPeT-IT



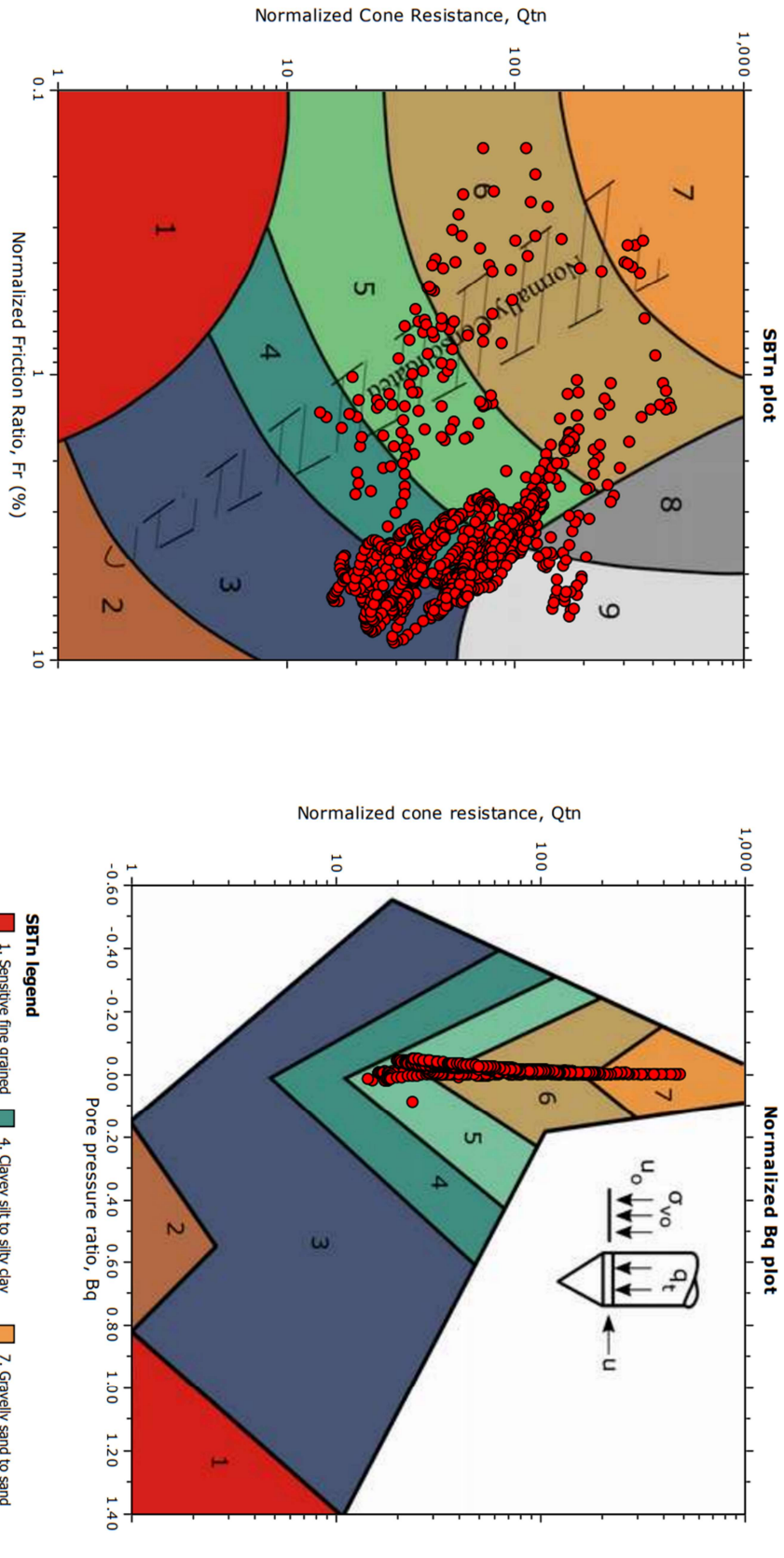
Graf č. 4.6: Grafické zobrazenie nameraného odporu na hrote, plášťového trenia a pórového tlaku (pilóta Z203, mostný objekt C203)



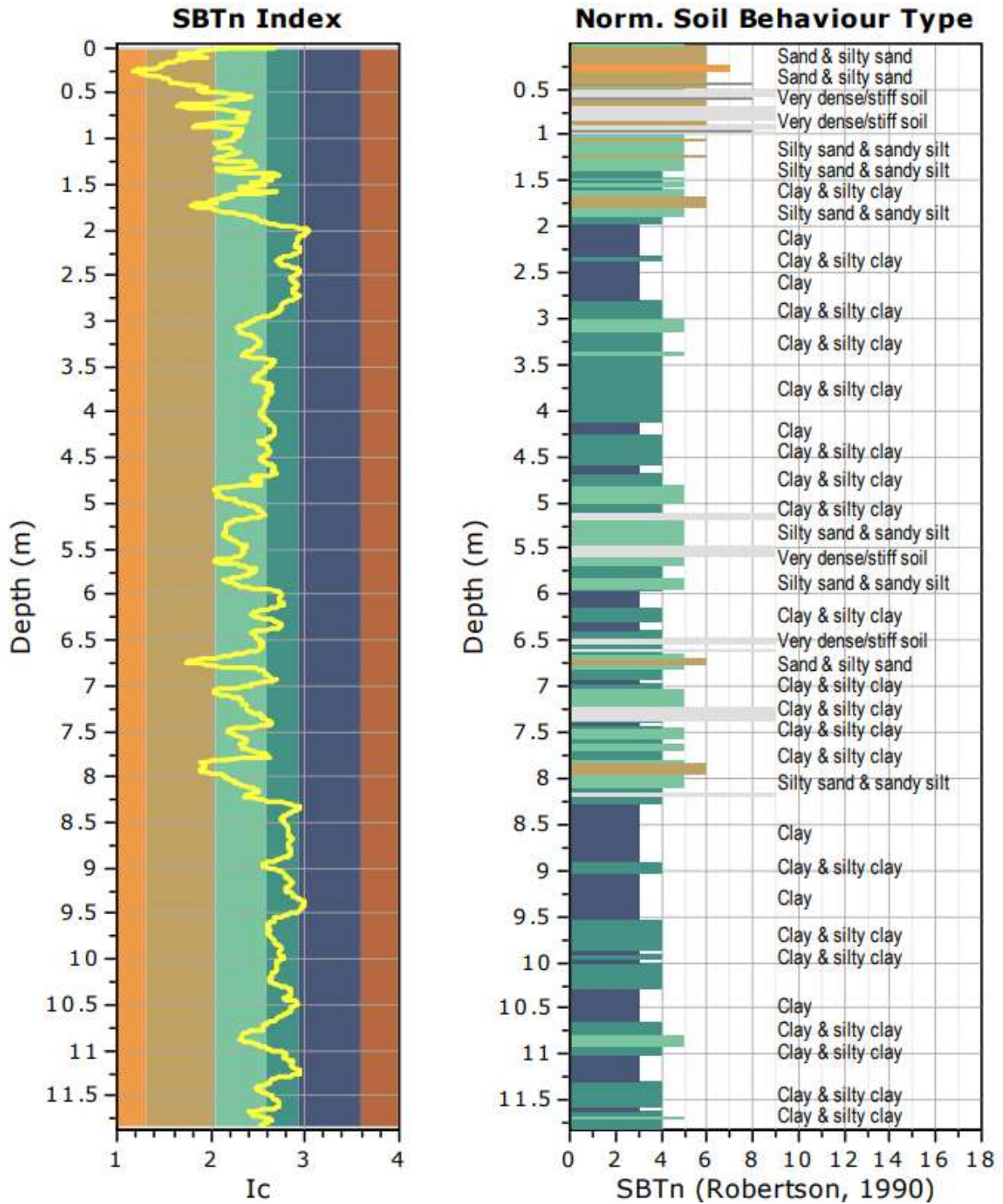
Graf č. 4.7: Vloženie dát do Robertsonovho nenormalizovaného SBT grafu (pilóta Z203, mostný objekt C203)



Graf č. 4.8: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – nenormalizované (pilóta Z203, mostný objekt C203)



Graf č. 4.9: Vloženie dát do Robertsonovho normalizovaného SBT grafu (pilóta Z203, mostný objekt C203)



Graf č. 4.10: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – normalizované (pilóta Z203, mostný objekt C203)

4.2.2 Vlastné vyhodnotenie v MS Excel

Vyhodnotenie je umiestnené v prílohách práce (príloha č. 4.2.2).

4.2.3 Zostavenie výsledného zemného profilu

Na základe dostupných informácií bol vytvorený nasledujúci profil (protokol v prílohe č. 4.2.3):

| | |
|--------------|-----------------------------|
| 0,00 - 1,80 | ŠTRK s pieskom/piesčitý |
| 2,00 - 5,00 | ÍL piesčitý |
| 5,20 - 8,20 | PRACHOVEC/ PRACHOVITÁ hlína |
| 8,40 - 11,80 | ÍLOVEC/PRACHOVEC zvetralý |

Tabuľka č. 4.2: Výsledný profil pre ďalší výpočet (pilóta Z203)

Napriek faktu, že statická penetračná dosiahla úroveň zhruba polovice hĺbky zaťažovanej pilóty, výsledky interpretácie CPT relatívne dobre zodpovedajú geologickému popisu podložia z inžiniersko-geologického prieskumu (kapitola 3.2.2). Pri povrchu bola zistená málo mocná sedimentárna kvartérna štrková vrstva. V jej podloží sa pravdepodobne nachádzajú vrstvy ílov a hĺn. Veľká časť pilóty sa však nachádza v kapitole 3.2.2 zmienenom predkvartérnom ílovcovom podloží, zvetranom až na charakter zeminy s pevnou konzistenciou.

5 INVERZNÁ ANALÝZA ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK PILÓT POMOCOU METÓDY PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ

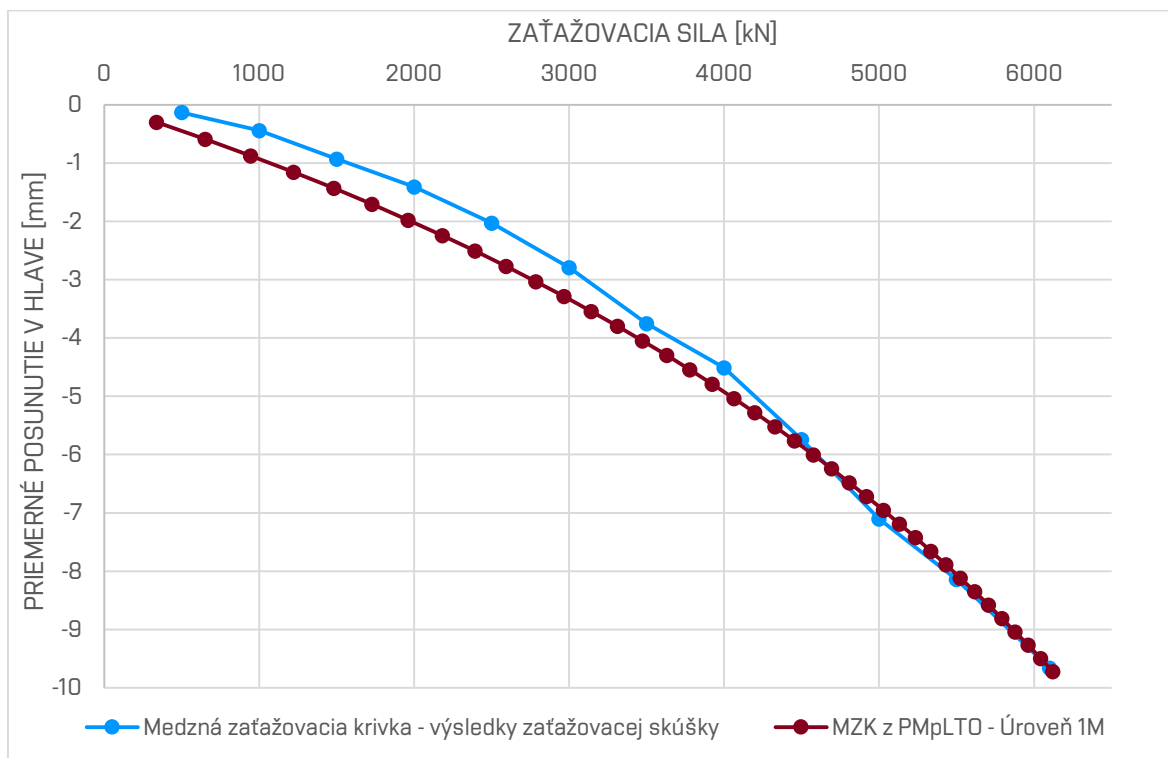
5.1 Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat

Získané geologické (geotechnické) profily z vyhodnotenia CPT boli využité na spätnú analýzu zaťažovacej skúšky pilóty. Tá prebehla v softvéri PMpLTO^[6] (*Pile-Micropile Load Transfer Optimization*), určenom pre návrh a posúdenie hlbinných základových prvkov pomocou metódy prenosových funkcií (jej princíp bol popísaný v úvodnej teoretickej časti – kapitola 2.2).

Pre segmenty plášťa pilóty Z202 sú zvolené hyperbolické prenosové funkcie (Bohr^[4] 2016). Do softvéru sú zadané vstupné parametre pre súvrstvia zemín (tabuľka č. 4.1, 4.2) a parametre zaťažovacej skúšky a zaťažovanej pilóty. Zmenou vybraných parametrov (v intervaloch uvedených v kapitole č. 2.2.3) je cieľom dosiahnuť adekvátnu zhodu predikovanej medznej zaťažovacej krivky so skutočnou meranou medznou zaťažovacou krivkou. Uvedeným parametrom je deformačný parameter M_s (riadiaci počiatočnú tuhosť pilóty) a v prípade stupňa analýzy 1M aj faktor β (bližší popis v kapitole č. 2.2.3).

5.1.1 Stupeň analýzy 1M

Porovnanie medznej zaťažovacej krivky z interpretácie výsledkov zaťažovacej skúšky (kapitola 3.1.4) a predikovanej MZK z PMpLTO v úrovni 1M je znázornené na grafe č. 5.1.



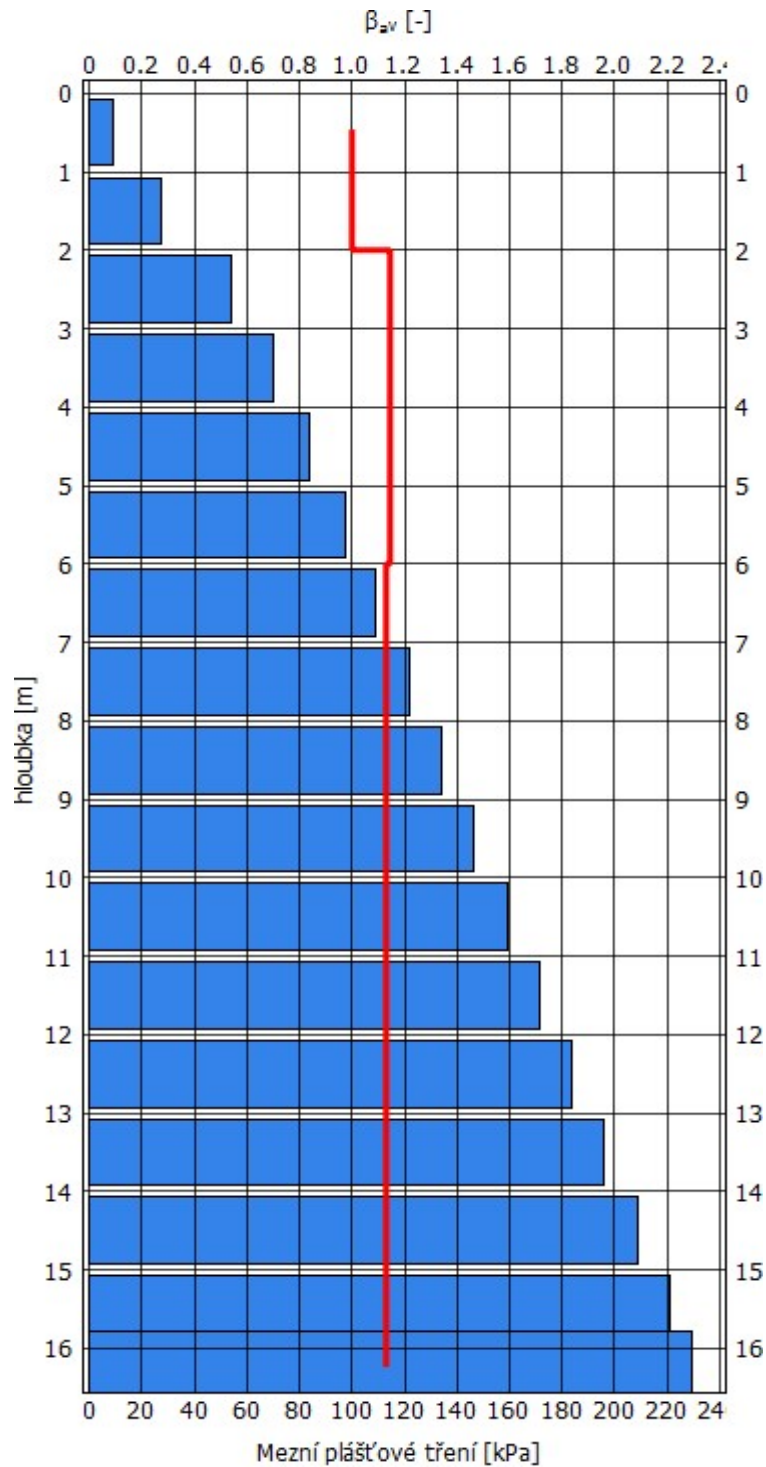
Graf č. 5.1: Porovnanie MZX zo zaťažovacej skúšky a z PMpLTO (1M) (Z202)

Pre dosiahnutú zhodu medznej zaťažovacej krivky zo statickej zaťažovacej skúšky pilóty Z202 a predikovanej MZX v *PMpLTO* v úrovni 1M boli použité vstupné parametre, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 5.1.

| Optimalizované vstupné parametre - Z202 - mostný objekt C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | | | | | | | |
|---|--------------|----------------------|----------------------|--------|--------------|-------------|-------|
| Stupeň analýzy 1M | | | | | | | |
| Geologický profil | Hĺbka | γ | γ_s | M_s | β_{av} | φ_c | POP |
| | [m] | [kN/m ³] | [kN/m ³] | [-] | [-] | [-] | [kPa] |
| HLINA ílovitá (tuhá) | 0,00 - 2,00 | 18,5 | 21 | 0,0025 | 1 | - | - |
| ŠTRK ílovitý, piesčitý (PIESOK štrkovitý) | 2,00 - 6,00 | 20 | 22 | 0,0052 | 1,145 | - | - |
| PIESOK so štrkom/štrkovitý | 6,00 - 10,20 | 19 | 21 | 0,0051 | 1,13 | - | - |

Tabuľka č. 5.1: Optimalizované vstupné parametre z PMpLTO (1M) (Z202)

Predikovaná závislosť medzného plášťového trenia na hĺbke a faktoru β na hĺbke v úrovni 1M je znázornená v grafe č. 5.2.

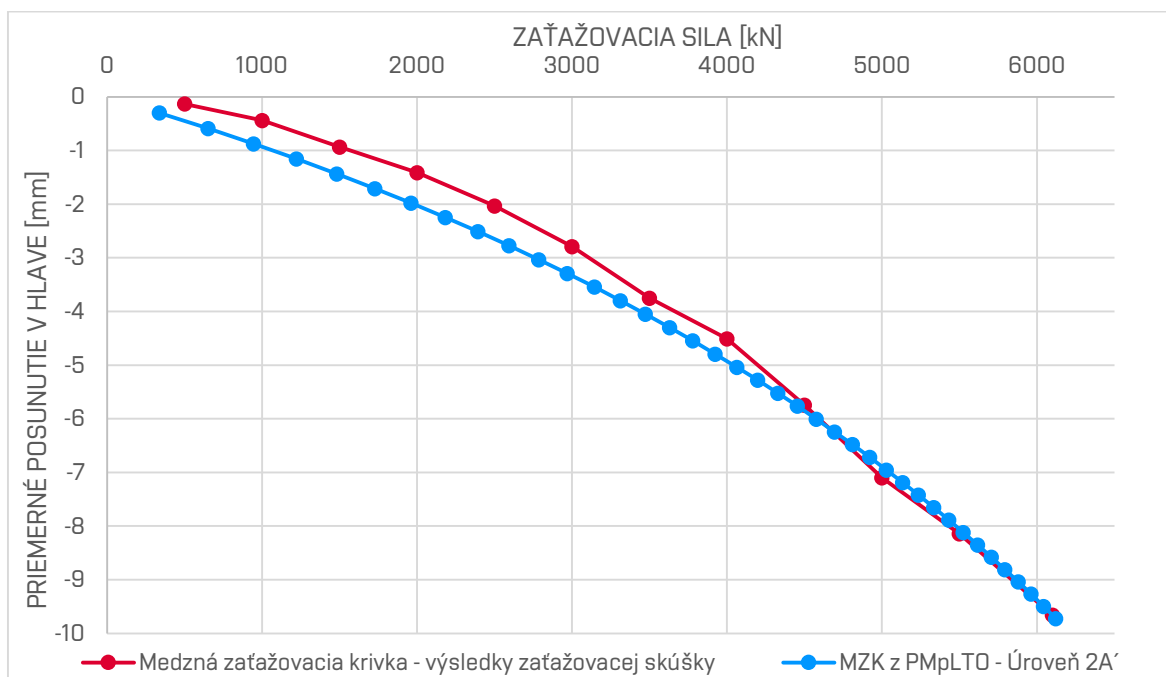


Graf č. 5.2: Priebeh medzného plášťového trenia a faktoru β z PMpLTO (1M) (Z202) (červená lomená krivka reprezentuje priebeh faktoru β po dĺžke pilóty, modré stĺpce medzné plášťové trenie $q_{s,ult}$)

V prípade úrovne analýzy 1M aplikovanej na pilótu Z202 má faktor β v jednotlivých vrstvách zemín konštantný priebeh, nárast medzného plášťového trenia má teda s narastajúcou hĺbkou lineárny priebeh (viď. kapitola 2.2.2).

5.1.2 Stupeň analýzy 2A

Porovnanie medznej zaťažovacej krivky z interpretácie výsledkov zaťažovacej skúšky (kapitola 3.1.4) a predikovanej MZK z *PMpLTO* v úrovni 2A je znázornené na grafe č. 5.3.



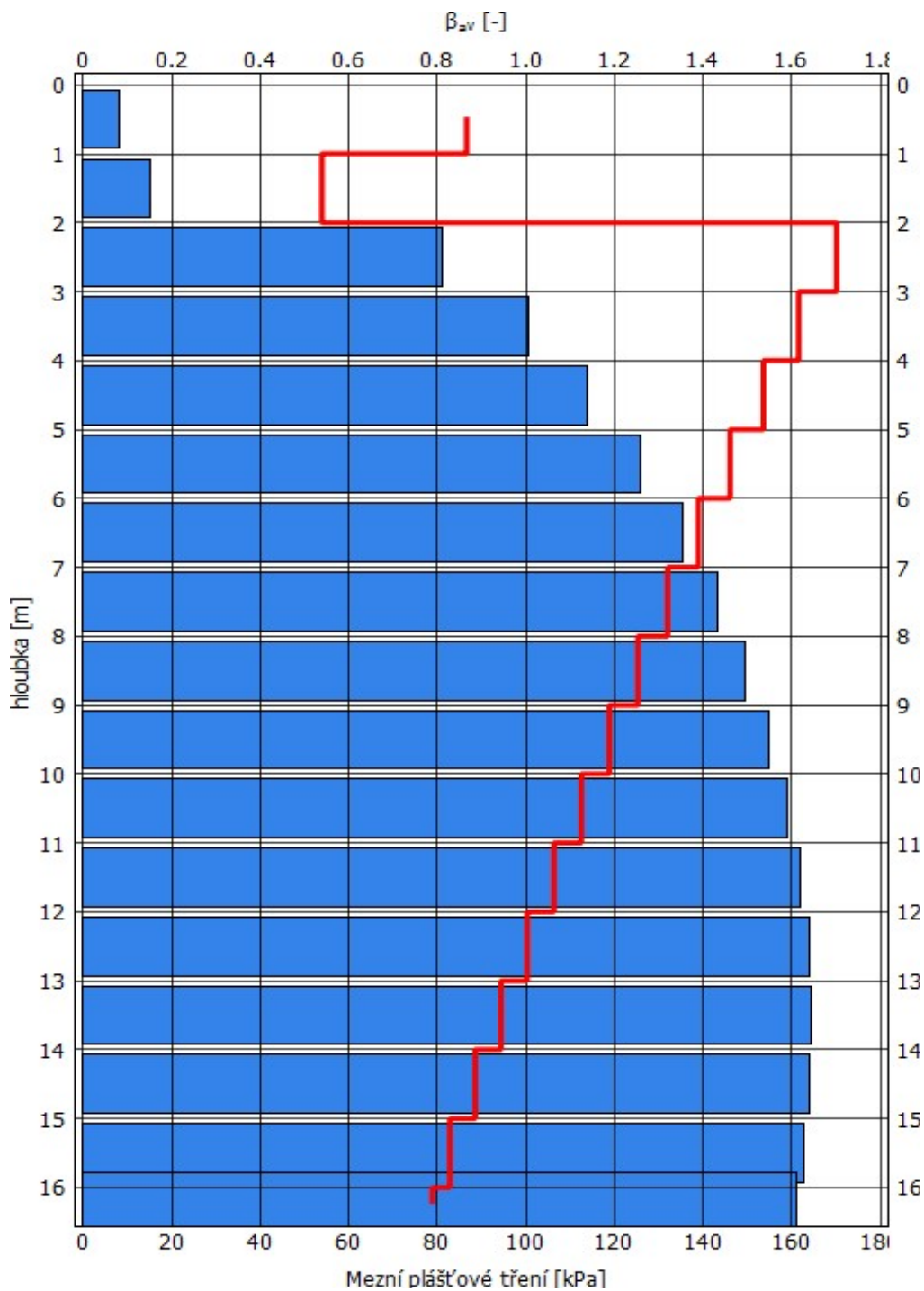
Graf č. 5.3: Porovnanie MZK zo zaťažovacej skúšky a z *PMpLTO* (2A) (Z202)

Pre dosiahnutú zhodu medznej zaťažovacej krivky zo statickej zaťažovacej skúšky piloty Z202 a predikovanej MZK v *PMpLTO* v úrovni 2A boli použité vstupné parametre, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 5.2.

| Optimalizované vstupné parametre - Z202 - mostný objekt C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | | | | | | | |
|--|--------------|----------------------|----------------------|--------|--------------|-------------|-------|
| Stupeň analýzy 2A | | | | | | | |
| Geologický profil | Hĺbka | γ | γ_s | M_s | β_{av} | φ_c | POP |
| | [m] | [kN/m ³] | [kN/m ³] | [-] | [-] | [-] | [kPa] |
| HLINA ílovitá (tuhá) | 0,00 - 2,00 | 18,5 | 21 | 0,0025 | - | 35 | 50 |
| ŠTRK ílovitý, piesčitý (PIESOK štrkovitý) | 2,00 - 6,00 | 20 | 22 | 0,0052 | - | - | - |
| PIESOK so štrkom/štrkovitý | 6,00 - 10,20 | 19 | 21 | 0,0051 | - | - | - |

Tabuľka č. 5.2: Optimalizované vstupné parametre z *PMpLTO* (2A) (Z202)

Predikovaná závislosť medzného plášťového trenia na hĺbke a faktoru β na hĺbke v úrovni 2A je znázornená v grafe č. 5.4.



Graf č. 5.4: Priebeh medzného plášťového trenia a faktoru β z PMpLTO (2A) (Z202) (červená lomená krivka reprezentuje priebeh faktoru β po dĺžke pilóty, modré stĺpce medzné plášťové trenie $q_{s,ult}$)

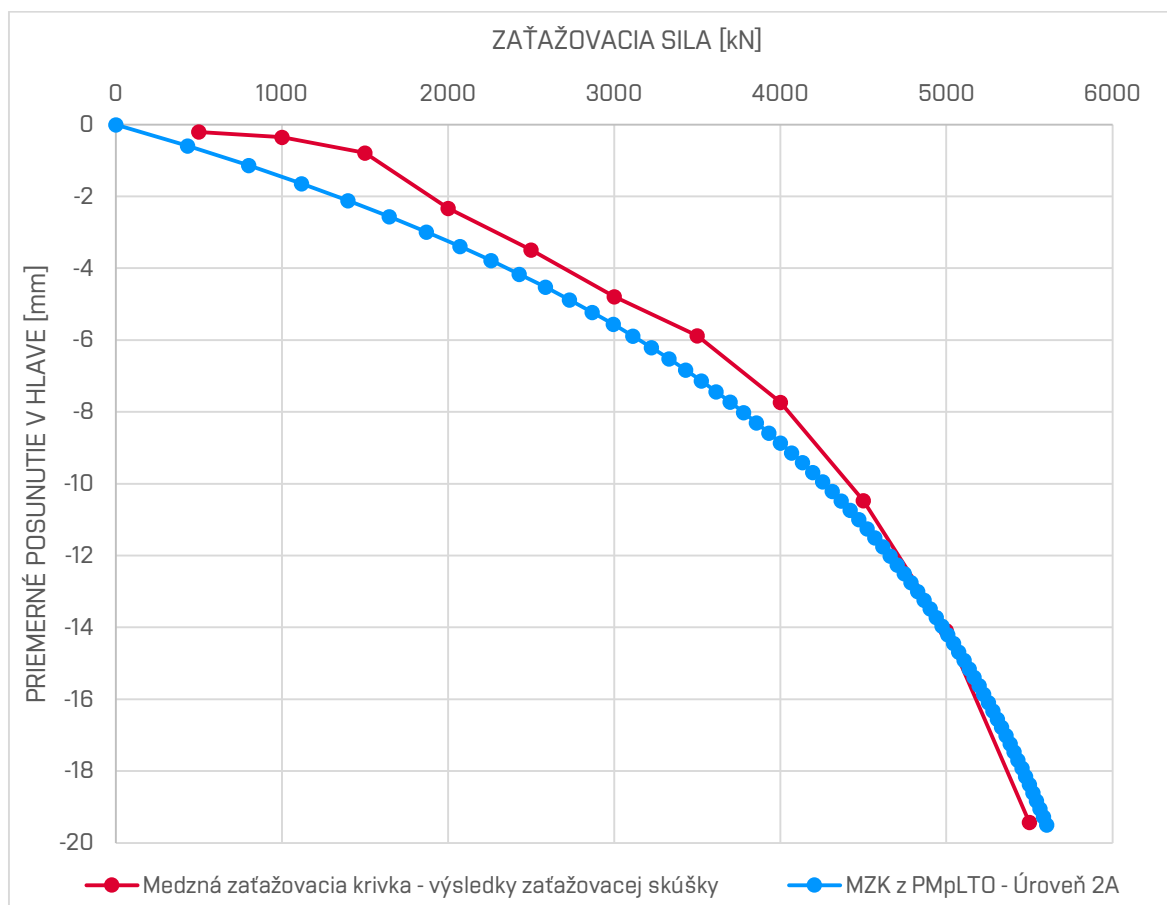
V prípade aplikácie stupňa analýzy 2A na pilótu Z202 klesá hodnota faktoru β s hĺbkou rýchlejšie ako narastá hodnota efektívneho napätia σ'_{or} , dochádza teda k ustáleniu medzného plášťového trenia na hodnote približne 164 kPa (k podobnému záveru dospel aj *Rollins*^[43]).

5.2 Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice

Aj v prípade pilóty č. Z203 prebehla inverzná analýza s využitím MPF, konkrétne v úrovni 2A.

5.2.1 Stupeň analýzy 2A

Porovnanie medznej zaťažovacej krivky z interpretácie výsledkov zaťažovacej skúšky pilóty Z203 (kapitola 3.2.4) a predikovanej MZK z *PMpLTO* v úrovni 2A je znázornené na grafe č. 5.5.



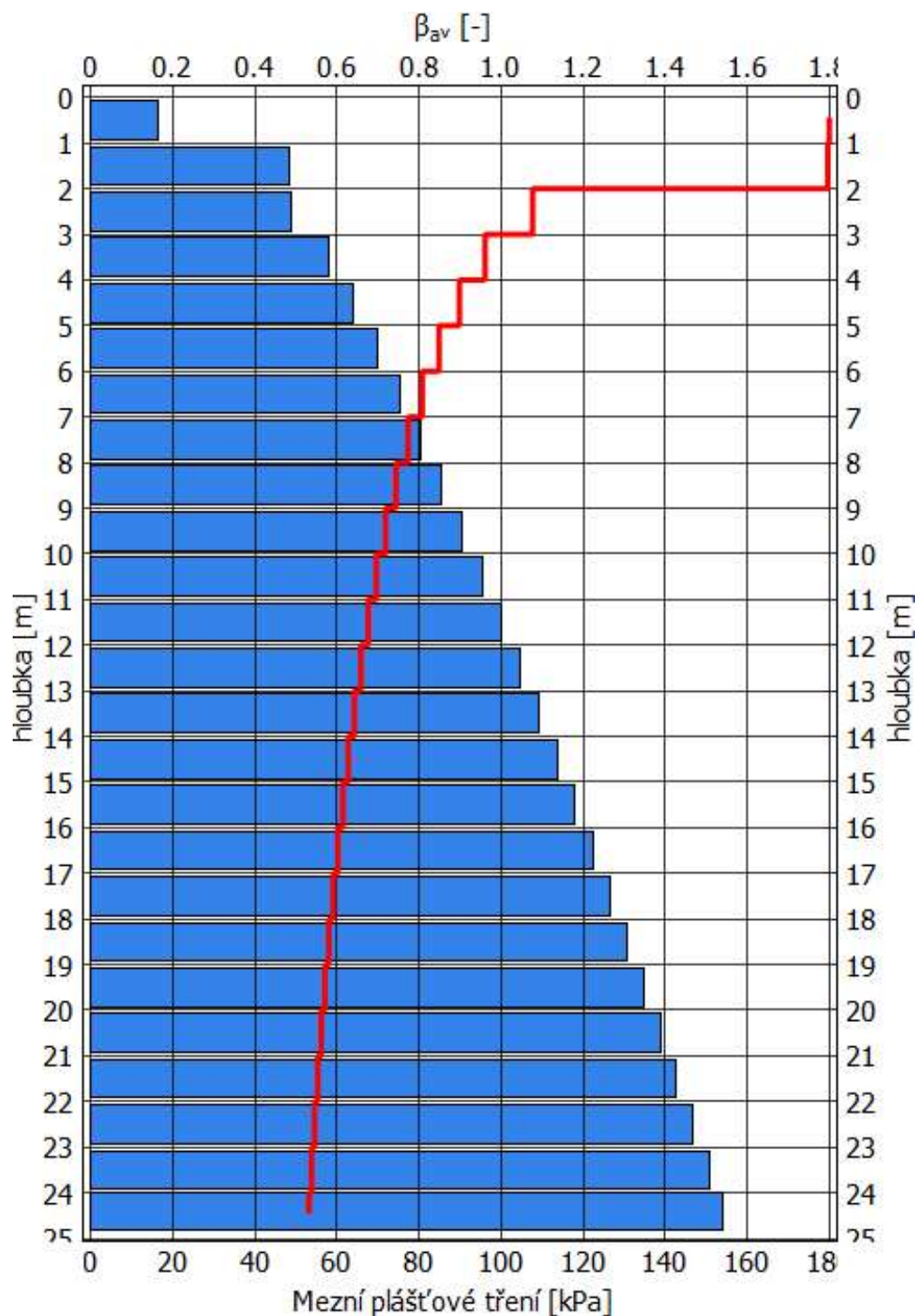
Graf č. 5.5: Porovnanie MZK zo zaťažovacej skúšky a z PMpLTO (2A) (Z203)

Pre dosiahnutú zhodu medznej zaťažovacej krivky zo statickej zaťažovacej skúšky pilóty Z203 a predikovanej MZK v *PMpLTO* v úrovni 2A boli použité vstupné parametre, ktoré sú uvedené v tabuľke č. 5.3.

| Optimalizované vstupné parametre - Z203 - mostný objekt C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice | | | | | | | |
|--|-------------|----------------------|----------------------|---------|--------------|-------------|-------|
| Stupeň analýzy 2A | | | | | | | |
| Geologický profil | Hĺbka | γ | γ_s | M_s | β_{av} | φ_c | POP |
| | [m] | [kN/m ³] | [kN/m ³] | [-] | [-] | [-] | [kPa] |
| ŠTRK s pieskom/piesčitý | 0,00 - 2,00 | 18 | 20,5 | 0,02 | - | - | - |
| ÍL piesčitý | 2,00 - 5,20 | 18,5 | 21 | 0,005 | - | 25 | 1160 |
| PRACHOVEC zvetralý/ PRACHOVITÁ hlína | 5,2 - 8,40 | 18,5 | 21 | 0,00535 | - | 25 | 1160 |
| ÍLOVEC/PRACHOVEC zvetralý | 8,4 - 11,80 | 18,5 | 21 | 0,0056 | - | 25 | 1160 |

Tabuľka č. 5.3: Optimalizované vstupné parametre z PMpLTO (2A) (Z203)

Predikovaná závislosť medzného plášťového trenia na hĺbke a faktoru β na hĺbke v úrovni 2A je znázornená v grafe č. 5.6.



Graf č. 5.6: Priebeh medzného plášťového trenia a faktoru β z PMpLTO (2A) (Z203)

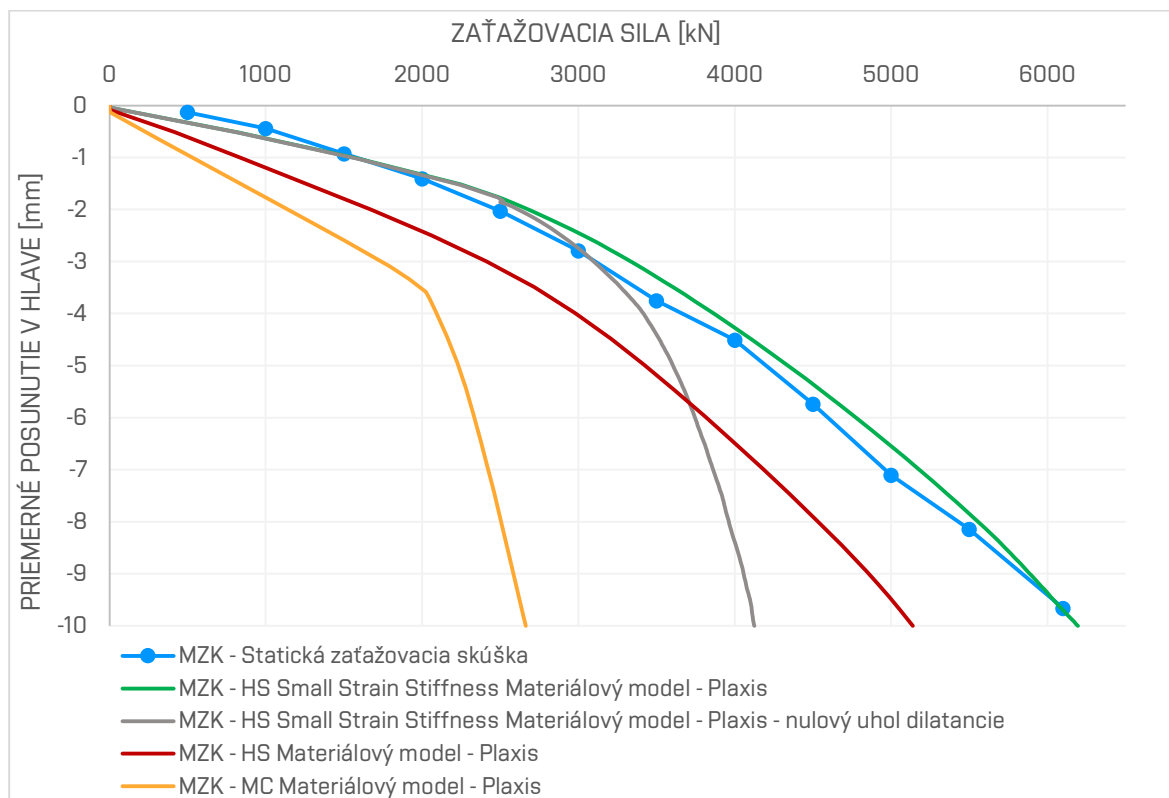
Pri aplikácii úrovne analýzy 2A na model pilóty Z203 je zreteľný pokles faktoru β s narastajúcou hĺbkou, no hodnota medzného plášťového trenia v tomto prípade s hĺbkou rastie a nie je zreteľná žiadna úroveň ustálenia ako pri pilóte Z202 (viď. rovnica **2.40**, vo väčších hĺbkach je nárast medzného plášťového trenia $q_{s,ult}$ takmer lineárny z dôvodu, že hodnota faktoru β sa blíži konštante, konkrétne pri pilóte Z203 sa jedná o hĺbkovú úroveň od približne 15 m).

6 INVERZNÁ ANALÝZA ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK PILÓT POMOCOU METÓDY KONEČNÝCH PRVKOV (PLAXIS 2D)

V tejto kapitole sa práca zaoberá simuláciou zaťažovacej skúšky a inverznou analýzou výsledkov simulácie ZS s využitím metódy konečných prvkov v programe *Plaxis 2D*. Úloha je riešená ako rotačne symetrická. Ako vstupné dáta do softvéru poslúžia korelačnými vzťahmi odvodené pevnostné a deformačné parametre z CPT.

6.1 Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat

Pre odvodené pevnostné a deformačné parametre z CPT (príloha č. 4.1.2) bola skúška nasimulovaná s využitím materiálových modelov, ktoré boli teoreticky popísané v kapitole č. 2.3.



Graf č. 6.1: Porovnanie MZK z uskutočnenej zaťažovacej skúšky a jej simulácie v programe Plaxis 2D pre jednotlivé materiálové modely (Z202)

Ako je zřejmé z grafu č. 6.1, v tomto konkrétnom prípade bola dosiahnutá veľmi dobrá zhoda reálnej medznej zatažovacej krivky so simuláciou s využitím pokročilého materiálového modelu Hardening Soil s nadstavbou Small Strain Stiffness (HS SSS). Pre zjednodušenie boli v tejto simulácii vynechané odľahčovacie stupne a model bol zatažený predpísaným zaokrúhleným posunom v hlave 10 mm s maximálnym podielom zataženia na krok 0,05%.

Zadané materiálové vstupy do výpočtov boli stručne zhrnuté v tabuľkách č. 6.1, 6.2 a 6.3:

| Zemina | Materiálový model | Hĺbka [m] | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] | E_{50ref} [MPa] | E_{oedref} [MPa] | E_{urref} [MPa] | G_{0ref} [MPa] | $\gamma_{0,7}$ [-] | m [-] | c'_{ref} [kPa] | φ [°] | ψ [°] |
|--------------------------|---|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|------------------|--------------------|---------|------------------|---------------|------------|
| HLINA fľovitá | Hardening soil | 0,00 - 2,00 | 18,5 | 20 | 11 | 10,5 | 30 | - | - | - | 12 | 25 | 0 |
| PIESOK fľovitý so štrkom | Hardening soil - Small Strain Stiffness | 2,00 - 6,00 | 19,5 | 20,5 | 80 | 80 | 240 | 240 | 0,0002 | 0,50 | 0 | 35 | 15 |
| PIESOK štrkovitý | Hardening soil - Small Strain Stiffness | 6,00 - 24,00 | 20 | 21 | 50 | 50 | 150 | 150 | 0,0002 | 0,50 | 0 | 37 | 12 |

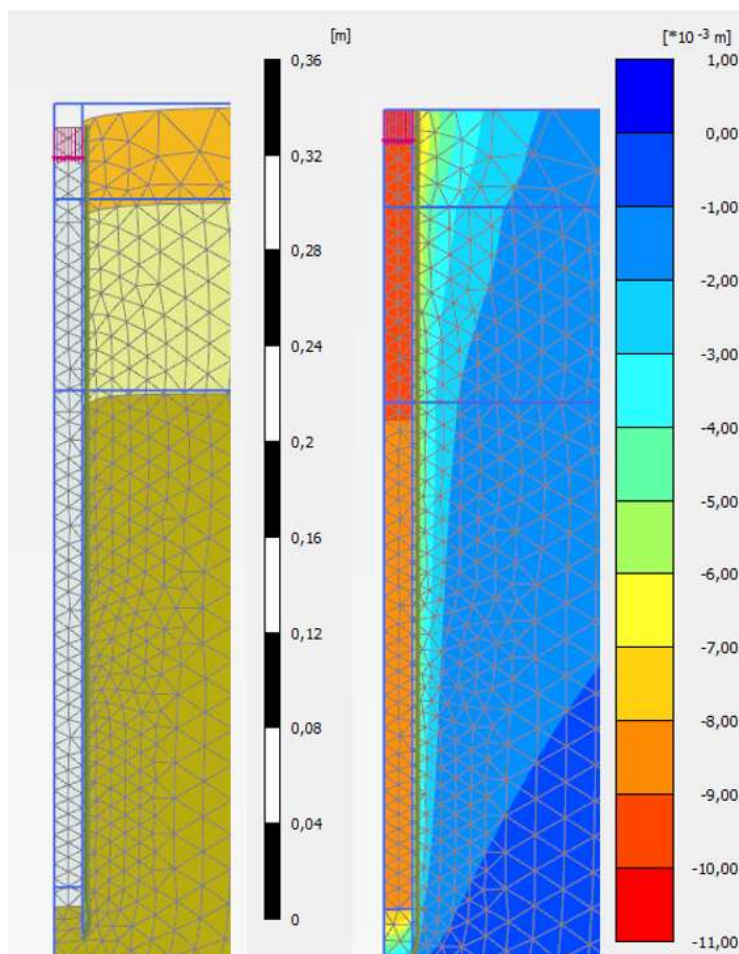
Tabuľka č. 6.1: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom HS + Small Strain Stiffness

| Zemina | Materiálový model | Hĺbka [m] | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] | E_{50ref} [MPa] | E_{oedref} [MPa] | E_{urref} [MPa] | m [-] | c'_{ref} [kPa] | φ [°] | ψ [°] |
|--------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|-------------------|--------------------|-------------------|---------|------------------|---------------|------------|
| HLINA fľovitá | Hardening soil | 0,00 - 2,00 | 18,5 | 20 | 10,5 | 10,5 | 30 | - | 12 | 25 | 0 |
| PIESOK fľovitý so štrkom | Hardening soil | 2,00 - 6,00 | 19,5 | 20,5 | 80 | 80 | 240 | 0,50 | 0 | 35 | 15 |
| PIESOK štrkovitý | Hardening soil | 6,00 - 24,00 | 20 | 21 | 50 | 50 | 150 | 0,50 | 0 | 37 | 12 |

Tabuľka č. 6.2: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Hardening Soil

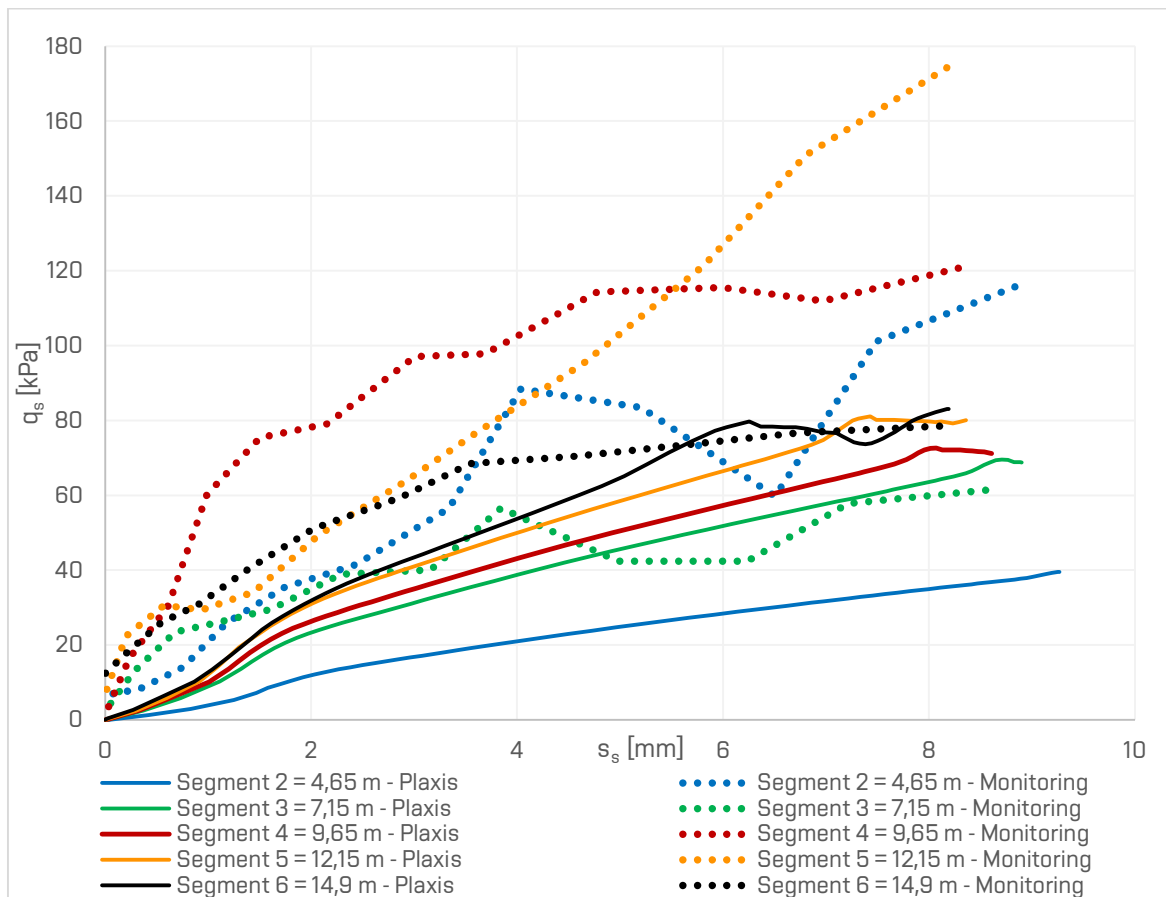
| Zemina | Materiálový model | Hĺbka [m] | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] | E' [MPa] | ν [-] | c'_{ref} [kPa] | φ [°] | ψ [°] |
|--------------------------------|-------------------|--------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|-----------|------------------|---------------|------------|
| HLINA ľlovitá | Mohr-Coulomb | 0,00 - 2,00 | 18,5 | 20 | 10,5 | 0,15 | 12 | 25 | 0 |
| PIESOK ľlovitý so štrkom | Mohr-Coulomb | 2,00 - 6,00 | 19,5 | 20,5 | 75,76 | 0,15 | 0 | 35 | 15 |
| PIESOK štrkovitý | Mohr-Coulomb | 6,00 - 24,00 | 20 | 21 | 47 | 0,15 | 0 | 37 | 12 |

Tabuľka č. 6.3: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Mohr-Coulomb



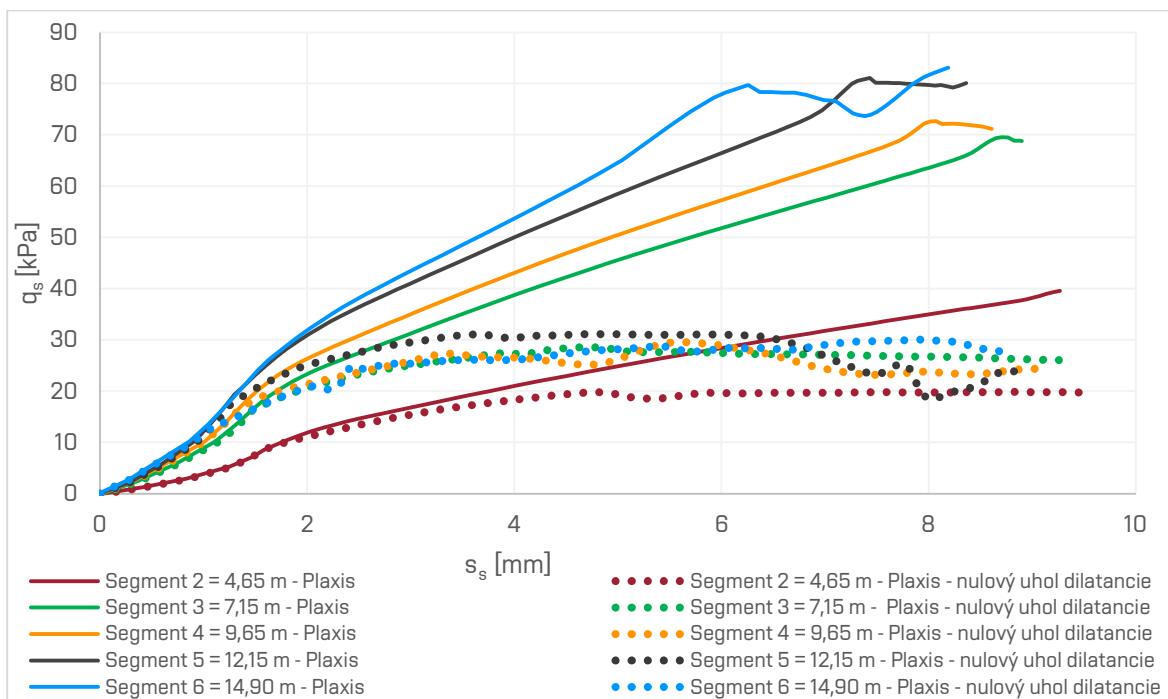
Obrázok č. 6.1: V pravej časti je zobrazená deformovaná sieť MKP pri poslednom zaťažovacom stupni v mierke 50:1, vľavo sa nachádza grafické zobrazenie posunu po výške pilóty (materiálový model HS SSS) (Z202)

Keďže simulácia nadväzuje na prácu, ktorá sa zaoberá metódou prenosových funkcií, na základe závislosti posunu stredy segmentu a plášťového trenia na rozhraní zemina – pilóta sa podarilo vykresliť prenosové funkcie segmentov a graficky ich porovnať s funkciami z merania zrealizovanej statickej zaťažovacej skúšky pilóty (graf č. 6.3).



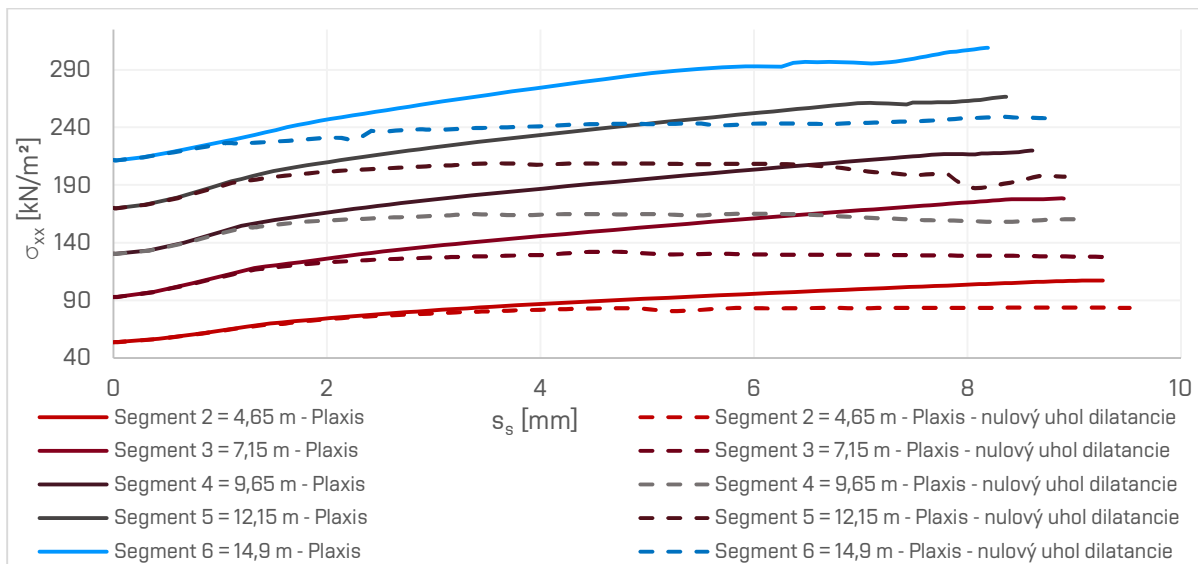
Graf č. 6.2: Porovnanie prenosových funkcií segmentov zo zaťažovacej skúšky a jej simulácie pomocou MKP (HS + Small Strain Stiffness materiálový model, $m=0,5$) (Z202)

Vplyv uhlu dilatancie na prenosové funkcie je ilustrovaný na grafe č. 6.4. V prípade výpočtu sadania pilóty nelineárnou metódou podľa *Masopusta*^[3] je vplyv uhlu dilatancie zahrnutý do regresných koeficientov pre výpočet neodvodnenej únosnosti na plášti R_{Su} (kapitola 2.4). Pre numerickú analýzu pomocou materiálových modelov Hardening Soil, Hardening Soil Small Strain Stiffness a Mohr-Coulomb je však tento uhol jeden zo zadávaných vstupných parametrov.



Graf č. 6.3: Vplyv uhlu dilatancie na prenosové funkcie plášťa segmentov pilóty (HS + Small Strain Stiffness materiálový model, $m=0,5$)

Ďalšou sledovanou a vykreslenou závislosťou je rastúce kartézske totálne napätie σ_{xx} s rastúcim posunom stredu segmentu (a s hĺbkou, v ktorej sa segment nachádza), v grafe č. 6.5 je priebeh tohto napätia vykreslený aj pre nulový uhol dilatancie príslušných zemín.



Graf č. 6.4: Závislosť kartézskeho totálneho napätia σ_{xx} na rastúcom posune stredu segmentu (Z202)

6.2 Inverzná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice

6.2.1 Odvodenie vstupných parametrov do materiálových modelov

V prípade pilóty Z203, ktorá sa nachádza v súdržných zeminách konzistencie veľmi pevná (ČSN EN ISO 14688^[N2]), tvrdá (ČSN 75 2410^[N1], ČSN P 73 1005^[N3]) bolo potrebné odvodiť hodnoty deformačných modulov E_{ur}^{ref} , $E_{5\sigma}^{ref}$, E_{oed}^{ref} (keďže sa jednalo o vstupné parametre do použitých materiálových modelov) pre vrstvu zvetralého ílovca/prachovca (ílu prachovitého), v ktorom sa nachádza značná časť drieku pilóty (od hĺbky 8,4 m, odvodenie prebehne pre v intervale do hĺbky CPT sondy - 11,8 m) teda výrazne ovplyvňuje plášťové trenie.

V prvom kroku je vyjadrená závislosť odporu na hrote penetračného kužeľa počas CPT skúšky (q_c) a neodvodnenej šmykovej pevnosti (s_u) nasledujúcim korelačným vzťahom^[13]:

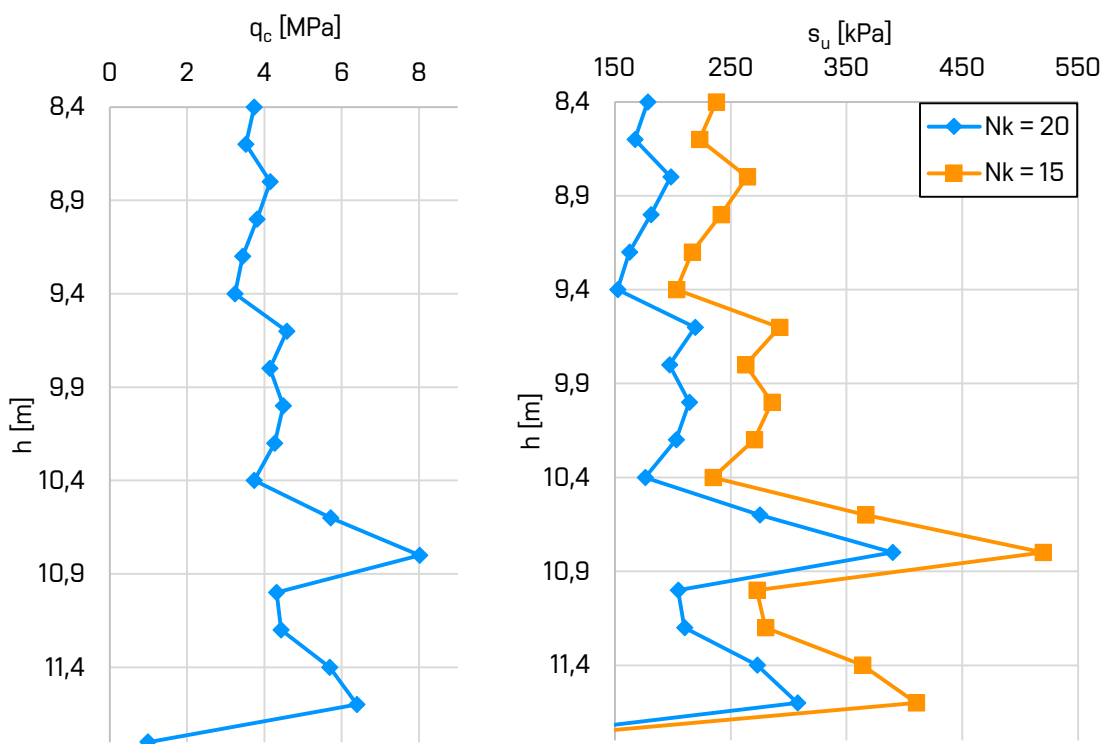
$$q_c = N_k \cdot s_u + \sigma_{v0} \quad 6.1$$

V tomto vzťahu reprezentuje σ_{v0} totálne geostatické napätie a N_k je empirický faktor penetračného kužeľa (uvažovaný^[13] v intervale 15 – 20, v tabuľkách a grafoch uvádzané hodnoty neodvodnenej šmykovej pevnosti s_u a deformačných modulov majú index 1 pre $N_k = 15$ a index 2 pre $N_k = 20$). Pri neodvodnenom šmýkaní zeminy je podmienka porušenia vodorovná (nulový uhol vnútorného trenia φ_u ; nenulová neodvodnená šmyková pevnosť s_u). Vzťah 6.1 je možné matematicky upraviť na vzťah 6.2 (tabuľka č. 6.4, graf č. 6.6):

$$s_u = \frac{q_c \cdot \sigma_{v0}}{N_k} \quad 6.2$$

| h [m] | q_c [MPa] | q_c [kPa] | σ_{vo} [kPa] | s_{u1} [kPa] | s_{u2} [kPa] |
|-------|-------------|-------------|---------------------|----------------|----------------|
| 8,40 | 3,738 | 3738 | 176,4 | 178,1 | 237,4 |
| 8,60 | 3,526 | 3525,5 | 180,6 | 167,2 | 223,0 |
| 8,80 | 4,148 | 4148 | 184,8 | 198,2 | 264,2 |
| 9,00 | 3,810 | 3810 | 189,0 | 181,1 | 241,4 |
| 9,20 | 3,441 | 3440,5 | 193,2 | 162,4 | 216,5 |
| 9,40 | 3,244 | 3244 | 197,4 | 152,3 | 203,1 |
| 9,60 | 4,582 | 4581,5 | 201,6 | 219,0 | 292,0 |
| 9,80 | 4,147 | 4146,5 | 205,8 | 197,0 | 262,7 |
| 10,00 | 4,493 | 4492,5 | 210,0 | 214,1 | 285,5 |
| 10,20 | 4,269 | 4268,5 | 214,2 | 202,7 | 270,3 |
| 10,40 | 3,737 | 3736,5 | 218,4 | 175,9 | 234,5 |
| 10,60 | 5,721 | 5720,5 | 222,6 | 274,9 | 366,5 |
| 10,80 | 8,023 | 8022,5 | 226,8 | 389,8 | 519,7 |
| 11,00 | 4,319 | 4319 | 231,0 | 204,4 | 272,5 |
| 11,20 | 4,435 | 4434,5 | 235,2 | 210,0 | 280,0 |
| 11,40 | 5,695 | 5694,5 | 239,4 | 272,8 | 363,7 |
| 11,60 | 6,396 | 6395,5 | 243,6 | 307,6 | 410,1 |
| 11,80 | 0,987 | 987 | 247,8 | 37,0 | 49,3 |

Tabuľka č. 6.4: Namerané hodnoty odporu na hrote (q_c) z CPT a dopočítané hodnoty neodvodnenej šmykovej pevnosti (s_u)



Graf č. 6.5: Priebeh odporu na hrote (q_c) z CPT a dopočítaných hodnôt neodvodnenej šmykovej pevnosti (s_u) v riešenej vrstve zeminy

V ďalšom kroku sa určí miera prekonsolidácie ílu (rovnice č. 6.3 a 6.4, tabuľka č. 6.3) s využitím empirického vzorca (rovnica 6.5), ktorý vzťahuje maximálne prekonsolidačné napätie (σ_p) k meranému odporu na hrote z CPT:

$$OCR = \frac{\sigma_p}{\sigma'_{or}} \quad 6.3$$

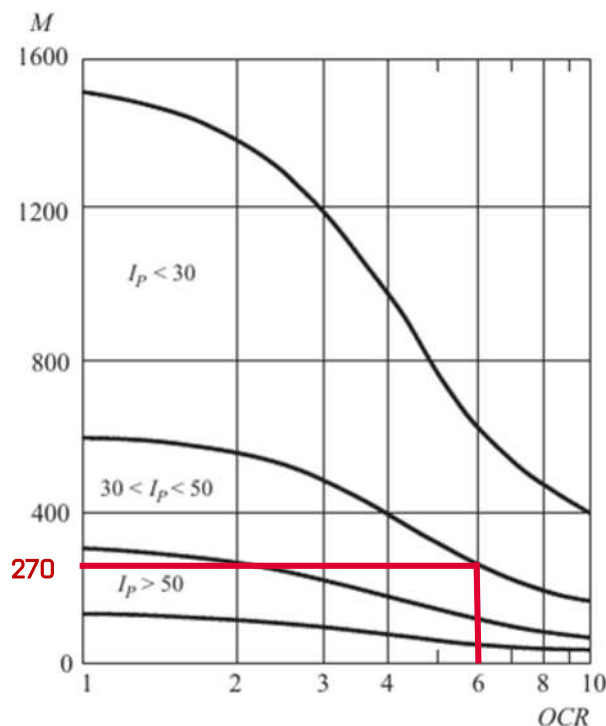
$$POP = \sigma_p - \sigma'_{or} \quad 6.4$$

$$\sigma_p = 0,29 \cdot q_c \quad 6.5$$

| h [m] | q_c [kPa] | σ_p [kPa] | σ_{vo} [kPa] | OCR | POP | q_c/p_a | σ_p/p_a |
|-------|-------------|------------------|---------------------|-------|---------|-----------|----------------|
| 8,40 | 3738,00 | 1084,02 | 176,40 | 6,15 | 907,62 | 37,38 | 10,84 |
| 8,60 | 3525,50 | 1022,40 | 180,60 | 5,66 | 841,80 | 35,26 | 10,22 |
| 8,80 | 4148,00 | 1202,92 | 184,80 | 6,51 | 1018,12 | 41,48 | 12,03 |
| 9,00 | 3810,00 | 1104,90 | 189,00 | 5,85 | 915,90 | 38,10 | 11,05 |
| 9,20 | 3440,50 | 997,75 | 193,20 | 5,16 | 804,55 | 34,41 | 9,98 |
| 9,40 | 3244,00 | 940,76 | 197,40 | 4,77 | 743,36 | 32,44 | 9,41 |
| 9,60 | 4581,50 | 1328,64 | 201,60 | 6,59 | 1127,04 | 45,82 | 13,29 |
| 9,80 | 4146,50 | 1202,49 | 205,80 | 5,84 | 996,69 | 41,47 | 12,02 |
| 10,00 | 4492,50 | 1302,83 | 210,00 | 6,20 | 1092,83 | 44,93 | 13,03 |
| 10,20 | 4268,50 | 1237,87 | 214,20 | 5,78 | 1023,67 | 42,69 | 12,38 |
| 10,40 | 3736,50 | 1083,59 | 218,40 | 4,96 | 865,19 | 37,37 | 10,84 |
| 10,60 | 5720,50 | 1658,95 | 222,60 | 7,45 | 1436,35 | 57,21 | 16,59 |
| 10,80 | 8022,50 | 2326,53 | 226,80 | 10,26 | 2099,73 | 80,23 | 23,27 |
| 11,00 | 4319,00 | 1252,51 | 231,00 | 5,42 | 1021,51 | 43,19 | 12,53 |
| 11,20 | 4434,50 | 1286,01 | 235,20 | 5,47 | 1050,81 | 44,35 | 12,86 |
| 11,40 | 5694,50 | 1651,41 | 239,40 | 6,90 | 1412,01 | 56,95 | 16,51 |
| 11,60 | 6395,50 | 1854,70 | 243,60 | 7,61 | 1611,10 | 63,96 | 18,55 |
| 11,80 | 987,00 | 286,23 | 247,80 | 1,16 | 38,43 | 9,87 | 2,86 |

Tabuľka č. 6.5: Hodnoty korelačnými vzťahmi odvodených parametrov *OCR* a *POP*, priemerná hodnota OCR vo vrstve ílu prachovitého (v hĺbkach 8,4 m – 11,8 m) je 5,99

Z grafu (obrázok č. 6.2) popisujúceho závislosť pomeru prekonsolidácie *OCR* na podieli E_u a s_u (s prihliadnutím na index plasticity) je graficky odvodená hodnota neodvodneného modulu E_u (vzhľadom k tomu, že sa jedná o prekonsolidovaný íl, ďalej bude používané označenie $E_{u,ur}$).



Obrázok č. 6.2: Závislosť OCR na podieli E_{us}/s_u (v grafe označený ako M , odčítaná hodnota 270)

Následne je pomocou vzťahu **6.6** modul tuhosti $E_{u,ur}$ prevedený na efektívny modul tuhosti E'_{ur} (jeden zo vstupných parametrov). V uvedenom vzťahu značí ν'_{ur} Poissonovo číslo (uvažovaná hodnota 0,15).

$$\frac{E_{u,ur}}{E'_{ur}} = \frac{3}{2 \cdot (1 + \nu'_{ur})} \quad 6.6$$

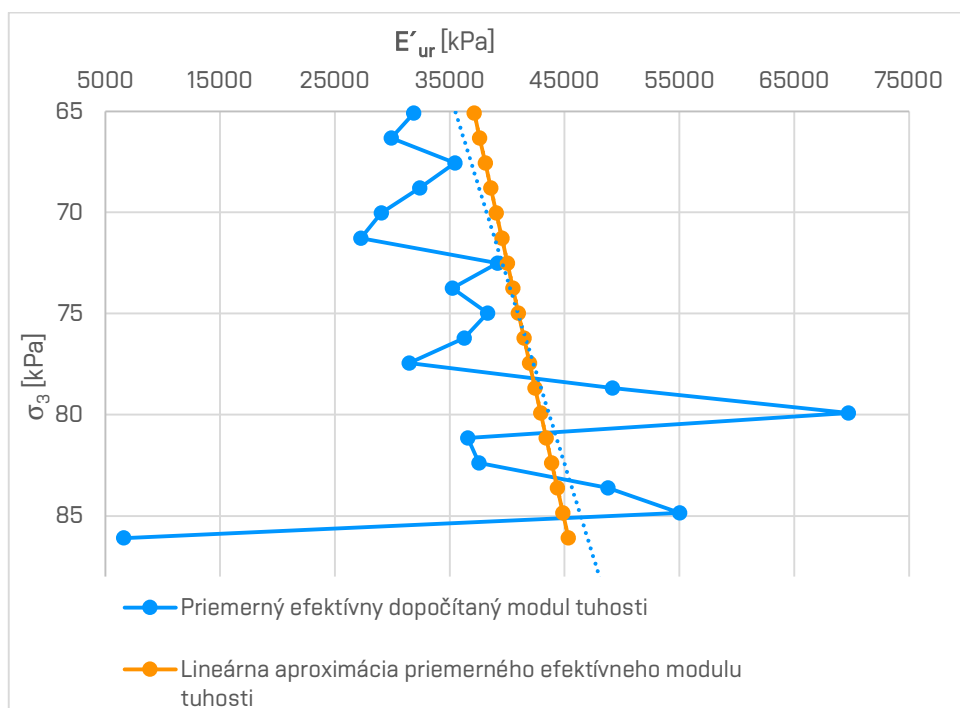
Potom je zostavený priebeh efektívneho modulu tuhosti na hĺbky, grafickou lineárnou aproximáciou trendu tejto závislosti sa získa referenčný modul tuhosti E_{ur}^{ref} (dopočítaný podľa rovnice č. **6.7**, tabuľka č. **6.4**, graf č. **6.7**) a exponent m (riadiaci závislosť deformačných charakteristík na napätí):

$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \cdot \left(\frac{c' \cdot \cotg \varphi' + \sigma_3'}{c' \cdot \cotg \varphi' + \sigma_{3,ref}} \right)^m \quad 6.7$$

V tomto vzťahu reprezentuje c' efektívnu súdržnosť (kohézia), φ' efektívny uhol vnútorného trenia a σ_3' geostatické napätie. Veličina $\sigma_{3,ref}$ symbolizuje referenčnú hodnotu napätia, je uvažovaná hodnota $\sigma_{3,ref} = 100$ kPa.

| h [m] | $E_{u,ur1}$ [kPa] | $E_{u,ur2}$ [kPa] | E'_{ur1} [kPa] | E'_{ur2} [kPa] | $E'_{ur,av}$ [kPa] |
|-------|-------------------|-------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 8,40 | 48081,6 | 64108,8 | 36862,6 | 49150,1 | 43006,3 |
| 8,60 | 45156,2 | 60208,2 | 34619,7 | 46159,6 | 40389,7 |
| 8,80 | 53503,2 | 71337,6 | 41019,1 | 54692,2 | 47855,6 |
| 9,00 | 48883,5 | 65178,0 | 37477,4 | 49969,8 | 43723,6 |
| 9,20 | 43838,6 | 58451,4 | 33609,6 | 44812,7 | 39211,1 |
| 9,40 | 41129,1 | 54838,8 | 31532,3 | 42043,1 | 36787,7 |
| 9,60 | 59128,7 | 78838,2 | 45332,0 | 60442,6 | 52887,3 |
| 9,80 | 53199,5 | 70932,6 | 40786,2 | 54381,7 | 47584,0 |
| 10,00 | 57813,8 | 77085,0 | 44323,9 | 59098,5 | 51711,2 |
| 10,20 | 54733,1 | 72977,4 | 41962,0 | 55949,3 | 48955,7 |
| 10,40 | 47494,4 | 63325,8 | 36412,3 | 48549,8 | 42481,1 |
| 10,60 | 74221,7 | 98962,2 | 56903,3 | 75871,0 | 66387,1 |
| 10,80 | 105242,0 | 140322,6 | 80685,5 | 107580,7 | 94133,1 |
| 11,00 | 55188,0 | 73584,0 | 42310,8 | 56414,4 | 49362,6 |
| 11,20 | 56690,6 | 75587,4 | 43462,8 | 57950,3 | 50706,5 |
| 11,40 | 73643,9 | 98191,8 | 56460,3 | 75280,4 | 65870,3 |
| 11,60 | 83050,7 | 110734,2 | 63672,2 | 84896,2 | 74284,2 |
| 11,80 | 9979,2 | 13305,6 | 7650,7 | 10201,0 | 8925,8 |

Tabuľka č. 6.6: Hodnoty dopočítaných efektívnych modulov tuhosti v riešenom hĺbkovom intervale pre íl prachovitý (v poslednom stĺpci priemerný efektívny modul tuhosti $E'_{ur,av}$)



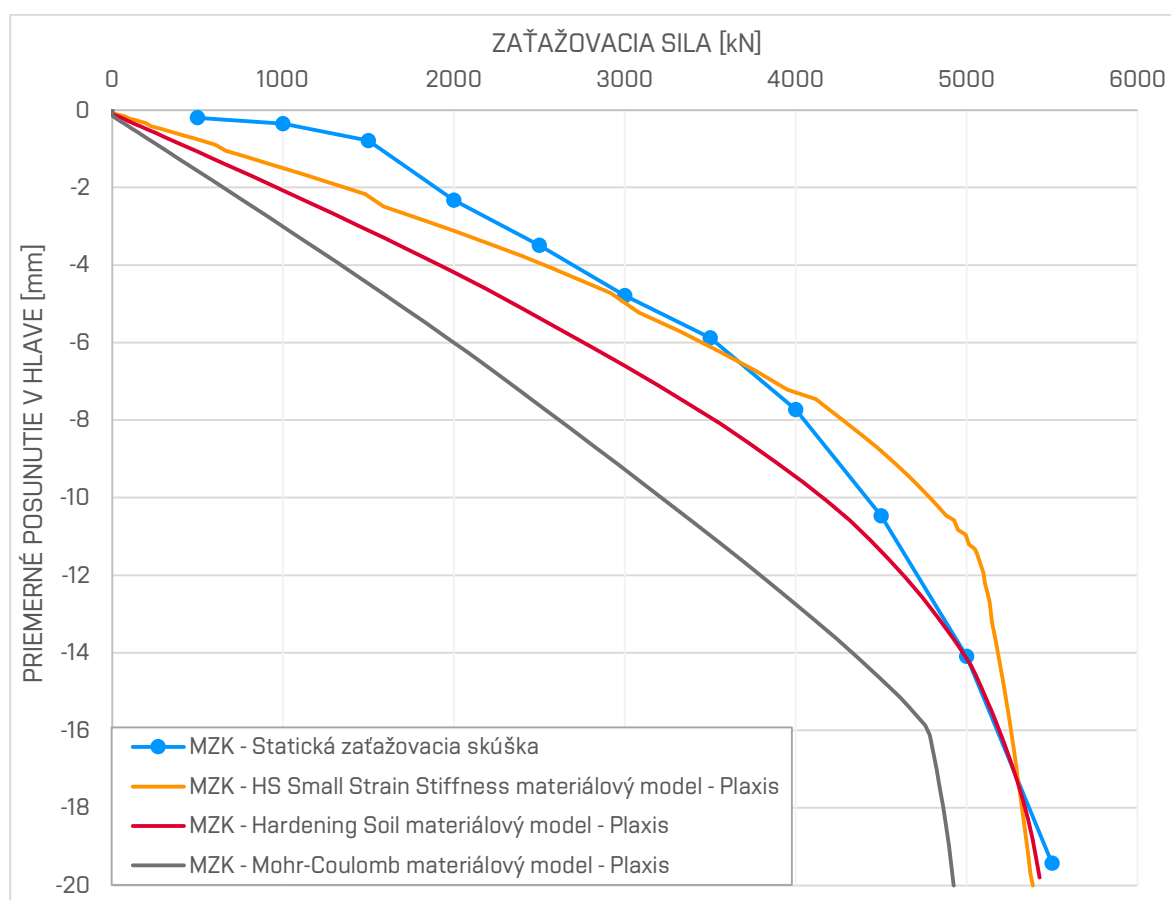
Graf č. 6.6: Závislosť modulu tuhosti E_{ur} na referenčnom napätí σ_3

Po získaní E_{ur}^{ref} je sečnicový referenčný modul z triaxiálnej skúšky E_{50}^{ref} a dotyčnicový referenčný modul z edometrickej skúšky E_{oed}^{ref} dopočítaný pomocou empirického vzorca č. 6.8:

$$E_{ur}^{ref} = 3E_{50}^{ref} = 3E_{oed}^{ref} \quad 6.8$$

6.2.2 Výsledky inverznej analýzy pomocou MKP

Podobne ako pri pilóte Z202, získané dáta z CPT a z odvodenia v predchádzajúcej kapitole boli použité ako vstup do materiálových modelov (graf 6.8, tabuľka č. 6.8, 6.9 a 6.10)



Graf č. 6.7: Porovnanie MZK z uskutočnenej zaťažovacej skúšky a jej simulácie v programe Plaxis 2D pre jednotlivé materiálové modely (Z203)

Kedže sa veľká časť pilóty nachádza v súdržných zeminách, nebol analyzovaný vplyv uhlu dilatancie na medznú zaťažovaciu krivku a prenosové funkcie. Na vykreslenie prenosových funkcií (graf č. 6.9) a závislosti napätia σ_{xx} na posune stredu segmentu (graf č. 6.10) bol vybraný materiálový model Hardening Soil.

| Zemina | Materiálový model | Hĺbka [m] | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] | E_{50}^{ref} [MPa] | E_{oed}^{ref} [MPa] | E_{ur}^{ref} [MPa] | G_0^{ref} [MPa] | $\gamma_{0,7}$ [-] | m [-] | c'_{ref} [kPa] | ϕ [°] | ψ [°] |
|----------------|---|------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-------------------|--------------------|---------|------------------|------------|------------|
| ŠTRK s pieskom | Hardening soil | 0,0 - 6,0 | 19,5 | 20,5 | 50 | 50 | 150 | - | - | 0,00 | 0,0 | 37 | 15 |
| ÍL prachovitý | Hardening soil - Small Strain Stiffness | 6,0 - 36,0 | 19 | 21 | 22 | 22 | 54 | 60 | 0,0002 | 0,50 | 12,0 | 25 | 2 |

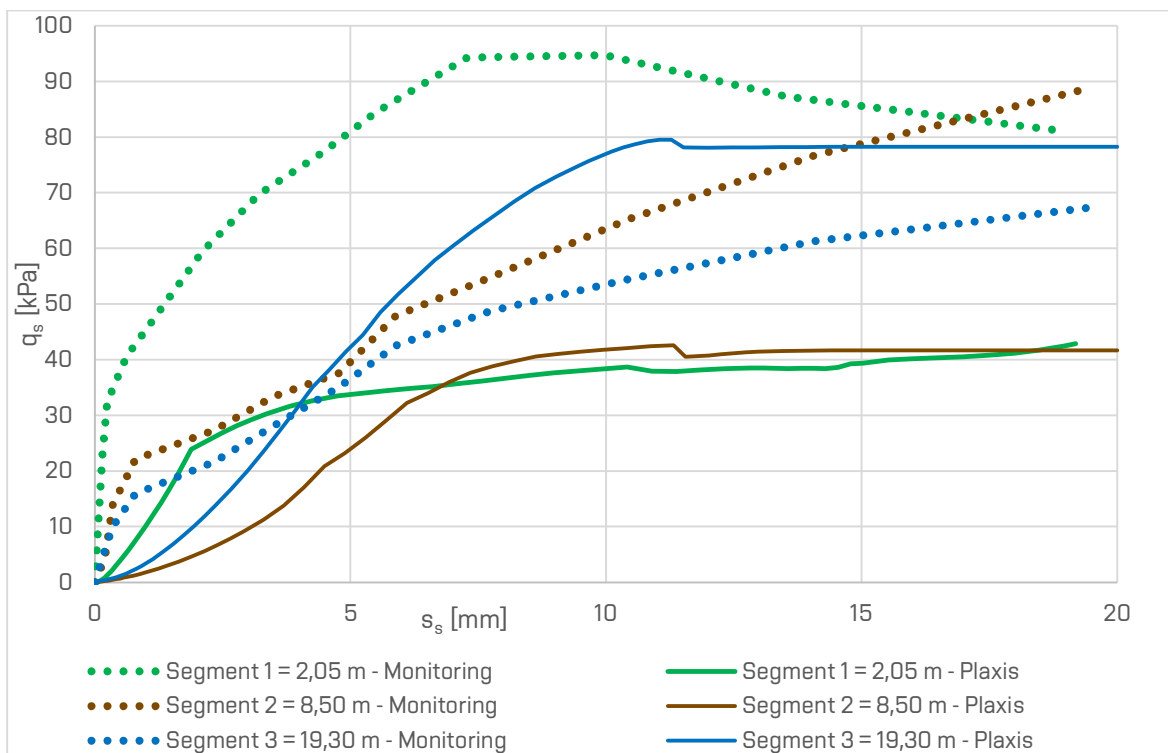
Tabuľka č. 6.7: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Hardening Soil – Small Strain Stiffness

| Zemina | Materiálový model | Hĺbka [m] | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] | E_{50}^{ref} [MPa] | E_{oed}^{ref} [MPa] | E_{ur}^{ref} [MPa] | m [-] | c'_{ref} [kPa] | ϕ [°] | ψ [°] |
|----------------|-------------------|------------|---------------------------------------|-------------------------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|---------|------------------|------------|------------|
| ŠTRK s pieskom | Hardening soil | 0,0 - 6,0 | 19,5 | 20,5 | 50 | 50 | 150 | 0,00 | 0,0 | 37 | 15 |
| ÍL prachovitý | Hardening soil | 6,0 - 36,0 | 19 | 21 | 22 | 22 | 54 | 0,50 | 12,0 | 25 | 2 |

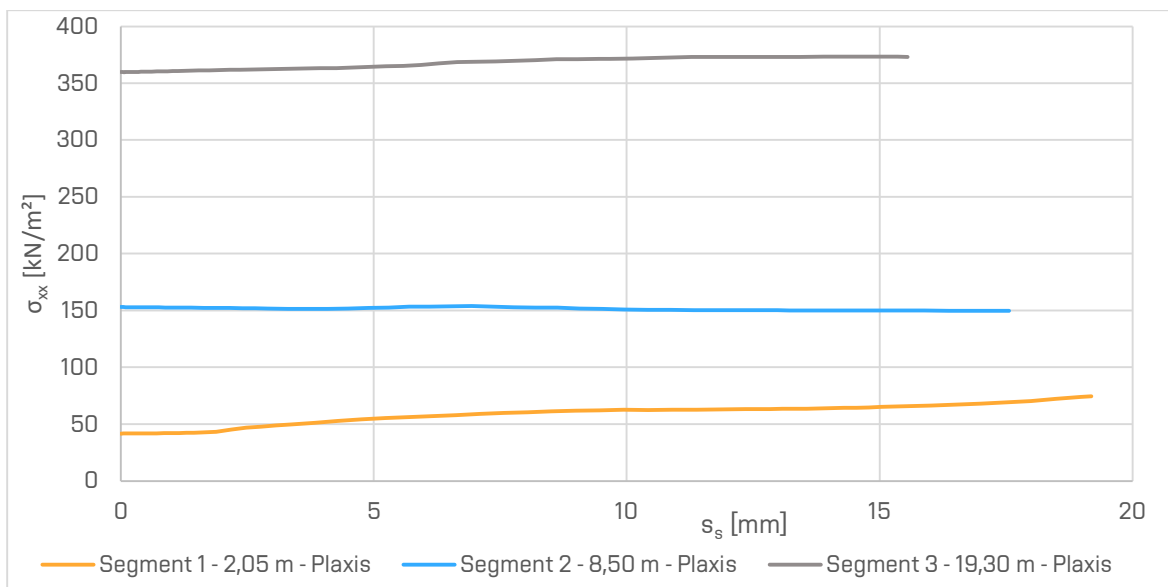
Tabuľka č. 6.8: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Hardening Soil

| Zemina | Materiálový model | Hĺbka [m] | γ_{unsat} [kN/m ³] | γ_{sat} [kN/m ³] | E' [MPa] | ν [-] | c'_{ref} [kPa] | ϕ [°] | ψ [°] |
|----------------|-------------------|------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------------|-----------|------------------|------------|------------|
| ŠTRK s pieskom | Mohr-Coulomb | 0,0 - 6,0 | 19,5 | 20,5 | 47 | 0,15 | 0,0 | 37 | 15 |
| ÍL prachovitý | Mohr-Coulomb | 6,0 - 36,0 | 19 | 21 | 21 | 0,15 | 12,0 | 25 | 2 |

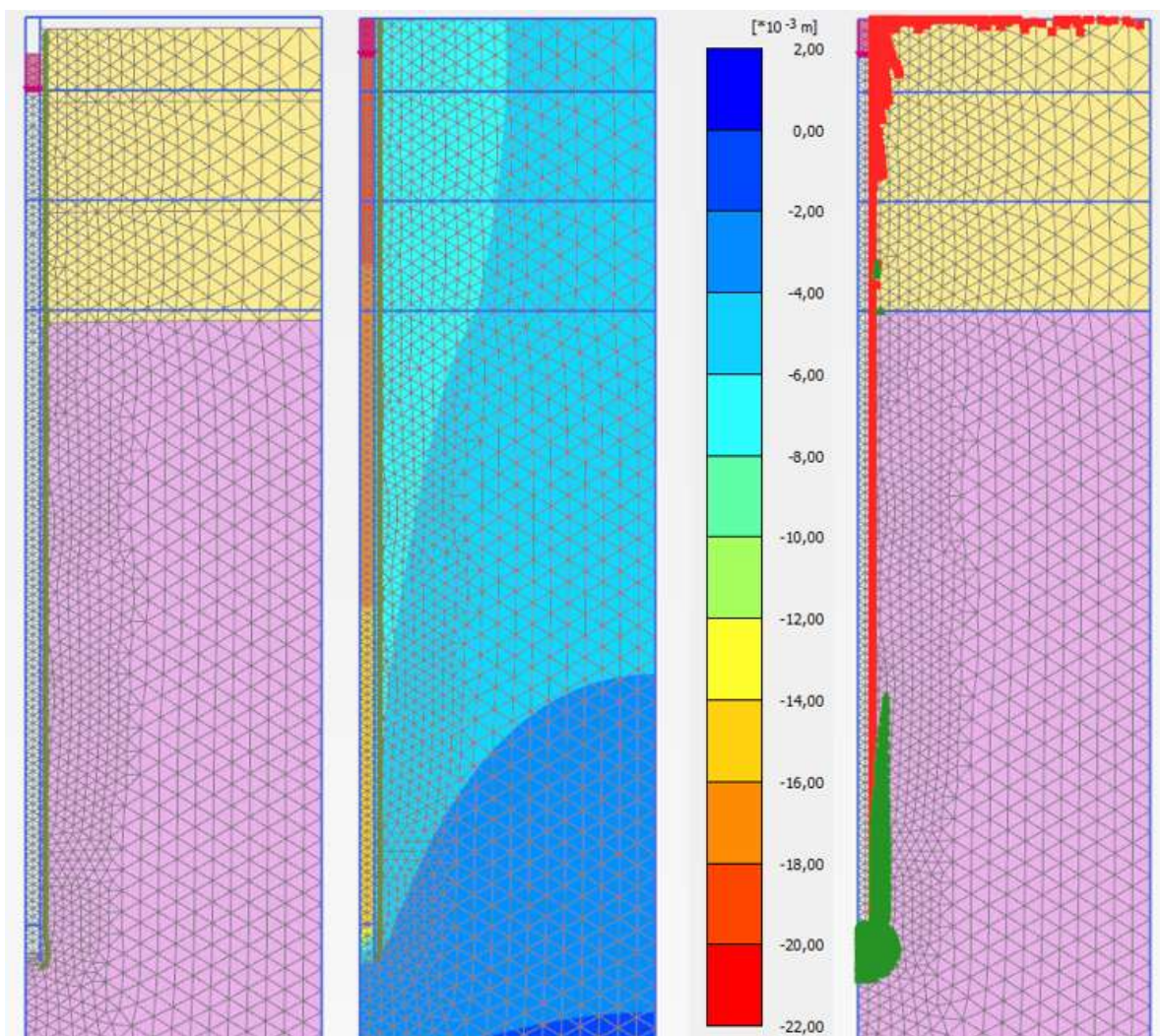
Tabuľka č. 6.9: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Mohr-Coulomb



Graf č. 6.8: Porovnanie prenosových funkcií segmentov zo zaťažovacej skúšky a jej simulácie pomocou MKP (Hardening Soil materiálový model) (Z203)



Graf č. 6.9: Závislosť kartézskeho totálneho napätia σ_{xx} na rastúcom posune stredu segmentu (Z203)

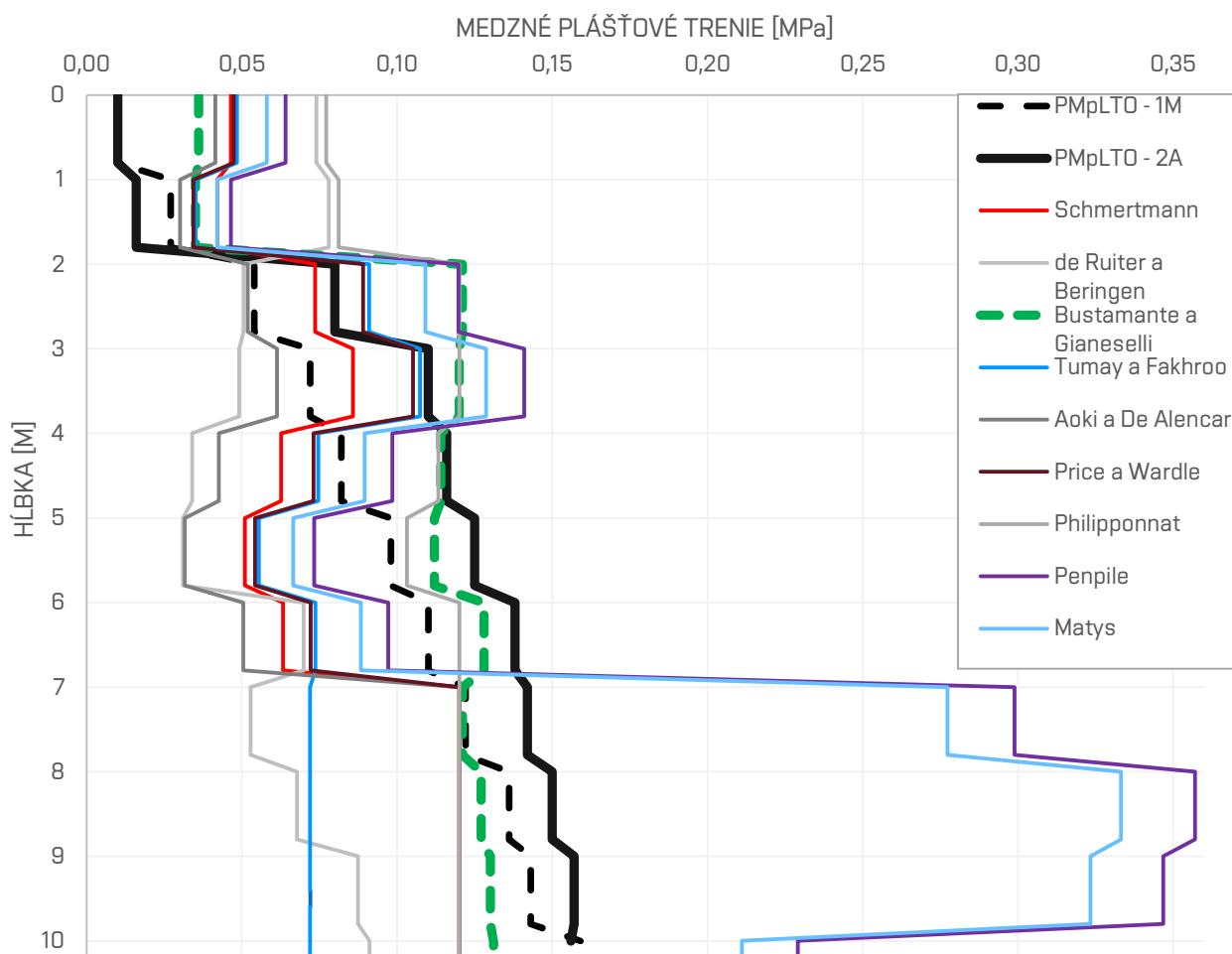


Obrázok č. 6.3: V ľavej časti je zobrazená deformovaná sieť MKP pri poslednom zaťažovacom stupni v mierke 50:1, uprostred sa nachádza grafické zobrazenie posunu po výške pilóty, vpravo sú vyznačené plastické body (červenou farbou Failure points a zelenou farbou Hardening points) (Z203)

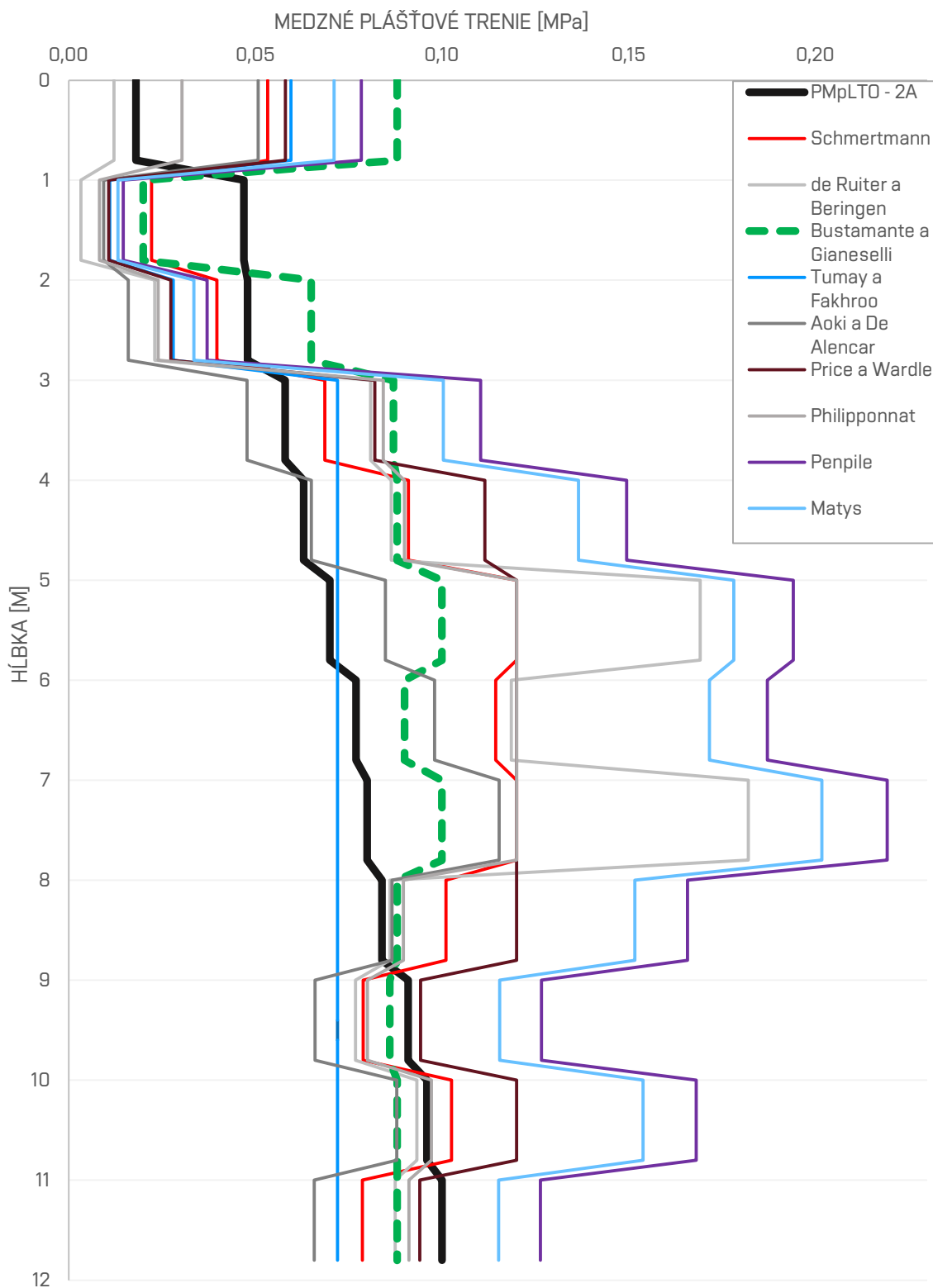
7 STANOVENIE MEDZNÝCH PLÁŠŤOVÝCH TRENÍ Z CPT POMOCOU PRIAMYCH KORELAČNÝCH METÓD A POROVNANIE S VÝSLEDKAMI INVERZNEJ ANALÝZY (MPF)

7.1.1 Porovnanie priebehu medzného plášťového trenia získaného z priamych metód vyhodnotenia CPT a spätnej analýzy

Vypočítané závislosti $q_{s,ult}$ (predpokladaného medzného plášťového trenia) na hĺbke pomocou priamych korelačných metód (kapitola č. 2.1.3) z výsledkov CPT boli porovnané s výsledkami spätnej analýzy pomocou MPF v stupňoch 1M, 2A (kapitola č. 2.2.3). Plnohodnotné protokoly je možné nájsť v prílohách (prílohy č. 7.1.1, 7.1.2).



Graf č. 7.1: Porovnanie závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke z priamych korelačných metód a spätnej analýzy pomocou MPF (pilóta Z202)



Graf č. 7.2: Porovnanie závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke z priamych korelačných metód a spätnej analýzy pomocou MPF (pilóta Z203)

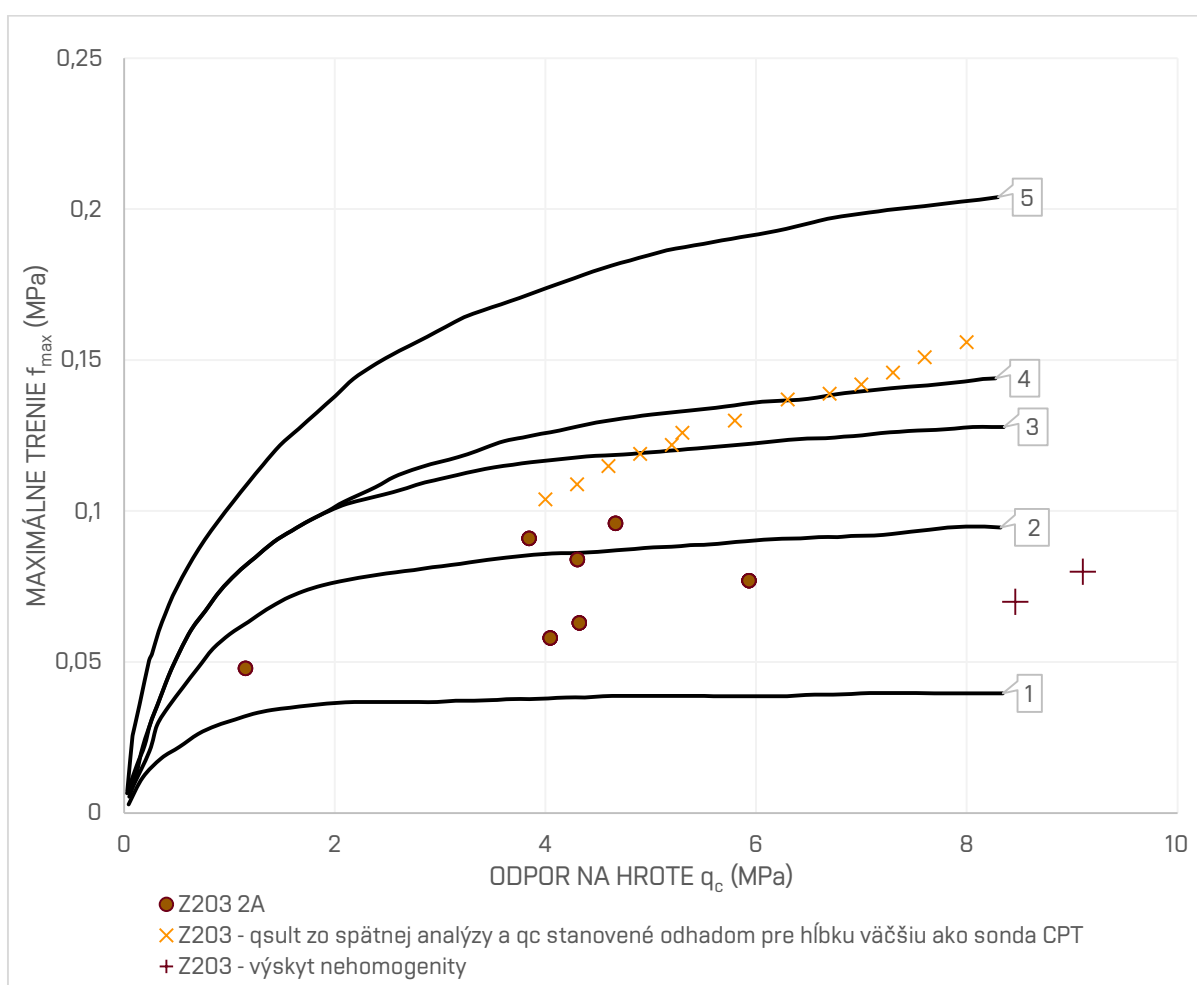
7.1.2 Vyhodnotenie použitých metód v prehľadnej tabuľke

| Poradové číslo metódy | Názov metódy | Vzorec pre výpočet plášťového trenia | Maximálne odporúčané aplikované plášťové trenie [kPa] | Metóda určená pre technológiu zhotovenia pílôt: | Krajina pôvodu metódy: | Zhoda s krivkami zo spätnej analýzy: | |
|-----------------------|--|---|---|---|----------------------------|--------------------------------------|------|
| | | | | | | Z202 | Z203 |
| 1 | Schmertmannova metóda | $q_{sult} = \alpha_c f_s$ | 120 | bez rozlíšenia | USA (Florida) | | |
| 2 | Matysova metóda | $q_{sult} = \alpha_s f_s$ $q_{sult} = \alpha_c q_c$ | žiadna limitácia | vibrované, VÚS, vŕtané | Slovensko | | |
| 3 | De Ruijterova a Beringenova metóda | $q_{sult} = \beta S_{u(sitde)}$ $q_{sult} = \min \left\{ \begin{array}{l} f_s \\ \frac{q_c(sitde)}{300} \\ \frac{q_c(sitde)}{400} \end{array} \right.$ | 120 | bez rozlíšenia | Holandsko/krajiny Beneluxu | | |
| 4 | Metóda LCPC (Bustamanteho a Gianeselliho metóda) | - | podľa hodnotiacej krivky z grafu | pre takmer všetky typy pílôt | Frančúzsko | | |
| 5 | Tumayova a Fakhrova metóda (Metóda CONE-M) | $m = 0.5 + 9.5e^{-9.5lor}$ $q_{sult} = mf_s$ | 72 | bez rozlíšenia | USA (Louisiana) | | |
| 6 | Aokino a De Alencarova metóda | $q_{sult} = q_c(sitde) \frac{\alpha_s}{F_s}$ | 120 | zarúčané, na mieste betónované, razené | Japonsko/Brazília | | |
| 7 | Pricova a Wardleova metóda | $q_{sult} = k_s f_s$ | 120 | vŕtané, razené, injektované | Anglicko | | |
| 8 | Philippomatova metóda | $q_{sult} = \frac{\alpha_s}{F_s} q_{cs}$ | 120 | bez rozlíšenia | Frančúzsko | | |
| 9 | Metóda Penpile | $q_{sult} = \frac{f_s}{1.5 + 0.1f_s}$ | žiadna limitácia | bez rozlíšenia | USA (Mississippi) | | |

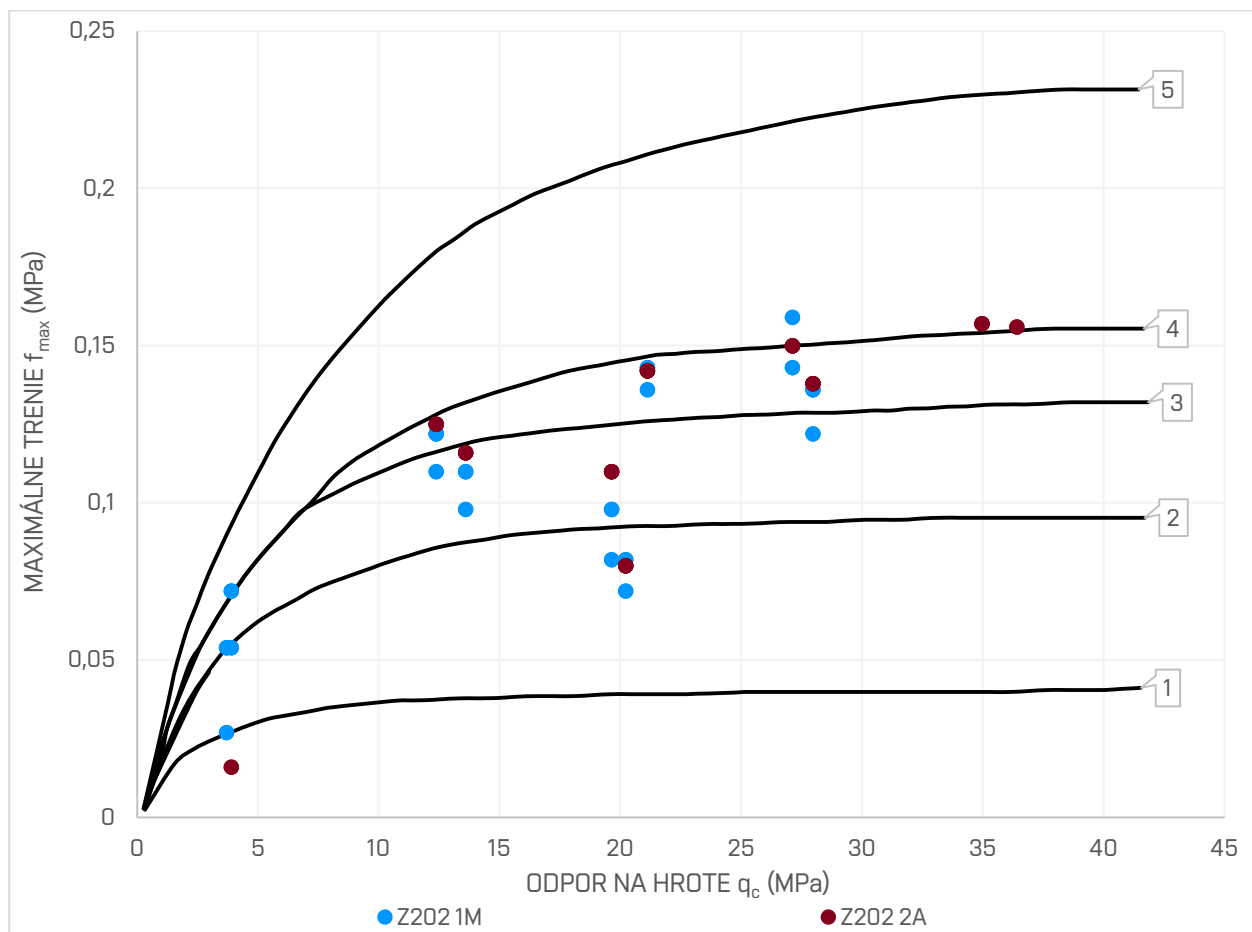
Tabuľka č. 7.1: Sumarizácia a vyhodnotenie zhody použitých priamych korelačných metód s výsledkami inverznej analýzy pomocou MPF

Na základe grafického a výpočtového vyhodnotenia sa ako najpresnejšia z porovnávaných metód v riešenej štúdií ukázala byť metóda LCPC (*Bustamanteho a Gianeselliho metóda*^[3], tabuľka č. 7.1, graf č. 7.1 a 7.2). V tejto metóde je zanedbané namerané plášťové trenie (na rozdiel od ostatných metód), získaný odpor na hrote je priemerovaný pre jednotlivé vrstvy zeminy (v tomto prípade s hrúbkou 20 cm), následne na základe technológie vyhotovenia pilóty a typu zeminy je pilóte priradená grafická krivka (pre pilótu Z202 to bola krivka č. 3, v prípade pilóty Z203 krivka č. 2), z ktorej sa pre príslušný priemerovaný odpor na hrote odčíta hodnota maximálneho plášťového trenia.

Jednotlivé zistené medzné plášťové trenia z inverznej analýzy (spolu s odporom na hrote z CPT) boli spätne vynesené aj do grafov (ilustrácia a overenie správnosti vybraných kriviek) pre určovanie maximálneho plášťového trenia LCPC metódy (grafy č. 7.3 a 7.4)



Graf č. 7.3: Vynesenie hodnôt medzného plášťového trenia zo spätnej analýzy (MPF) a odporu na hrote z CPT do grafu LCPC (íl – prach, pilóta Z203)



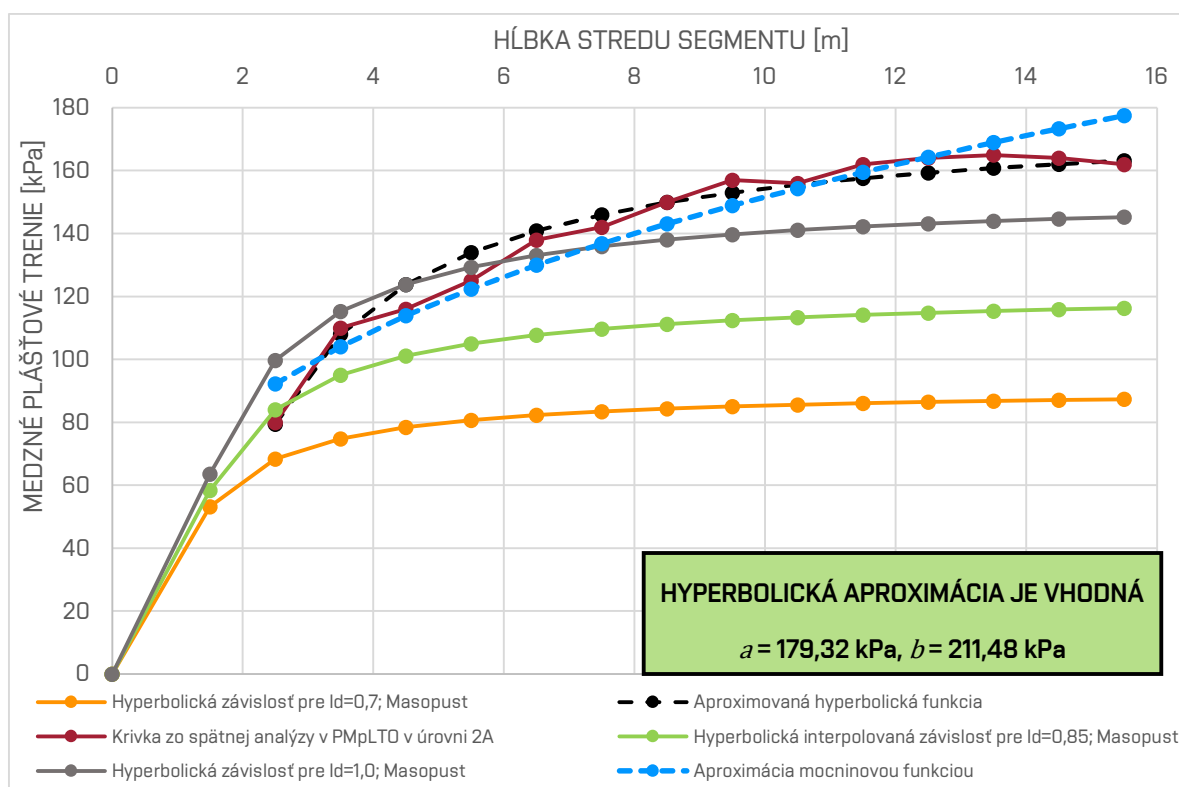
Graf č. 7.4: Vynesenie hodnôt medzného plášťového trenia zo spätnej analýzy a odporu na hrote z CPT do grafu LCPC (piesok - štrk, pilóta Z202)

V prípade pilóty č. Z202 sa body vyskytujú zhruba v očakávanej zóne (medzi krivkami **3** a **4**). Keďže pre pilótu Z203 nedosiahla CPT sonda hĺbku päty pilóty, pre medzné plášťové trenia zo spätnej analýzy (pod hĺbku CPT sondy) bol extrapolovaný predpokladaný vývoj odporu na hrote až po päť pilóty (pre ilustračné zobrazenie v grafe č. 7.3).

8 REGRESNÁ ANALÝZA ZÁVISLOSTÍ: MEDZNÉ PLÁŠŤOVÉ TRENIE - HĽBKA

8.1 Regresná analýza skúšobnej zatažovacej pilóty Z202 mostného objektu C202 – cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat

Hyperbolické závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke (vypočítané podľa rovnice č. 2.52 uvedenej v kapitole č. 2.4, *Masopust*^[3]) pre riešený typ zeminy (priemerná hodnota indexu uľahlosti pre nesúdržné zeminy získaná z korelačných vzťahov z vlastného vyhodnotenia v MS Excel bola $I_d = 0,85$, príloha č. 4.1.2) boli vynesené do grafu a porovnané so získanými hyperbolickými závislosťami zo spätnej analýzy pomocou MPF (graf č. 8.1).

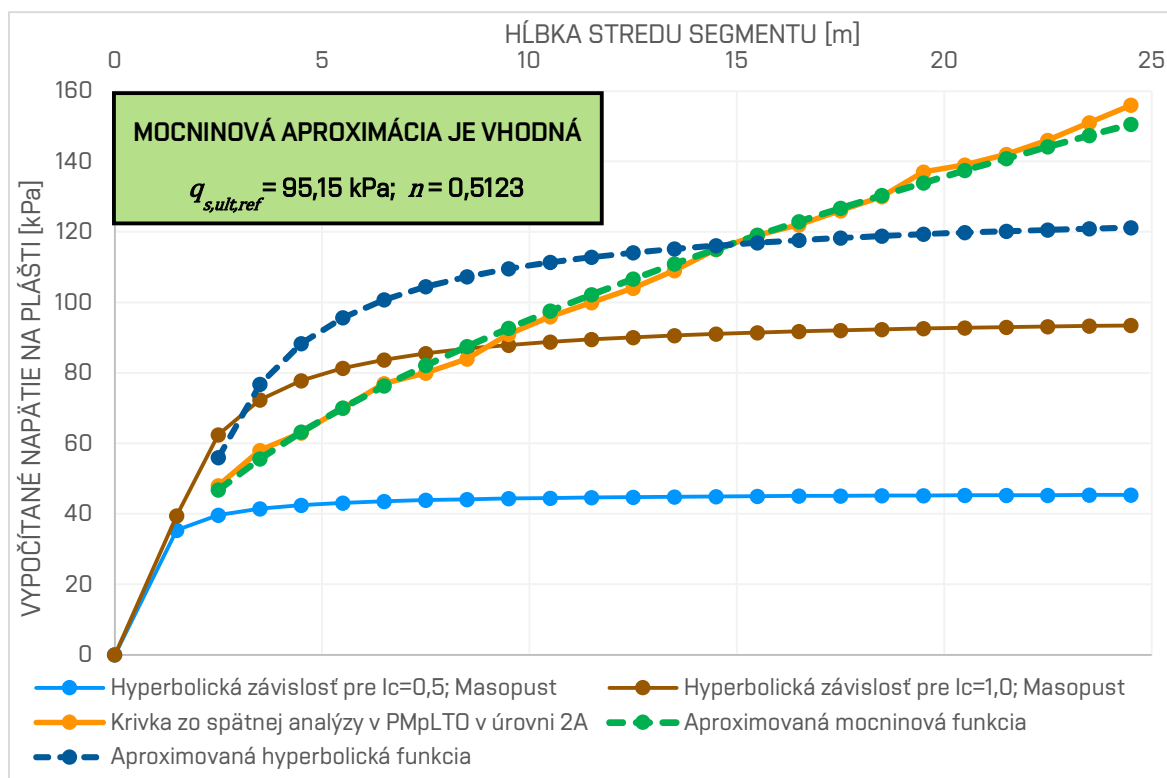


Graf č. 8.1: Porovnanie hyperbolických závislostí z nelineárnej metódy s dátami zo spätnej analýzy a aproximácia týchto dát hyperbolickou funkciou (Z202)



Pilóta Z202 (s dĺžkou 16,4 m) je situovaná v nesúdržných štrkovitých pieskoch. Do grafu č. 8.1 sú vynesené hyperbolické závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke (podľa *Masopusta*^[3]) pre $I_d = 0,7$; $I_d = 1,0$ a interpolovaná krivka pre $I_d = 0,85$. Zo spätnej analýzy pomocou MPF v stupni 2A vyplýva (kapitola 5.1.2), že hodnota faktoru β s hĺbkou klesá rýchlejšie ako narastá hodnota efektívneho napätia σ'_{or} , dochádza k ustáleniu medzného plášťového trenia na hodnote približne 164 kPa (*Rollins*^[43]). Vynesenú krivku zo spätnej analýzy je v tomto prípade možné aproximovať hyperbolickou funkciou, ktorá má hodnoty regresných koeficientov $a = 179,21$; $b = 211,48$. Keďže koeficient a predstavuje asymptotu, limitujúcu maximálne medzné plášťové trenie, oproti interpolovanému koeficientu z nelineárnej metódy^[3] (približne 120 kPa) je faktor a odvodený z výsledkov CPT a inverznej analýzy zatažovacej skúšky pilóty pomocou MPF takmer o 50% väčší.

8.2 Regresná analýza skúšobnej zaťažovacej pilóty Z203 mostného objektu C203 – cesta I. triedy I/11 Nebory – Oldřichovice



Graf č. 8.2: Porovnanie hyperbolických závislostí z nelineárnej metódy s dátami zo spätnej analýzy a aproximácia týchto dát mocninovou funkciou (Z203)

Pilóta Z203 (s dĺžkou 24,8 m) je situovaná v prostredí ílovca/prachovca zvetralého až na súdržnú zeminu s konzistenciou veľmi pevná (tvrdá). Pre túto pilótu má medzné plášťové trenie v hĺbkovej úrovni nad 15 m približne lineárny rastúci trend v dôsledku poklesu faktoru β takmer až na konštantnú hodnotu (viď. kapitola 5.2.1.). V tomto prípade na základe zistených skutočností je možné konštatovať, že hyperbolická aproximácia nie je vhodná a bolo potrebné nájsť výstižnejšiu aproximačnú funkciu. Ako dostatočne vhodná sa javí mocninová aproximácia (graf č. 8.2; rovnica č. 8.1). Pri spätnom pokuse o aplikáciu mocninovej aproximácie na prvú riešenú pilótu Z202 (graf č. 8.1) sa ukázalo, že v tomto prípade pilóty v nesúdržných zeminách je presnejšia pôvodná hyperbolická závislosť (rovnica č. 2.52).

Aproximácia závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke pomocou mocnínovej funkcie bola formulovaná pomocou vzťahu **8.1**. Závislosť je vzťahnutá k referenčnému medznému plášťovému treniu v referenčnej hĺbke, v konkrétnom prípade súdržných zemín prostredia pilóty Z203 sa jedná o medzné plášťové trenie 95,15 kPa v hĺbke 10 m.

$$q_{s,ult} = q_{s,ult,ref} \left(\frac{d_i}{d_{ref}} \right)^n \quad 8.1$$

- d_i hĺbka stredu segmentu pre výpočet medzného plášťového trenia
- $q_{s,ult,ref}$ referenčná hodnota medzného plášťového trenia v hĺbke d_{ref}
- d_{ref} referenčná hĺbka, ku ktorej vzťahujeme výpočet pre ostatné hĺbkové úrovne (10 m)
- n odvodený koeficient (exponent mocnínovej funkcie)

| Označenie pilóty | Z202 (Krnov) | | Z203 (Třinec) | | | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|--------------------|
| Typ geologického prostredia | PIESOK štrkovitý | | ÍLOVEC/PRACHOVEC zvetralý | | | | |
| Dĺžka pilóty v zemi [m] | 16,40 | | 24,80 | | | | |
| Typ použitej funkcie | hyperbolická | mocnínová | hyperbolická | mocnínová | | | |
| Predpis funkcie | $q_{s,ult} = a - \frac{b}{D_1/d_i}$ | | - | $q_{s,ult} = a - \frac{b}{D_1/d_i}$ | | | |
| Odvodené koeficienty | $a = 179,23$ [kPa] | $b = 211,48$ [kPa] | NEVHODNÁ | NEVHODNÁ | $q_{s,ult,ref} = 95,15$ [kPa] | $n = 0,5123$ | $d_{ref} = 10$ [m] |

Tabuľka č. 8.1: Zhrnutie použitých funkcií a koeficientov pre aproximáciu závislosti plášťového trenia na hĺbke

9 ZÁVER

V úvodnej časti práce bola objasnená teoretická stránka problematiky testovania a vyhodnocovania statických penetračných skúšok, metódy prenosových funkcií a základných materiálových modelov pre numerické modelovanie pomocou metódy konečných prvkov.

Prvá časť práce sa týkala vyhodnotenia a geotechnickej interpretácie statických zaťažovacích skúšok osamelých pilót. Bola vykreslená medzná zaťažovacia krivka, vypočítané a graficky znázornené priebehy prenosu síl po dĺžke pilóty, stanovené veľkosti síl, prenášané jednotlivými segmentami, taktiež závislosti pomerných pretvorení a posunutí segmentov na hĺbke. Zo síl prenášaných segmentami boli získané plášťové trenia segmentov pri jednotlivých zaťažovacích stavoch, zo závislostí plášťového trenia segmentu na posune stredu segmentu zostavené prenosové funkcie.

Práca sa potom venovala problematike vyhodnotenia sond CPT podľa *Robertsona*^{[6][10]} v softvéri *CPeT-IT*^[5] a vlastnému vyhodnoteniu v *MS Excel*. Na základe týchto dát (zahrnutia mechanických vlastností zemín do klasifikácie) a informáciám z vrtu pilóty počas hĺbenia pilóty boli zostavené výpočtové profily pre obe pilóty. Z výsledkov bolo možné vydedukovať, že pilóty sa nachádzajú v rôznych geologických podmienkach, pilóta Z202 má prevažnú časť drieku v uľahlých štrkovitých pieskoch a pilóta Z203 v súdržných zeminách konzistencie veľmi pevná (ČSN EN ISO 14688^[N2]), tvrdá (ČSN 75 2410^[N1], ČSN P 73 1005^[N3]).

Inverzná analýza metódou prenosových funkcií pre pilóty umožnila vypočítať a vykresliť závislosti medzného plášťového trenia a koeficientu β na hĺbke. Pre pilóty obe pilóty sa podarilo medznými zaťažovacími krivkami zo spätnej analýzy dostatočne priblížiť k MZK z reálnych zaťažovacích skúšok.

Obe zaťažovacie skúšky boli nasimulované v softvéri *Plaxis 2D*^[7] s využitím niekoľkých materiálových modelov. Po dosadení pevnostných a deformačných parametrov odvodených z výsledkov CPT bola dosiahnutá dobrá zhoda simulovanej medznej zaťažovacej krivky s meranou MZK pre materiálový model HS Small Strain Stiffness.

Bola využitá aj možnosť predikovať únosnosť pilót z CPT pomocou priamych metód s využitím korelačných vzťahov a výsledky porovnať so spätnou analýzou pomocou MPF. Do porovnania bolo zahrnutých 9 metód, pričom najlepšia zhoda bola dosiahnutá pri francúzskej metóde LCPC (*Bustamante a Gianeselli*)^[13].



Posledná časť bola zameraná na odvodenie nových regresných koeficientov pre medzné plášťové trenie v *Masopustovej*^[3] nelineárnej metóde výpočtu sadania pilót. Hyperbolická aproximácia sa potvrdila v prípade pilóty Z202 v nesúdržných zeminách, avšak pre súdržné zeminy s vysokým indexom konzistencie bolo nutné nájsť vhodnejšiu funkciu, ktorá popisuje závislosť medzného plášťového trenia na hĺbke, v tomto konkrétnom prípade sa dostatočne presnou javí byť funkcia mocninová (*power law*). Práca však v tomto smere rieši dve pilóty, bolo by vhodné zistenia potvrdiť pre široké spektrum pilót rôznych dĺžok a priemerov v rôznorodom geologickom prostredí.

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮV

Bibliografické odkazy z knižnej literatúry:

- [1] HULLA, J. & TURČEK, P. . *Zakladanie stavieb*. Jaga Group. 2004. 350 s. ISBN 978-8-0807- 6023-6
- [2] MASOPUST, J. & GLISNÍKOVÁ , V., 2007. *Zakládání staveb, modul M01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o.
- [3] MASOPUST, J. , 1994. *2 Únosnost svisle zatížených vrtaných pilot. V: Vrtané piloty*. Praha: Čeněk a Ježek s. r. o., pp. 66 - 92.
- [4] BOHN, C., LOPES DOS SANTOS, A. & FRANK, R ., 2016. *Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, July 25
- [5] POULOS, E. H. & DAVIS, H. G. , 1980. *5.3 Theoretical Solutions for Settlement and Load Distribution. V: Pile Foundation Analysis and Design*. New York: J. Wiley and Sons.
- [6] LUNNE, Tom, Peter K. ROBERTSON a John J.M POWELL . *Cone penetration testing in geotechnical practice*. London: E & FN Spon, 1997. ISBN 0-419-23750-X.
- [7] MASOPUST J. (2018). *Závěrečná zpráva o výsledcích studijní statické zatěžovací zkoušky mimosystémové piloty Z210*.
- [8] MASOPUST J. (2019). *Závěrečná zpráva o výsledcích studijních statických zatěžovacích zkoušek lamel podzemních stěn ZL 01, ZL 02 a ZL 03*.
- [9] ROBERTSON P; CAMPANELLA R. (1983). *Interpretation of Cone Penetration Tests Part I (Clay) and Part II (Sand)*. Peter K. Robertson.
- [10] ROBERTSON, P. K. (2009). *Interpretation of cone penetration tests - A unified approach. Canadian Geotechnical Journal*, 46(11), 1337–1355. <https://doi.org/10.1139/T09-065>
- [11] MAYNE P. (2007) . *Cone Penetration Testing*.
- [12] MELNIKOV, R., ZAZULYA, J., STEPANOV, M., ASHIKHMIN, O., & MALTSEVA, T. (2016). *OCR and POP Parameters in Plaxis-based Numerical Analysis of Loaded over Consolidated Soils. Procedia Engineering*, 165, 845–852. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.11.783>

- [13] SARI, P. T. K., & WARDANI, M. K. (2021). *The Comparison of Pile Bearing Capacity using 8 Direct Method based on CPT data in Surabaya Area*. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1144(1), 012091. <https://doi.org/10.1088/1757-899x/1144/1/012091>
- [14] ROBERTSON, P. K. (2016). *Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system - An update*. Canadian Geotechnical Journal, 53(12), 1910–1927. <https://doi.org/10.1139/cgj-2016-0044>
- [15] TITI, H. H., MURAD, P. E., & ABU-FARSAKH, Y. (1999). *Evaluation of bearing capacity of piles from Cone Penetration Test data*.
- [16] CHALMOVSKÝ, J. (2021). *Využití metody přenosových funkcí pro predikci chování hlubinných základů v ČR*.
- [17] MASOPUST J. (2018). *Závěrečná zpráva o výsledcích studijních statických zatěžovacích zkoušek mimosystémových pilot Z202 a Z204*. Doc.Ing.Jan Masopust, CSc.
- [18] MASOPUST J. (2015) . *Závěrečná zpráva o výsledcích studijních statických zatěžovacích zkoušek mimosystémových pilot ZZ3, ZZ7 a ZZ10*.
- [19] ROBERTSON, P. K., CABAL, K. L., & DRILLING, G. (2014). *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. www.greggdrilling.com
- [20] POULOS, H. G. *Pile behaviour - theory and application*. Géotechnique. 1989, 3
- [21] REDDY, E.S.B., O'REILLY, M. AND CHAPMAN, D . *A software to predict the behavior of tension piles*. Computers & Structures. 1997, Vol. 62, 4.
- [22] REDDY, E.S.B., O'REILLY, M. A CHAPMAN, D. *Modified T-Z model-a software for tension piles*. Computers and Structures. 1998, Sv. 68, 6, stránky 613-625.
- [23] ZHANG, Q. , et al. *Simplified method for settlement prediction of single pile and pile group using a hyperbolic model*. Int. J. Civil. Eng. 2014, Vol. 12, 2.
- [24] FLEMING, W.G.K. *A new method for single pile settlement prediction and analysis*. Géotechnique . 1992, Sv. 42, 3.
- [25] ZHANG, Q.Q. A ZHANG, Z.M. *A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis*. Canadian Geotechnical Journal. 2012, Sv. 49, stránky 1256-1266.
- [26] BURLAND, J. *Shaft friction of piles in clay - a simple fundamental approach* . *Ground Engineering* . 1973, Sv. 6.
- [27] MATYS, M., ŤAVODA, O. A CUNINKA, M. *Pol'né skúšky zemín*. Bratislava : Edícia stavebníckej literatúry (Alfa), 1990.

- [28] FINE, spol. s r.o. *Normy a metody výpočtu programů | GEO5 | Online nápověda. Stavební software pro statiky a geotechniky.* [Online] 2020. <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/normya-metody-vypoctu-programu-01/>.
- [29] BUSTAMANTE, M. a GIANESELLI, L. . *Pile bearing capacity predictions by means of static penetrometer, CPT.* 2nd European Symposium on Penetration Testing, ESOPT II. 1982
- [30] FRANK, R.; ZHAO, S. R. *Estimation à partir des paramètres pressiométriques de l'enfoncement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins.* Bulletin de Liaison des Laboratoires des Ponts et Chaussées. 1982
- [31] ROBERTSON, P.K. *Estimating in-situ state parameter and friction angle in sandy soils from the CPT.* 2nd International Symposium on Cone Penetration Testing, CPT'10. 2010.
- [32] WU, J., et al. *A load transfer approach to rectangular closed diaphragm walls.* Proc. Inst. Civ. Eng.-Geotech. Eng. 2016, Vol. 169, 6.
- [33] REESE, L.C. A O'NEILL , M.W. *Drilled Shafts: Construction and Design.* FHWA, Publication No. HI-88-042, 1988.
- [34] SEED, H. A REESE, L. *The Action of Clay along Friction Piles .* Journal of Geotechnical Engineering. 1957, Sv. 122.
- [35] SULAIMAN, I.H. AND COYLE , H.M. *Uplift Resistance of Piles in Sand.* Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. 1976, Vol. 102, 5.
- [36] REESE, L.C. A VAM IMPE , W.F. *Single Piles and Pile Groups under Lateral Loading.* Balkema, 2001.
- [37] TIRAWAT, B. A LAI, Qui Van. *A non-linear load transfer method for determining the settlement of piles under vertical loading.* International journal of geotechnical engineering. 2017.
- [38] DIAS, T.G.S. AND BEZUIJEN, A. *Load-Transfer Method for Piles under Axial Loading and Unloading.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering (ASCE). 2017, Vol. 144, 1.
- [39] VARDANEGA, P. J., a další. *Bored pile design in stiff clay I: codes of practice.* Geotechnical Engineering. 2012, Sv. 165, GE4.
- [40] VARDANEGA, P. J., WILLIAMSON, P. G. A BOLTON, M. D . *Bored pile design in stiff clay II: mechanisms and uncertainty.* Geotechnical Engineering. 2012, Sv. 165, GE4.
- [41] MEYERHOF, G.G . *Bearing capacity and settlement of pile foundations.* J Geotech Eng Div. 1976, Sv. 102.



[42] BROWN, D.A, J.P., TURNER A RAYMOND, J.C . *Drilled shafts: construction procedures and LRFD design methods*. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, 2010.

[43] ROLLINS K. M., MIKESELL R.C. *Drilled Shaft Side Friction in Gravelly Soils*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. (2005).

[44] ROLLINS K.M., MIKESELL R.C, CLAYTON J. *Ultimate side friction of drilled shafts in gravels*. 4th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering (Hamburg).

Použité internetové zdroje:

[W1] Lightweight CPT System - A.P. van den Berg . *Cone Penetration Test equipment and hydraulic pile pushers* - A.P. van den Berg [online]. Dostupné z: <https://www.apvandenbergh.com/onshore-cone-penetration-testing/lightweight-cpt-system>

[W2] Penetrometer - TG 63-100 - Pagani. *ArchiExpo - The B2B marketplace for architecture and design: kitchen, bathroom, lighting, furniture, office, etc.* [online]. Dostupné z: <https://www.archiexpo.com/prod/pagani/product-153120-1796363.html>

[W3] Nelineární modely | Materiálové modely | GE05 | Online nápověda . *Stavební software pro statiky a geotechniky | Fine* [online]. Copyright © Fine spol. s r.o., Všechna práva vyhrazena [cit. 13.03.2022]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/nelinearni-modely-01/>

[W4] Pilota CPT | Geotechnický software GE05 / Fine. *Stavební software pro statiky a geotechniky | Fine* [online]. Copyright © Fine spol. s r.o., Všechna práva vyhrazena [cit. 13.03.2022]. Dostupné z: <https://www.fine.cz/geotechnicky-software/pilota-cpt/>

[W5] GeoLogismiki - CPT interpretation & Soil liquefaction software . *GeoLogismiki - CPT interpretation & Soil liquefaction software* [online]. Copyright © 2018 GEOLOGISMIKI.GR All rights reserved [cit. 13.03.2022]. Dostupné z: <https://geologismiki.gr>

[W6] Dr. Peter K. Robertson - Professor Emeritus, Geotechnical Engineering . *Dr. Peter K. Robertson - Professor Emeritus, Geotechnical Engineering* [online]. Copyright © 2018 [cit. 13.03.2022]. Dostupné z: <https://www.cpt-robertson.com>

[W7] Plaxis Connect Edition - *Material Models Manual* [online]. Copyright © [cit. 11.04.2022]. Dostupné z: https://communities.bentley.com/cfs-file/_key/communityserver-wikis-components-files/00-00-00-05-58/0118.PLAXIS3DCE_2D00_V20.02_2D00_3_2D00_Material_2D00_Models.pdf

Použité normy:

[N1] ČSN 75 2410 . *Malé vodní nádrže*. 04/2011

[N2] ČSN EN ISO 14688-1 . *Geotechnický průzkum a zkoušení - Pojmenování a zatřídování zemin - Část 1: Pojmenování a popis*. 04/2018. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[N3] ČSN P 73 1005 . *Inženýrskogeologický průzkum*. 02/2010. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[N4] ČSN 73 6133 . *Návrh a provádění zemního tělesa pozemních komunikací*. 02/2010. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[N5] ČSN EN ISO 22476-1 . *Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky - Část 1: Statická penetrační zkouška s elektrickým snímáním dat a měřením pórového tlaku*. 05/2013. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[N6] ČSN EN ISO 22476-2 . *Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky - Část 2: Dynamická penetrační zkouška*. 07/2005. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.

[N7] ČSN EN 1997-2 . *Eurokód 7: Navrhování geotechnických konstrukcí - Část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví.



ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK, SYMBOLOV A VELIČÍN

| | |
|-------------|--|
| A | prierezová plocha pilóty |
| A_c, A_s | plocha priečneho rezu hrotu CPT prístroja |
| a, b | regresné koeficienty zeminy v i -tej vrstve profilu |
| d | priemer pilóty |
| \bar{d} | vážený priemer profilov pilóty |
| d_i | priemer pilóty v i -tej vrstve, priemer segmentu pilóty |
| D | priemer pilóty |
| \bar{D} | vážený priemer profilov pilóty |
| E_c | Youngov modul pružnosti betónu |
| $E_P A_S^n$ | osová tuhosť daného segmentu pilóty |
| E_s | Youngov modul pružnosti oceli |
| f | počítané plášťové trenie |
| f_s | plášťové trenie manžety CPT hrotu |
| f_{st} | merné (lokálne) plášťové trenie |
| F_b, F_s | empirické súčinitele |
| h_i | mocnosť i -tej vrstvy profilu |
| I_c | index konzistencie |
| I_D | index relatívnej uľahlosti |
| k_b | empirický súčiniteľ podľa typu zeminy a technológie pilóty |

| | |
|------------|--|
| K | súčiniteľ zemného tlaku |
| K_s | súčiniteľ bočného tlaku |
| K_0 | počiatočný súčiniteľ zemného tlaku |
| L | dĺžka pilóty |
| l_i | mocnosť i-tej vrstvy profilu |
| m | technologický faktor |
| M_b | parameter počiatocnej tuhosti v päte pilóty |
| M_s | parameter počiatocnej tuhosti zeminy |
| n | počet meraní |
| N | počet segmentov |
| N_c, N_q | súčinitele únosnosti |
| N_k | súčiniteľ hrotu CPT súpravy |
| P_m^n | сила uprostred segmentu |
| P_t^n | Sila v hlave segmentu |
| P | zvislé zaťaženie |
| POP | rozdiel najväčšieho napätia pôsobiaceho v minulosti a aktuálneho napätia (pre-overburden pressure) |
| Q_c | celkový odpor pôsobiaci na špičku CPT prístroja |
| OCR | pomer prekonsolidácie (over-consolidation ratio) |
| Q_s | celkový odpor pôsobiaci na treciu manžetu CPT prístroja |



| | |
|---------------|--|
| q_b | odpor na päte |
| $q_{p,lim}$ | medzný odpor na päte pilóty |
| q_c | odpor na hrote |
| q_{ca} | priemerný odpor na hrote danej vrstvy |
| q_{c1} | minimum priemerného odporu na hrote v určenej zóne |
| q_{c2} | priemer minimálnych odporov na hrote v určenej zóne |
| $q_{eq, tip}$ | priemerovaný odpor na hrote |
| q_s | plášťové trenie |
| q_{st} | odpor na hrote |
| $q_{s,lim}$ | limitné plášťové trenie |
| $q_{s,ult}$ | medzné plášťové trenie |
| q_{si} | medzné plášťové trenie v i-tej vrstve |
| q_t | odhadovaná únosnosť na päte pilóty |
| R_f | trecí pomer |
| s_c^n | posun v strede segmentu pilóty |
| $s_c^{n'}$ | aktualizované posunutie stredového segmentu |
| s_b^n | posun v päte segmentu pilóty |
| s_t^n | posun v hlave segmentu pilóty |
| s | posunutie v hlave pilóty |
| $s_u (c_u)$ | neodvodnená šmyková pevnosť |
| u | pórový tlak |



| | |
|----------------------|---|
| w_{el}^n | elastická deformácia |
| x | premenná |
| α | empirický koeficient |
| α | exponent pre daný typ a stav zeminy |
| α_c, α_s | redukčné koeficienty |
| β | koeficient prenosu zaťaženia do päty pilóty |
| β, β_{av} | koeficient, ktorý vzťahuje medzné plášťové trenie k efektívnemu geostatickému napätiu |
| γ | objemová tiaž |
| δ | trecí uhol na rozhraní pilóty a zeminy |
| ε | pomerné pretvorenie |
| φ_{cv} | uhol vnútorného trenia v kritickom stave |
| σ'_{or} | efektívne geostatické napätie |
| τ_i | plášťové trenie i-teho segmentu |
| τ_{max} | maximálne plášťové trenie |
| Δy_i | posun stredu i-teho segmentu |

ZOZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKOV

| | |
|--|----|
| Obrázok č. 1.1: Prehľadná schéma postupu v práci | 14 |
| Obrázok č. 2.1: Elektrický hrot | 16 |
| Obrázok č. 2.2: Mechanický hrot | 16 |
| Obrázok č. 2.3: Schéma skúšky so seizmickým hrotom | 17 |
| Obrázok č. 2.4: Schematický rez penetračným hrotom | 18 |
| Obrázok č. 2.5: Ľahký penetrometer pre CPT skúšky | 19 |
| Obrázok č. 2.6: Stredne ťažká penetračná súprava PAGANI TG63-100..... | 20 |
| Obrázok č. 2.7: Ťažká penetračná súprava PAGANI TG73-200..... | 20 |
| Obrázok č. 2.8: Schéma statickej penetračnej skúšky..... | 22 |
| Obrázok č. 2.9: Záznam z CPTu..... | 23 |
| Obrázok č. 2.10: Grafické znázornenie oblastí pre získanie hodnôt súčiniteľov q_{c1} a q_{c2} | 31 |
| Obrázok č. 2.11: Výpočet $q_{eq(tip)}$ (<i>Bustamante a Gianeselli</i>) | 36 |
| Obrázok č. 2.12: Rozdelenie pilóty na jednotlivé segmenty a priradenie jednotlivých prenosových funkcií segmentom plášťa a päte..... | 44 |
| Obrázok č. 2.13: Vývojový diagram pre jeden zaťažovací krok | 46 |
| Obrázok č. 2.14: Užívateľské prostredie softwaru PMpLTO..... | 48 |
| Obrázok č. 2.15: Rozdiel medzi parametrami <i>OCR</i> a <i>POP</i> | 51 |
| Obrázok č. 2.16: Základný pracovný diagram elastického perfektne-plastického správania materiálu..... | 53 |
| Obrázok č. 2.17: Hyperbolický pracovný diagram pre model Hardening Soil..... | 54 |
| Obrázok č. 2.18: Charakteristické tuhostne-deformačné správanie pôdy s typickými rozsahmi deformácií pre laboratórne testy..... | 55 |
| Obrázok č. 3.1: Situácia mostného objektu C202 - cesta I. triedy I/57 Krnov – SV obchvat | 58 |
| Obrázok č. 3.2: Kotvenie skúšobného mostu pre pilótu Z202 – pôdorys; Obrázok č. 3.3: Kotvenie skúšobného mostu pre pilótu Z202 - rez | 60 |
| Obrázok č. 3.4: Skúšobný most typu „hríbik“ | 61 |
| Obrázok č. 3.5: Inštalácia strunových tenzometrov na armokôš pilóty | 62 |

| | |
|---|-----|
| Obrázok č. 3.7: Situácia mostného objektu C203 - cesta I. triedy I/11 Nebory - Oldřichovice | 74 |
| Obrázok č. 4.1: Prebiehajúca skúška CPT pri mostnom objekte C202 | 84 |
| Obrázok č. 4.2: Prebiehajúca skúška CPT pri mostnom objekte C203 | 91 |
| Obrázok č. 4.3: Príprava na skúšku pri mostnom objekte C203..... | 91 |
| Obrázok č. 6.1: V pravej časti je zobrazená deformovaná sieť MKP pri poslednom zaťažovacom stupni v mierke 50:1, vľavo sa nachádza grafické zobrazenie posunu po výške pilóty (materiálový model HS SSS)..... | 108 |
| Obrázok č. 6.2: Závislosť OCR na podieli E_{us}/s_{u} | 114 |
| Obrázok č. 6.3: V ľavej časti je zobrazená deformovaná sieť MKP pri poslednom zaťažovacom stupni v mierke 50:1, uprostred sa nachádza grafické zobrazenie posunu po výške pilóty, vpravo sú vyznačené plastické body..... | 119 |

ZOZNAM POUŽITÝCH GRAFOV

| | |
|---|----|
| Graf č. 2.1: Nenormalizovaný graf SBT (<i>Robertson</i> ^{[6][10]}) | 25 |
| Graf č. 2.2: Normalizovaný graf SBT (<i>Robertson</i> ^{[6][10]}) | 27 |
| Graf č. 2.3: Normalizovaný graf SBT s popisom správania sa zeminy pri veľkom napätí (<i>Robertson</i> ^{[6][10]}) | 28 |
| Graf č. 2.4: CPT – SPT korelačný vzťah (<i>Robertson</i> ^{[6][10]}) | 29 |
| Graf č. 2.5: Hodnoty súčiniteľa α_s (<i>Schmertmann</i> ^[13]) | 32 |
| Graf č. 2.6: Odvodenie maximálneho plášťového trenia pre danú vrstvu zeminy (íl a prach) na základe ekvivalentného priemerného odporu na hrote (<i>Bustamante a Gianeselli</i> ^[13]) | 37 |
| Graf č. 2.7: Odvodenie maximálneho plášťového trenia pre danú vrstvu zeminy (piesok a štrk) na základe ekvivalentného priemerného odporu na hrote (<i>Bustamante a Gianeselli</i> ^[13]) | 37 |
| Graf č. 2.8: Závislosť faktoru β na hĺbke pre nesúdržné zeminy (<i>Rollins</i> ^[43]) | 52 |
| Graf č. 3.1: Medzná zaťažovacia krivka pilóty Z202 pri mostnom objekte C202 | 63 |
| Graf č. 3.2 (vľavo): Sily prenesené po dĺžke pilóty do príslušnej hĺbky v jednotlivých zaťažovacích stavoch (Z202); Graf č. 3.3 (vpravo): Priebeh pomerného pretvorenia pozdĺž pilóty (Z202) | 67 |
| Graf č. 3.4 (vľavo): Priebehy prírastku posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z202); Graf č. 3.5 (vpravo): Priebehy absolútnych posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z202) | 68 |
| Graf č. 3.6: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z202) | 70 |
| Graf č. 3.7: Prenosové funkcie plášťov jednotlivých segmentov (Z202) | 71 |
| Graf č. 3.8: Závislosť napätia v päte pilóty na sadaní hlavy pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (Z202) | 72 |
| Graf č. 3.9: Medzná zaťažovacia krivka pilóty Z203 pri mostnom objekte C203 | 77 |
| Graf č. 3.10 (vľavo): Sily prenesené po dĺžke pilóty do príslušnej hĺbky v jednotlivých zaťažovacích stavoch (Z203); Graf č. 3.11 (vpravo): Priebeh pomerného pretvorenia pozdĺž pilóty (Z203) | 79 |

| | |
|--|-----|
| Graf č. 3.12 (vľavo): Priebehy prírastku posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z203); Graf č. 3.13 (vpravo): Priebehy absolútnych posunov pozdĺž pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stupne (Z203)..... | 80 |
| Graf č. 3.14: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z203)..... | 81 |
| Graf č. 3.15: Prenosové funkcie plášťov jednotlivých segmentov (Z203) | 82 |
| Graf č. 3.16: Závislosť napätia na päte pilóty na sadaní hlavy pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (Z203)..... | 83 |
| Graf č. 4.1: Grafické zobrazenie nameraného odporu na hrote, plášťového trenia a pórového tlaku (pilóta Z202, mostný objekt C202)..... | 85 |
| Graf č. 4.2: Vloženie dát do Robertsonovho nenormalizovaného SBT grafu (pilóta Z202, mostný objekt C202)..... | 86 |
| Graf č. 4.3: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – nenormalizované (pilóta Z202, mostný objekt C202)..... | 87 |
| Graf č. 4.4: Vloženie dát do Robertsonovho normalizovaného SBT grafu (pilóta Z202, mostný objekt C202)..... | 88 |
| Graf č. 4.5: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – normalizované (pilóta Z202, mostný objekt C202)..... | 89 |
| Graf č. 4.6: Grafické zobrazenie nameraného odporu na hrote, plášťového trenia a pórového tlaku (pilóta Z203, mostný objekt C203) | 92 |
| Graf č. 4.7: Vloženie dát do Robertsonovho nenormalizovaného SBT grafu (pilóta Z203, mostný objekt C203)..... | 93 |
| Graf č. 4.8: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – nenormalizované (pilóta Z203, mostný objekt C203)..... | 94 |
| Graf č. 4.9: Vloženie dát do Robertsonovho normalizovaného SBT grafu (pilóta Z203, mostný objekt C203)..... | 95 |
| Graf č. 4.10: Vyhodnotenie profilu na základe SBT indexu – normalizované (pilóta Z203, mostný objekt C203)..... | 96 |
| Graf č. 5.1: Porovnanie MZK zo zaťažovacej skúšky a z PMpLTO (1M) (Z202) | 99 |
| Graf č. 5.2: Priebeh medzného plášťového trenia a faktoru β z PMpLTO (1M) (Z202) (červená lomená krivka reprezentuje priebeh faktoru β po dĺžke pilóty, modré stĺpce medzné plášťové trenie $q_{s,ult}$)..... | 100 |
| Graf č. 5.3: Porovnanie MZK zo zaťažovacej skúšky a z PMpLTO (2A) (Z202) | 101 |



| | |
|--|-----|
| Graf č. 5.4: Priebeh medzného plášťového trenia a faktoru β z PMpLTO (2A) (Z202) (červená lomená krivka reprezentuje priebeh faktoru β po dĺžke pilóty, modré stĺpce medzné plášťové trenie $q_{s,ult}$)..... | 102 |
| Graf č. 5.5: Porovnanie MZK zo zaťažovacej skúšky a z PMpLTO (2A) (Z203) | 103 |
| Graf č. 5.6: Priebeh medzného plášťového trenia a faktoru β z PMpLTO (2A) (Z203)..... | 105 |
| Graf č. 6.1: Porovnanie MZK z uskutočnenej zaťažovacej skúšky a jej simulácie v programe Plaxis 2D pre jednotlivé materiálové modely (Z202)..... | 106 |
| Graf č. 6.2: Porovnanie prenosových funkcií segmentov zo zaťažovacej skúšky a jej simulácie pomocou MKP (HS + Small Strain Stiffness materiálový model, $m=0,5$) (Z202) | 109 |
| Graf č. 6.3: Vplyv uhlu dilatancie na prenosové funkcie plášťa segmentov pilóty (HS + Small Strain Stiffness materiálový model, $m=0,5$) | 110 |
| Graf č. 6.4: Závislosť kartézskoho totálneho napätia σ_{xx} na rastúcom posune stredy segmentu (Z202)..... | 110 |
| Graf č. 6.5: Priebeh odporu na hrote (q_c) z CPT a dopočítaných hodnôt neodvodnenej šmykovej pevnosti (s_u) v riešenej vrstve zeminy..... | 112 |
| Graf č. 6.6: Závislosť modulu tuhosti E_{ur} na referenčnom napätí σ_3 | 115 |
| Graf č. 6.7: Porovnanie MZK z uskutočnenej zaťažovacej skúšky a jej simulácie v programe Plaxis 2D pre jednotlivé materiálové modely (Z203)..... | 116 |
| Graf č. 6.8: Porovnanie prenosových funkcií segmentov zo zaťažovacej skúšky a jej simulácie pomocou MKP (Hardening Soil materiálový model)(Z203)..... | 118 |
| Graf č. 6.9: Závislosť kartézskoho totálneho napätia σ_{xx} na rastúcom posune stredy segmentu (Z203)..... | 118 |
| Graf č. 7.1: Porovnanie závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke z priamych korelačných metód a spätnej analýzy pomocou MPF (pilóta Z202) | 120 |
| Graf č. 7.2: Porovnanie závislosti medzného plášťového trenia na hĺbke z priamych korelačných metód a spätnej analýzy pomocou MPF (pilóta Z203) | 121 |
| Graf č. 7.3: Vynesenie hodnôt medzného plášťového trenia zo spätnej analýzy (MPF) a odporu na hrote z CPT do grafu LCPC (íl – prach, pilóta Z203) | 123 |
| Graf č. 7.4: Vynesenie hodnôt medzného plášťového trenia zo spätnej analýzy a odporu na hrote z CPT do grafu LCPC (piesok - štrk, pilóta Z202) | 124 |
| Graf č. 8.1: Porovnanie hyperbolických závislostí z nelineárnej metódy s dátami zo spätnej analýzy a aproximácia týchto dát hyperbolickou funkciou (Z202) | 125 |



Graf č. 8.2: Porovnanie hyperbolických závislostí z nelineárnej metódy s dátami zo spätnej analýzy a aproximácia týchto dát mocninnou funkciou (Z203).....127

ZOZNAM POUŽITÝCH TABULIEK

| | |
|--|----|
| Tabuľka č. 2.1: Použitelnosť CPTu pre získanie parametrov zemín ^[6] | 24 |
| Tabuľka č. 2.2: Nenormalizovaný graf SBT – popis jednotlivých zón (<i>Robertson</i> ^{[6][10]})... | 26 |
| Tabuľka č. 2.3: Normalizovaný graf SBT – popis jednotlivých zón (<i>Robertson</i> ^{[6][10]}) | 27 |
| Tabuľka č. 2.4: CPT – Odporúčané pomery (q_d/p_a)/ N_{60} (<i>Robertson</i> ^{[6][10]}) | 29 |
| Tabuľka č. 2.6: Hodnoty súčiniteľa α_s podľa technológie vyhotovenia (<i>Matys</i> ^[27] , 1990) | 32 |
| Tabuľka č. 2.7: Hodnoty súčiniteľa α_c podľa typu zeminy (<i>Matys</i> ^[27] , 1990) | 33 |
| Tabuľka č. 2.8: Hodnoty súčiniteľa k_b podľa typu zeminy a technológie vyhotovenia pilóty (<i>Bustamante</i> ^[13]) | 35 |
| Tabuľka č. 2.9: Hodnoty empirických súčiniteľov F_b a F_s pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa Aokiho a De Alencara ^[13] | 39 |
| Tabuľka č. 2.10: Hodnoty súčiniteľa α_s pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa Aokiho a De Alencara ^[13] | 39 |
| Tabuľka č. 2.11: Hodnoty súčiniteľa k_b pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa Philipponnata ^[13] | 40 |
| Tabuľka č. 2.12: Hodnoty súčiniteľa F_s pre vyhodnotenie dát z CPT skúšok metódou podľa Philipponnata ^[13] | 41 |
| Tabuľka č. 2.13: Zhrnutie priamych korelačných metód a vzťahov na výpočet predikovaného medzného plášťového trenia z výsledkov CPT | 42 |
| Tabuľka č. 2.14: Stupne analýz v softvéri PMpLTO ^[16] | 49 |
| Tabuľka č. 2.15: Regresné koeficienty v nelineárnej metóde ^[2] | 56 |
| Tabuľka č. 3.1: Hlavné parametre zaťažovanej pilóty Z202 (<i>Masopust</i> ^[17]) | 57 |
| Tabuľka č. 3.2: Geologický profil v mieste skúšanej pilóty Z202 (<i>Masopust</i> ^[17]) | 59 |
| Tabuľka č. 3.3: Priebeh zaťažovacej skúšky a namerané hodnoty posunutia v hlave (Z202) (<i>Masopust</i> ^[17]) | 62 |
| Tabuľka č. 3.4: Sily prenesené pilótou do daných hĺbok (Z202) | 64 |
| Tabuľka č. 3.5: Sily prenesené jednotlivými segmentami pilóty (Z202) | 65 |
| Tabuľka č. 3.6: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z202) | 69 |
| Tabuľka č. 3.7: Napätie na päte pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy (Z202) | 71 |



| | |
|---|-----|
| Tabuľka č. 3.8: Hlavné parametre zaťažovanej pilóty (Z203) (<i>Masopust^[18]</i>) | 73 |
| Tabuľka č. 3.9: Geologický profil v mieste skúšanej pilóty Z203 (<i>Masopust^[18]</i>) | 75 |
| Tabuľka č. 3.10: Priebeh zaťažovacej skúšky a namerané hodnoty posunutia v hlave (Z203) (<i>Masopust^[18]</i>) | 76 |
| Tabuľka č. 3.11: Sily prenesené pilótou do daných hĺbok (Z203)..... | 78 |
| Tabuľka č. 3.12: Sily prenesené jednotlivými segmentami pilóty (Z203) | 78 |
| Tabuľka č. 3.13: Plášťové trenie pilóty v určených segmentoch pre dané zaťažovacie stavy (Z203)..... | 81 |
| Tabuľka č. 3.14: Napätie v päte pilóty pre dané zaťažovacie stavy (Z203) | 82 |
| Tabuľka č. 4.1: Výsledný profil pre ďalší výpočet (pilóta Z202)..... | 90 |
| Tabuľka č. 4.2: Výsledný profil pre ďalší výpočet (pilóta Z203)..... | 97 |
| Tabuľka č. 5.1: Optimalizované vstupné parametre z PMpLTO (1M) (Z202) | 99 |
| Tabuľka č. 5.2: Optimalizované vstupné parametre z PMpLTO (2A) (Z202) | 101 |
| Tabuľka č. 5.3: Optimalizované vstupné parametre z PMpLTO (2A) (Z203) | 104 |
| Tabuľka č. 6.1: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom HS + Small Strain Stiffness | 107 |
| Tabuľka č. 6.2: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Hardening Soil | 107 |
| Tabuľka č. 6.3: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Mohr-Coulomb | 108 |
| Tabuľka č. 6.4: Namerané hodnoty odporu na hrote (q_c) z CPT a dopočítané hodnoty neodvodnenej šmykovej pevnosti (s_u) | 112 |
| Tabuľka č. 6.5: Hodnoty korelačnými vzťahmi odvodených parametrov <i>OCR</i> a <i>POP</i> ; | |
| Tabuľka č. 6.6: Hodnoty dopočítaných efektívnych modulov tuhosti v riešenom hĺbkovom intervale pre íl prachovitý (v poslednom stĺpci priemerný efektívny modul tuhosti $E'_{ur,av}$) | 115 |
| Tabuľka č. 6.7: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Hardening Soil – Small Strain Stiffness..... | 117 |
| Tabuľka č. 6.8: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Hardening Soil | 117 |
| Tabuľka č. 6.9: Materiálové vstupy pre výsledok simulácie s modelom Mohr-Coulomb | 117 |



| | |
|---|-----|
| Tabuľka č. 7.1: Sumarizácia a vyhodnotenie zhody použitých priamych korelačných metód s výsledkami inverznej analýzy pomocou MPF..... | 122 |
| Tabuľka č. 8.1: Zhrnutie použitých funkcií a koeficientov pre aproximáciu závislosti plášťového trenia na hĺbke..... | 128 |



ZOZNAM PRÍLOH

P 4.1.1 Protokol zo softvéru CPeT-IT – CPT pri pilóte Z202

P 4.1.2 Vlastné vyhodnotenie CPT v programe MS Excel - CPT pri pilóte Z202

P 4.1.3 Zostavenie výsledného výpočtového profilu – Pilóta Z202

P 4.2.1 Protokol zo softvéru CPeT-IT – CPT pri pilóte Z203

P 4.2.2 Vlastné vyhodnotenie CPT v programe MS Excel - CPT pri pilóte Z203

P 4.2.3 Zostavenie výsledného výpočtového profilu – Pilóta Z203

P 7.1.1 Porovnanie priebehu medzného plášťového trenia získaného z priamych korelačných metód a spätnej analýzy pomocou MPF (Z202)

P 7.1.2 Porovnanie priebehu medzného plášťového trenia získaného z priamych korelačných metód a spätnej analýzy pomocou MPF (Z203)