



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

VYUŽITÍ PRESIOMETRICKÝCH ZKOUŠEK PRO STANOVENÍ TVARU MOBILIZAČNÍCH KŘIVEK VRTANÝCH PILOT V METODĚ PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

UTILIZATION OF PRESSUREMETER TESTS FOR DETERMINATION OF LOAD-
TRANSFER CURVES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Matej Bírošík

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2022



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	NPC-SIK Stavební inženýrství – konstrukce a dopravní stavby
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Specializace	bez specializace
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Matej Bírošík
Název	Využití presiometrických zkoušek pro stanovení tvaru mobilizačních křivek vrtaných pilot v metodě přenosových funkcí
Vedoucí práce	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2021
Datum odevzdání	14. 1. 2022

V Brně dne 31. 3. 2021

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

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

PODKLADY A LITERATURA

- ABCHIR, Z., a další. t-z curves for piles from pressuremeter test results. Géotechnique, 2016.
- BRIAUD J. L.; Anderson, J. Pressuremeter Design of Vertically Loaded Piles, FHWA research report, 1983.
- FRANK, R. Design of foundations in France with the use of Ménard pressuremeter tests (MPM). Soil Mechanics and Foundation Engineering, 2010.
- FRANK, R. Some aspects of research and practice for foundation design in France. Innovative Infrastructure Solutions, 2017.
- 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.

Další podklady budou předány na základě konzultací v průběhu samotného řešení diplomové práce.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Přenosové funkce velkopřůměrových pilot založených na výsledcích presiometrických zkoušek (E_m , p_{lim}) představují samostatnou skupinu mobilizačních křivek etablovaných zejména ve Francii. Cílem diplomové práce je úvodní aplikace těchto typů přenosových funkcí v podmínkách ČR. Práce je předběžně rozčleněna do následujících částí:

- a) rozbor mobilizačních křivek využívajících presiometrické zkoušky, definice jejich vstupních parametrů a způsobů jejich stanovení,
- b) rozbor volby vstupních parametrů na predikovanou mezní zatěžovací křivku a na redistribuci mobilizovaného plášťového tření pro různé úrovně zatížení,
- c) zpětná analýza vybraných instrumentovaných zatěžovacích zkoušek, zhodnocení vhodnosti těchto typů přenosových funkcí ve srovnání s hyperbolickými křivkami.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ 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).

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Práca je rozdelená na sedem častí. Prvá časť je teoretická a skladá sa z popisu princípu fungovania metódy prenosových funkcií, popisu použitých prenosových funkcií v následnej inverznej analýze a spôsobu stanovenia plášťového trenia v β metóde.

V druhej časti je popísaný spôsob stanovenia Ménardovho presiometrického modulu z presiometrických skúšok.

Tretia časť sa zaoberá analýzou presiometrických skúšok a spôsobom vyhodnotenia presiometrického modulu pre rôzne typy podložia.

V štvrtej časti práce je spracovaná parametrická štúdia prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok, kde je zobrazený vplyv vstupných parametrov na medznú zaťažovaciu krivku.

V piatej časti sa práca venuje inverzným analýzám zaťažovacích skúšok vrtných pilót, ktoré sú zhotovené v podobných geologických podmienkach.

V šiestej časti sú zhrnuté použité vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, pri ktorých bola dosiahnutá maximálna možná zhoda predikovanej a nameranej medznej zaťažovacej krivky.

V poslednej časti je uvedený záver, ktorý popisuje cieľ práce, a to stanovenie parametrov ako vstupov do tvarov mobilizačných kriviek vrtných pilót v metóde prenosových funkcií s využitím presiometrických skúšok.

KLÚČOVÉ SLOVÁ

Geotechnika, metóda prenosových funkcií, presiometrické skúšky, Ménardov presiometer, medzná zaťažovacia krivka, plášťové trenie, počiatočná tuhosť, inverzná analýza, vrtné pilóty.

ABSTRACT

The thesis is divided into seven parts. The first part is theoretical and consists of description of load-transfer method and its principal, description of load-transfer curves used for following inverse analysis and method for determining shaft friction in β method.

In the second part, there is an explanation of the determination of Ménard pressuremeter modulus from pressuremeter tests.

The third part consists of the pressuremeter tests analysis and description of evaluating process of the pressuremeter modulus for different types of subsoil.

In the fourth part states parametric study of load-transfer curves compiled on the basis of the pressuremeter tests, where we display an impact of input parameters on a load-settlement curves.

The fifth part contains inverse analysis of pile load tests, which are set in similar geological conditions.

Summary of used input parameters for individual load-transfer curves states in the sixth part. These parameters are responsible of achieving the best match of predicted and measured load-settlement curves.

The last part is devoted to the thesis conclusion, which is the determination of parameters as inputs to the shape of load-transfer curves for bored piles with utilization of the pressuremeter tests.

KEYWORDS

Geotechnics, load transfer curves method, pressuremeter tests, Ménard pressuremeter, load transfer curve, shear friction, initial stiffness, inverse analyses, bored piles.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Bc. Matej Bírošík *Využití presiometrických zkoušek pro stanovení tvaru mobilizačních křivek vrtaných pilot v metodě přenosových funkcí*. Brno, 2021. 136 s., Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce s názvem *Využití presiometrických zkoušek pro stanovení tvaru mobilizačních křivek vrtaných pilot v metodě přenosových funkcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2022

Bc. Matej Bírošík
autor práce

PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem *Využití presiometrických zkoušek pro stanovení tvaru mobilizačních křivek vrtaných pilot v metodě přenosových funkcí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2022

Bc. Matej Bírošík
autor práce

POĎAKOVANIE

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu práce pánovi Ing. Jurajovi Chalmovskému, Ph.D. za pomoc s výberom inovatívnej témy, za rady počas vypracovávania práce, trpezlivosť a v neposlednom rade za ochotu. Taktiež by som rád poďakoval mojej rodine, priateľke a priateľom za podporu a motiváciu počas celého môjho štúdia.

OBSAH

1. ÚVOD.....	12
2. METÓDA PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ A MOBILIZAČNÉ KRIVKY	13
2.1. PREDSTAVENIE METÓDY PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ	13
2.2. MOBILIZAČNÉ KRIVKY	20
2.2.1. HYPERBOLICKÉ (Bohn a kol., 2016).....	20
2.2.2. FZ MODEL (Frank a kol., 1982).....	21
2.2.3. AB1 MODEL (Abchir a kol., 2016).....	22
2.3. SPÔSOB STANOVENIA MEDZNÉHO PLÁŠŤOVÉHO TRENIA V β METÓDE	24
2.4. PARAMETER β VO VÝPOČTOVOM MODELI.....	26
2.4.1. ÚROVEŇ RIEŠENIA 1(M).....	26
2.4.2. ÚROVEŇ RIEŠENIA 2(A).....	27
2.5. ZHRNUTIE	28
3. STANOVENIE MÉNARDOVHO PRESIOMETRICKÉHO MODULU E_M NA ZÁKLADE PRESIOMETRICKÝCH SKÚŠOK.....	29
3.1. METODIKA PRESIOMETRICKÝCH SKÚŠOK	29
3.2. VÝPOČET MÉNARDOVHO PRESIOMETRICKÉHO MODULU E_M	33
4. VYHODNOTENIE PRESIOMETRICKÝCH MODULOV	34
4.1. ZOZNAM LOKALÍT.....	34
4.2. DEFINOVANIE ZÁVISLOSTI E_M A HĽBKY	35
4.3. ELIMINÁCIA ODLÁHLÝCH HODNÔT	37
4.4. VÝSLEDKY ANALÝZY.....	43
5. PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ ZOSTAVENÝCH NA ZÁKLADE VÝSLEDKOV PRESIOMETRICKÝCH SKÚŠOK.....	45
5.1. PREMENNÁ HODNOTA $E_{M,REF}$	46
5.2. PREMENNÁ HODNOTA m	48
5.3. PREMENNÁ HODNOTA α_s	52
5.4. PREMENNÁ HODNOTA β_{av}	55
5.5. POROVNANIE FZ A AB1 MODELU	58
5.6. VZÁJOMNÉ POROVNANIE SKÚMANÝCH PARAMETROV	59
6. INVERZNÉ ANALÝZY ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK	62
6.1. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU D 4707 SO 210	63
6.1.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV	63
6.1.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE	66
6.1.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER.....	70
6.2. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU D 4704 SO 225	72
6.2.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV	72

6.2.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE.....	76
6.2.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER	78
6.3. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTA TP1.....	80
6.3.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV..	80
6.3.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE.....	82
6.3.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER	85
6.4. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTA TP2.....	86
6.4.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV..	86
6.4.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE.....	88
6.4.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER	90
6.5. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTA PRIEMERU 900 MM.....	92
6.5.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV..	92
6.5.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE.....	94
6.5.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER	97
6.6. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTY PRIEMERU 1300 MM.....	98
6.6.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV..	98
6.6.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE.....	100
6.6.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER	103
7. ZHRNUTIE A VYHODNOTENIE VSTUPNÝCH HODNÔT DO METÓDY PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ	104
7.1. KRIVKY PRIEBEHU TUHOSTI V ZÁVISLOSTI NA NORMOVANOM POSUNE PRE PLÁŠŤ	106
7.2. KRIVKY PRIEBEHU TUHOSTI ZÁVISLOSTI NA NORMOVANOM POSUNE PRE PÄTU.....	115
8. ZÁVER.....	124
9. POUŽITÉ ZDROJE	127
10. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV	129
11. ZOZNAM OBRÁZKOV, TABULIEK A GRAFOV.....	132

1. ÚVOD

Presiometrické skúšky sa realizujú „in situ“ k určaniu základných mechanických vlastností súdržných zemín, nesúdržných zemín (s väčším obsahom jemnozrnnej frakcie) a skalných hornín vo vrtoch prípadne prostredníctvom samozávrtných presiometrov. Výsledkom je predovšetkým stanovenie medze presiometrického tlaku, presiometrického modulu a medze dotvarovania. Prístroj svojou konštrukciou umožňuje uskutočnenie skúšok aj v hĺbkach do 50 m nad aj pod hladinou podzemnej vody. (GEOSTAR, spol. s.r.o., 2021)

V tejto práci bola vysvetlená metóda prenosových funkcií a tvary prenosových funkcií použité v následnej inverznej analýze zaťažovacích skúšok vrтанých pilót.

Ďalej boli vyhodnotené presiometrické skúšky z rôznych lokalít a definované vzťahy medzi hĺbkou a presiometrickým modulom v rôznych typoch podložia. Konkrétne išlo o súdržné zeminy triedy F1 – F4, F5 – F8 a horniny R4 – R6. Pomocou regresnej analýzy boli identifikované a eliminované odľahlé body meraní pre jednotlivé typy podložia. Vďaka tomu bolo možné určiť referenčné Ménardove presiometrické moduly pre danú skupinu tried podložia.

Súčasťou práce bolo aj vypracovanie parametrickej štúdie, pre vyobrazenie vplyvu jednotlivých vstupných parametrov do prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok na výstupy, ktorými sú medzné zaťažovacie krivky.

Poslednou nosnou časťou práce bola inverzná analýza šiestich zaťažovacích skúšok vrтанých pilót použitím troch prenosových funkcií (hyperbolická podľa (Bohn a kol., 2016), zostavené na základe výsledkov presiometrických skúšok FZ model podľa (Frank a kol., 1982) a AB1 model podľa (Abchir a kol., 2016)). Podložie všetkých zaťažovacích skúšok bolo zámerne podobného charakteru, kvôli ďalšej analýze vstupných parametrov. Na záver boli výsledky porovnané a k nim získané vstupné parametre, pri ktorých bolo dosiahnutá najväčšia možná zhoda medzi medznou zaťažovacou krivkou zo zaťažovacej skúšky a predikovanou.

2. METÓDA PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ A MOBILIZAČNÉ KRIVKY

2.1. PREDSTAVENIE METÓDY PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ

Pre stanovenie zvislej únosnosti a medznej zaťažovacej krivky pilót rozdelil postupy (Poulos, 1989) na tri úrovne:

1. Empirické metódy vychádzajúce zo skúšok „in-situ“ alebo laboratórnych skúšok. V tejto úrovni nie je zohľadnený teoretický princíp mechaniky zemín. Do tejto úrovne môže patriť napríklad tzv. α metóda.
2. Semi-empirické metódy, ktoré stále umožňujú ručné výpočty, ale z časti vychádzajú z teoretických základov mechaniky zemín. Do tejto úrovne môže patriť napríklad tzv. β metóda, ktorej bude venovaná samostatná časť práce.
3. Komplexné prístupy, ktoré plne vychádzajú z teórie mechaniky zemín. K nim patria napríklad metóda hraničných prvkov, metóda konečných prvkov a metóda prenosových funkcií.

Práve metóda prenosových funkcií bude v tejto kapitole popísaná. Metóda predstavuje kompromis medzi metódami empirickými, resp. semi-empirickými a metódami ako metóda konečných prvkov. Je založená na jasných fyzikálnych princípoch s relatívne nižším počtom empirických parametrov. Metódou prenosových funkcií je možné získať vyšší počet výstupov. Medzi výstupy pre vybrané zaťažovacie stavy patria medzné zaťažovacie krivky pre pätu a plášť, priebeh mobilizovaného plášťového trenia (s ním aj stupeň využitia medzného plášťového trenia), osovú silu a posuny pozdĺž pilóty.

Základom metódy je prenosová funkcia. Tá je definovaná pre plášť aj pätu pilóty. Pre plášť predstavuje vzájomnú závislosť medzi relatívnym posunom pilóta - zemina s_s a mobilizovaným plášťovým trením τ_s . Pre pätu predstavuje vzájomnú závislosť medzi posunom v päte pilóty s_b a normálovým napätím mobilizovaným v päte σ_b . Existuje mnoho tvarov prenosových funkcií. Pre inverznú analýzu boli použité tri tvary prenosových funkcií. (Chalmovský a kol., 2021)

Prvým z nich je hyperbolický tvar podľa (Bohn a kol., 2016), druhým a tretím tvarom sú prenosové funkcie odvodené z výsledkov presiometrických skúšok, a to konkrétne FZ model (Frank a kol., 1982) a AB1 model (Abchir a kol., 2016). Tieto tvary prenosových funkcií budú podrobnejšie popísané v časti 2.2. MOBILIZAČNÉ KRIVKY. Pri použití metódy prenosových funkcií je pilóta rozdelená na predpísaný počet segmentov n . Každému zo segmentov je priradená nezávislá prenosová funkcia a päte je priradená vlastná prenosová funkcia. Tento princíp je znázornený na obrázku 2.1 s použitím hyperbolickej prenosovej funkcie. (Bohn a kol., 2016) Základ algoritmu je popísaný v nasledujúcich krokoch. (Zhang, Q.Q. a Zhang, Z.M., 2012)

1. Predpoklad malého posunu hlavy pilóty w_t^1 a predpoklad konštantnej sily v hlave pilóty P_t^1 .
2. Za predpokladu sily P_t^1 na segmente pilóty 1, je možné stanoviť elasticujú deformáciu segmentu 1 s_c^1 použitím rovnice 2.1.

$$s_c^1 = \frac{P_t^1 * L_1}{A_p * E_p} \quad (2.1)$$

Kde L_1 je dĺžka segmentu 1, A_p je prierezová plocha segmentu a E_c je Youngov modul pružnosti betónu pilóty.

3. Vertikálny posun w_c^1 v polovici výšky segmentu 1 sa dá vypočítať rovnicou 2.2.

$$w_c^1 = w_t^1 - \frac{s_c^1}{2} \quad (2.2)$$

4. Podľa krivky vzťahu plášťového trenia τ_s^1 a vertikálneho posunu w_c^1 môžeme získať plášťové trenie mobilizované spolupôsobením segmentu pilóty 1 a zeminy. Nasleduje výpočet celkovej sily prenesenej segmentom pilóty 1 T_1 podľa rovnice 2.3, kde R_0 je polomer pilóty.

$$T_1 = \tau_s^1 * 2 * \pi * R_0 * L_1 \quad (2.3)$$

5. Mobilizovaná sila v päte segmentu pilóty 1 P_b^1 sa vypočíta podľa rovnice 2.4.

$$P_b^1 = P_t^1 - T_1 \quad (2.4)$$

6. Priemerná osová sila na segment pilóty je spočítaná podľa rovnice 2.5.

$$P_1 = \frac{P_t^1 * P_b^1}{2} \quad (2.5)$$

7. Ďalej pokračuje výpočet upravenej elastickej deformácie segmentu pilóty 1 $s_c^{1'}$ podľa rovnice 2.6.

$$s_c^{1'} = \frac{P_1 * L_1}{A_p * E_p} \quad (2.6)$$

8. Nasleduje porovnanie upravenej elastickej deformácie $s_c^{1'}$ a pôvodnej elastickej deformácie s_c^1 . Ak nie sú rozdiely porovnávaných hodnôt elastickej deformácie v špecifikovanom rozmedzí (napríklad 1×10^{-6} m) , použije sa $s_c^{1'}$ ako nová hodnota s_c^1 a opakujú sa kroky 3 až 8 do dosiahnutia rozdielu v špecifikovanom rozmedzí.

9. Koncový posun segmentu pilóty 1 w_b^1 je rovný posunu hlavy segmentu pilóty 2 w_t^2 a vypočíta sa pomocou rovnice 2.7, pričom sila v hlave segmentu pilóty 2 sa vypočíta pomocou rovnice 2.8.

$$w_b^1 = w_t^2 = w_t^1 - s_c^{1'} \quad (2.7)$$

$$P_t^2 = P_t^1 - T_1 \quad (2.8)$$

10. Následne vzniká predpoklad elastickej deformácie segmentu pilóty 2 s_c^2 podľa rovnice 2.1 pre segment pilóty 2 za predpokladu P_t^2 ako sily pôsobiacej v hlave tohto segmentu. Výpočet vertikálneho posunu stredu segmentu pilóty 2 w_c^2 podľa rovnice 2.9.

$$w_c^2 = w_t^2 - \frac{s_c^2}{2} \quad (2.9)$$

Po tomto kroku nasleduje výpočet podľa krokov 4 až 8 pre segment pilóty 2.

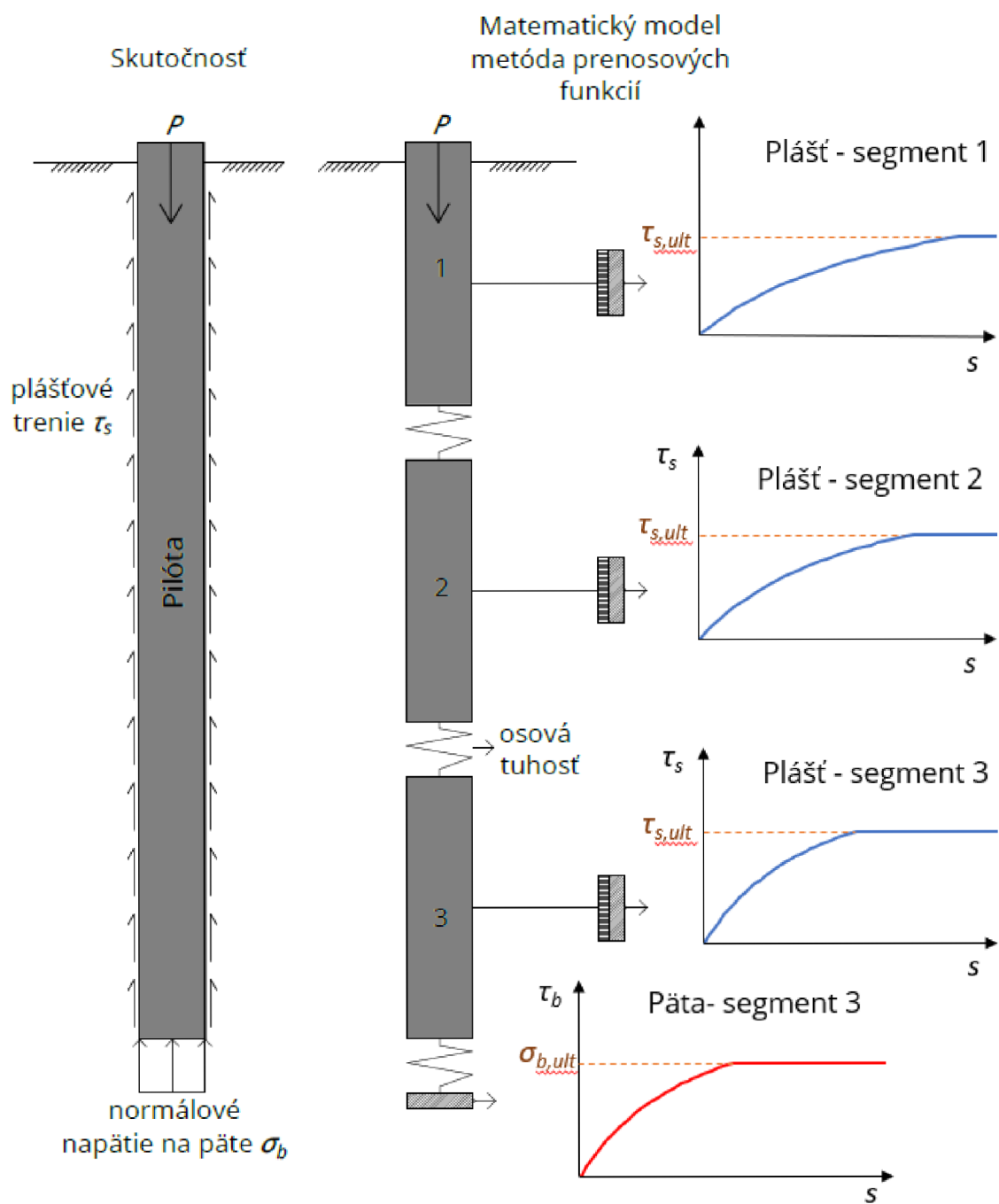
11. Ďalej sa opakujú kroky 4 až 11 pre segmenty 3, 4 až n po splnenie jednej z týchto podmienok:
- a) Sila v úrovni hornej hrany segmentu bude 0,
 - b) Posun v úrovni hornej hrany segmentu bude 0,
 - c) Dosiahne sa koniec analyzovanej pilóty.
12. Ak bude sila v úrovni hornej hrany medziľahlého segmentu 0, je potrebné overiť posun v tomto mieste. Ak bude posun v tomto mieste 0, pokračuje sa v kroku číslo 13, v opačnom prípade sa musí upraviť predpokladaný posun v hlave pilóty w_t^1 a opakovať kroky 2 až 12. Ak je jedna z podmienok a alebo b splnená, pokračuje sa v kroku číslo 13.
13. Výpočet celkovej sily prenesenej mobilizovaným plášťovým trením na jednotlivých segmentoch T podľa rovnice 2.10.

$$T = T_1 + T_2 + \dots + T_n \quad (2.10)$$

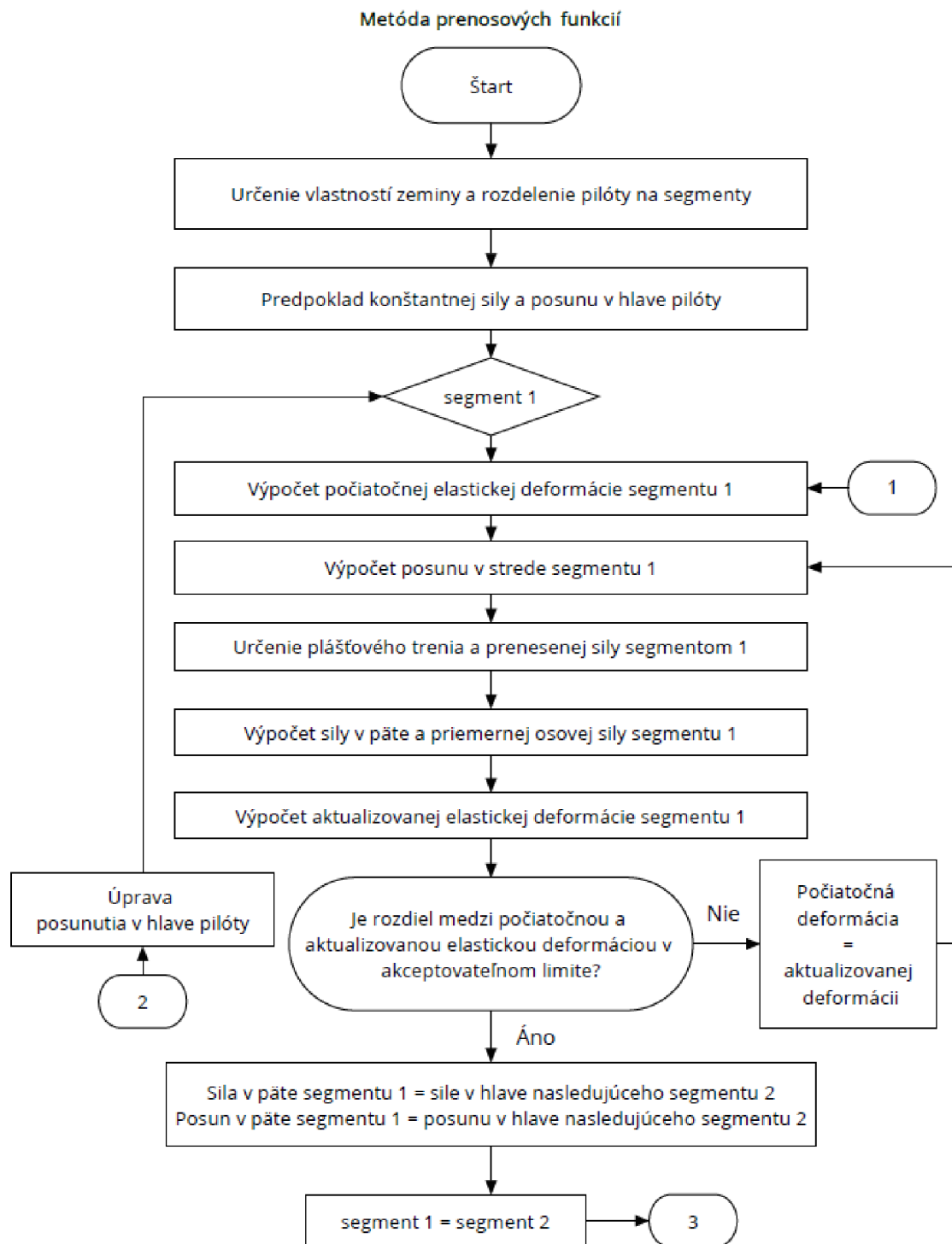
Ak je rozdiel medzi predpokladanou silou P_t^1 a vypočítanou silou T vyšší ako stanovený limit, opakujú sa kroky 2 až 13 s upravenou hodnotou posunu v hlave pilóty w_t^1 .

14. Ak sú vypočítaná sila T a predpokladaná sila P_t^1 zhodné, poskytnú nám jeden bod medznej zaťažovacej krivky danej pilóty.
15. Opakovaním krokov 1 až 15 vznikne databáza vzájomných posunov a síl v hlave pilóty a tým je možné zostaviť medznú zaťažovaciu krivku.

Algoritmus výpočtu metódou prenosových funkcií je zobrazený vývojovým diagramom na obrázku 2.2 a 2.3.

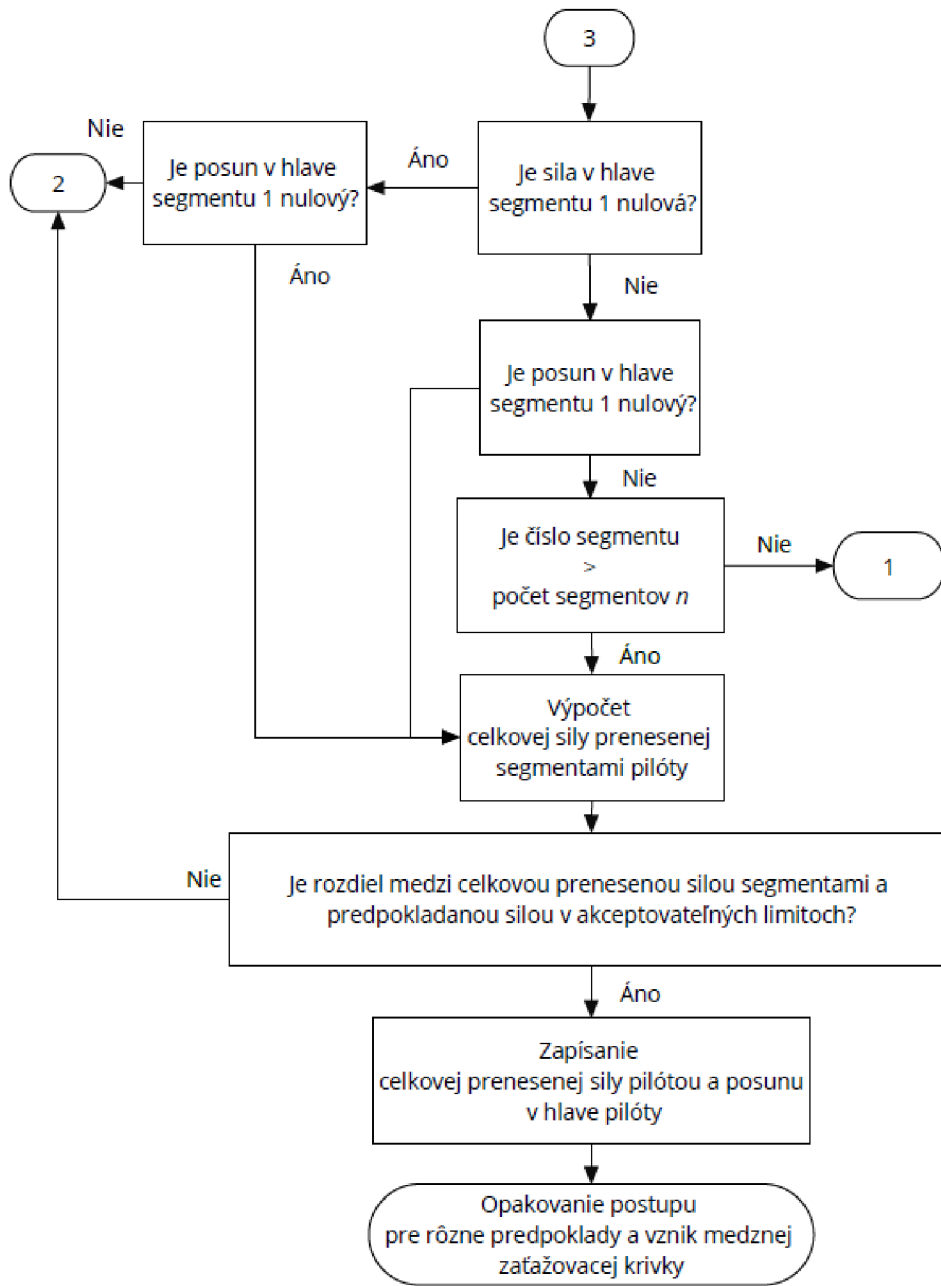


Obrázok 2.1 Priradenie funkcií segmentom plášťa a päte pilóty (Chalmovský a kol., 2021)



Obrázok 2.2 Vývojový diagram metódy prenosových funkcií

Metóda prenosových funkcií, pokračovanie

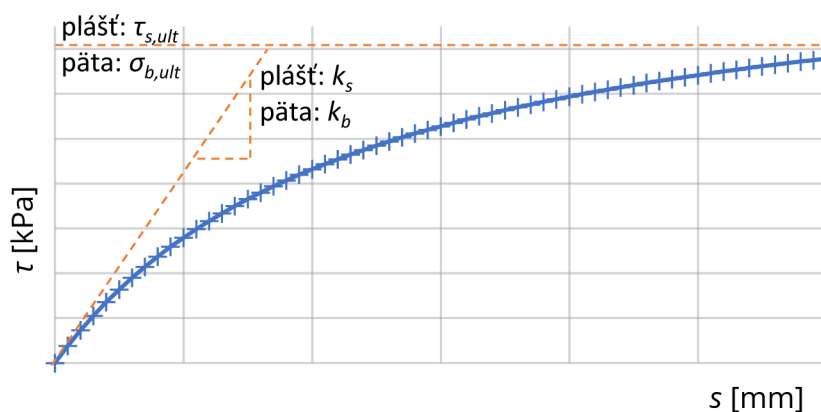


Obrázok 2.3 Vývojový diagram metódy prenosových funkcií, pokračovanie

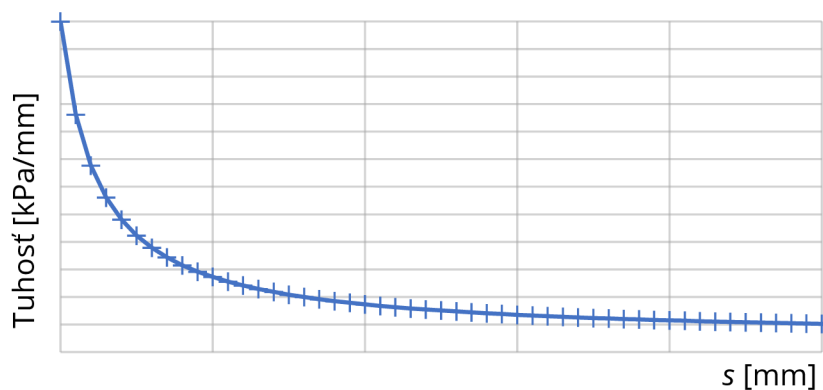
2.2. MOBILIZAČNÉ KRIVKY

2.2.1. HYPERBOLICKÉ (Bohn a kol., 2016)

Využitím francúzskej databázy zaťažovacích skúšok pilót boli zostavené hyperbolické prenosové funkcie zapísané podľa rovníc 2.11 a 2.12 v tabuľke 2.1, ktoré sú podobné prenosovým funkciám od Hirayama (Hirayama, 1990) pre plášť a pätu, a prenosovým funkciám od Fleming (Fleming, 1992) pre plášť. Parameter počiatocnej tuhosti M_s má pre plášť rovnaký význam ako v prenosovej funkcii. (Fleming, 1992) Pre pätu (Bohn a kol., 2016) nahradzujú modul pružnosti zeminy pod päťou parametrom počiatocnej tuhosti M_b . Na plášti je odporúčaná hodnota parametra $M_s = 0.0038$ pre hrubozrnné a jemnozrnné zeminy. V päte je odporúčaná hodnota parametra $M_b = 0.01$ pre všetky typy podložia. Tvar prenosových funkcií je zobrazený v grafe 2.1 a priebeh tuhosti s relatívnym posunom v grafe 2.2.



Graf 2.1 Hyperbolická prenosová funkcia podľa (Bohn a kol., 2016)



Graf 2.2 Zmena tuhosti vzhľadom k posunu pre hyperbolickú prenosovú funkciu

Tabuľka 2.1 Rovnice hyperbolických prenosových funkcií podľa (Bohn a kol., 2016) (Chalmrovský a kol., 2021)

Tvar t-z krivky	Zmena tuhosti	Počiatočná tuhosť	
$\tau_s = \frac{\tau_{s,ult} * S_s}{M_s * d_s + S_s}$	$\frac{d\tau_s}{ds_s} = \frac{\tau_{s,ult}}{M_s * d_s + S_s} - \frac{\tau_{s,ult} * S_s}{(M_s * d_s + S_s)^2}$	$k_s = \frac{\tau_{s,ult}}{M_s * d_s}$	(2.11)
$\sigma_b = \frac{\sigma_{b,ult} * S_b}{M_b * d_b + S_b}$	$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{\sigma_{b,ult}}{M_b * d_b + S_b} - \frac{\sigma_{b,ult} * S_b}{(M_b * d_b + S_b)^2}$	$k_b = \frac{\sigma_{b,ult}}{M_b * d_b}$	(2.12)

2.2.2. FZ MODEL (Frank a kol., 1982)

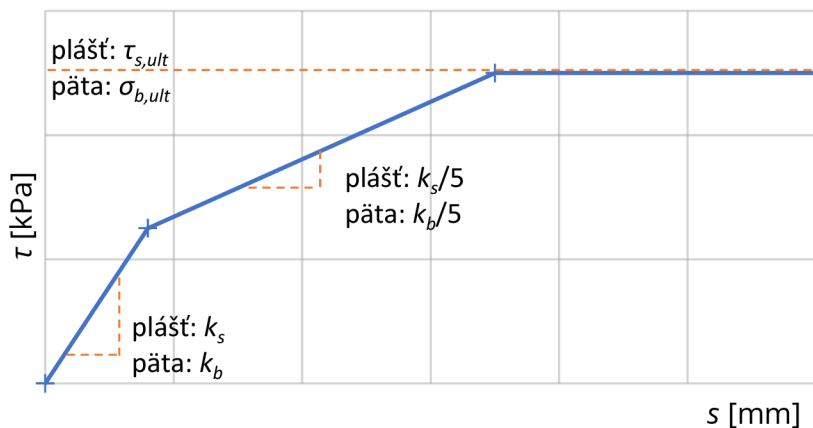
FZ model pre prenosovú funkciu je charakteristický parametrom k_s pre plášť a parametrom k_b pre päť, ktoré definujú tuhosť pred dosiahnutím polovičnej hodnoty medzného plášťového trenia prípadne napätia v päť. Po mobilizácii napätia vyššieho ako je polovica medzných hodnôt, vstupuje do výpočtu redukčný faktor s hodnotou 5. Parametre tuhosti sú naviazané na Ménardov presiometrický modul E_M a empirický parameter α_s pre plášť a α_b pre päť, ktorých odporúčané hodnoty (Frank a kol., 1982) sú v tabuľke 2.2. Vzťahy prenosových funkcií pre plášť sú zapísané v tabuľke 2.3. Pre päť platia rovnaké vzťahy, ale s napätím v päť σ_b a indexom b . V grafoch 2.3 a 2.4 je schematicky znázornený tvar prenosovej funkcie FZ modelu a priebeh tuhosti vzhľadom k relatívnemu posunu.

Tabuľka 2.2 Odporúčané hodnoty empirických parametrov α_s a α_b podľa (Frank a kol., 1982)

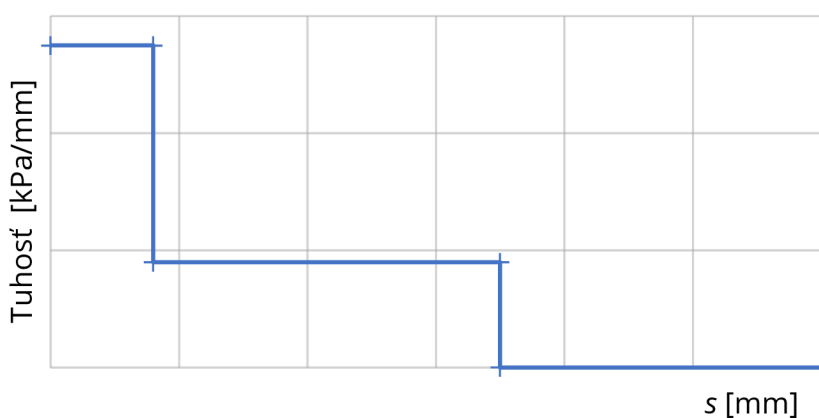
	Súdržné zeminy	Nesúdržné zeminy
α_s	2	0.8
α_b	11	4.8

Tabuľka 2.3 Rovnice prenosových funkcií FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982)

Tvar t-z krivky	Zmena tuhosti	Počiatočná tuhosť	
$\tau_s(s_s) = \frac{\alpha_s * E_M}{d_s} * S_s$	$\tau_s \leq \frac{\tau_{s,ult}}{2}$	$k_s = \frac{\alpha_s * E_M}{d_s}$	(2.13)
$\tau_s(s_s) = \frac{\alpha_s * E_M}{d_s * 5} * S_s$	$\frac{\tau_{s,ult}}{2} < \tau_s \leq \tau_{s,ult}$	$k_s = \frac{\alpha_s * E_M}{d_s}$	
	$\frac{d\tau_s}{ds_s} = 0$	$\tau_s = \tau_{s,ult}$	



Graf 2.3 Prenosová funkcia FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982)



Graf 2.4 Zmena tuhosti vzhľadom k posunu pre FZ model

2.2.3. AB1 MODEL (Abchir a kol., 2016)

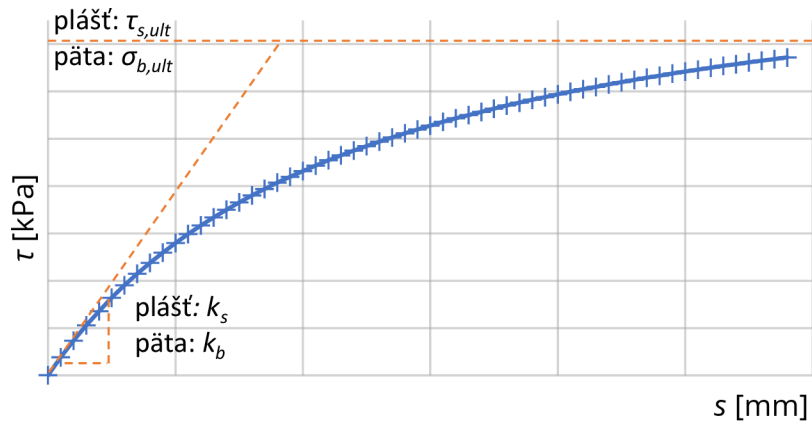
AB1 model pre prenosovú funkciu je nelineárny elastický model, ktorý predpokladá, že tuhosť zeminy v okolí pilóty je úmerná rozdielu medzných hodnôt napätí ($\tau_{s,ult}$, $\sigma_{b,ult}$) a momentálne mobilizovaným napätím (τ_s , σ_b). V porovnaní s FZ modelom do prenosových funkcií vstupujú aj parametre λ_s pre plášť, rovnica 2.14 a λ_b pre päta, rovnica 2.15 v tabuľke 2.5. Tieto parametre sú ovplyvnené medzným plášťovým trením $\tau_{s,ult}$, medzným napätím na päte $\sigma_{b,ult}$, Ménardovým presiometrickým modulom E_M , parametrami α_s a α_b , ktoré majú rovnakú úlohu ako v FZ modeli. Odporúčané hodnoty α_s a α_b podľa (Abchir a kol., 2016) sú uvedené v tabuľke 2.4. V grafoch 2.5 a 2.6 je schematicky znázornený tvar prenosovej funkcie AB1 modelu a priebeh tuhosti vzhľadom k relatívnemu posunu.

Tabuľka 2.4 Odporúčané hodnoty empirických parametrov α_s a α_b podľa (Abchir a kol., 2016)

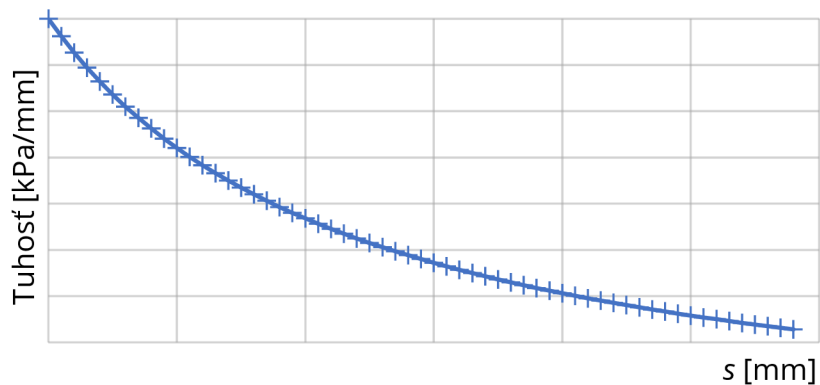
	ílly	piesky	krieda
α_s	1	0.8	2
α_b	11	4.8	9

Tabuľka 2.5 Rovnice prenosových funkcií AB1 modelu podľa (Abchir a kol., 2016)

Tvar t-z krivky	Zmena tuhosti	Počiatočná tuhosť	
$\tau_s(s_s) = \tau_{s,ult} * (1 - e^{-s_s/\lambda_s})$	$\frac{d\tau_s}{ds_s} = \frac{\tau_{s,ult} - \tau_s}{\lambda_s}$	$k_s = \frac{\tau_{s,ult}}{\lambda_s} = \frac{\alpha_s * E_M}{d_s} \gg \lambda_s = \frac{\tau_{s,ult} * d_s}{\alpha_s * E_M}$	(2.14)
$\sigma_b(s_b) = \sigma_{b,ult} * (1 - e^{-s_b/\lambda_b})$	$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{\sigma_{b,ult} - \sigma_b}{\lambda_b}$	$k_b = \frac{\sigma_{b,ult}}{\lambda_b} = \frac{\alpha_b * E_M}{d_b} \gg \lambda_b = \frac{\sigma_{b,ult} * d_b}{\alpha_b * E_M}$	(2.15)



Graf 2.5 Prenosová funkcia AB1 modelu podľa (Abchir a kol., 2016)



Graf 2.6 Zmena tuhosti vzhľadom k posunu pre AB1 model

2.3. SPÔSOB STANOVENIA MEDZNÉHO PLÁŠŤOVÉHO TRENIA V β METÓDE

V rámci tejto metódy je medzné plášťové trenie naviazané na efektívne geostatické napätie σ'_{or} vďaka parametru β . Parameter β je vypočítaný pomocou rovnice 2.17, kde K_s je súčiniteľ bočného tlaku pôsobiaci na plášť pilóty a δ je trecí uhol na rozhraní pilóta - zemina. Následne je možné vypočítať medzné plášťové trenie $\tau_{s,ult}$ podľa rovnice 2.16.

$$\tau_{s,ult} = \beta * \sigma'_{or} \quad (2.16)$$

$$\beta = K_s * \tan \delta \quad (2.17)$$

(Burland, 1973) odporúča použiť efektívny uhol vnútorného trenia v kritickom stave φ_{cv} ako trecí uhol na rozhraní pilóta - zemina δ . Pre normálne konsolidované zeminy sa tak dá hodnota parametra β zapísať rovnicou 2.18. Z toho vyplýva, že teoretická hodnota β sa pohybuje v rozmedzí 0.24 až 0.29 pre typické hodnoty uhlu vnútorného trenia (20° až 30°). Experimentálne určené hodnoty vychádzajúce zo zaťažovacích skúšok pilót sa pohybujú v rozmedzí 0.25 až 0.40.

$$\beta = K_s * \tan \delta = (1 - \sin \varphi_{cv}) * \tan \varphi_{cv} \quad (2.18)$$

Pre prekonsolidované súdržné zeminy stanovil (Meyerhof, 1976) hodnotu súčiniteľa bočného tlaku K_s ako 75% hodnoty K_0^{oc} , čo je súčiniteľ zemného tlaku v pokoji, podľa rovnice 2.19. Zatiaľ čo (Brown a kol., 2010) stanovili K_s rovný hodnote K_0^{oc} . Podľa tohto je možné stanoviť súčiniteľ bočného tlaku K_s podľa rovnice 2.20, kde OCR je stupeň prekonsolidácie.

$$K_s = 0.75 * K_0^{oc} = 0.75 * (1 - \sin \varphi_{cv}) * OCR^{0.5} \quad (2.19)$$

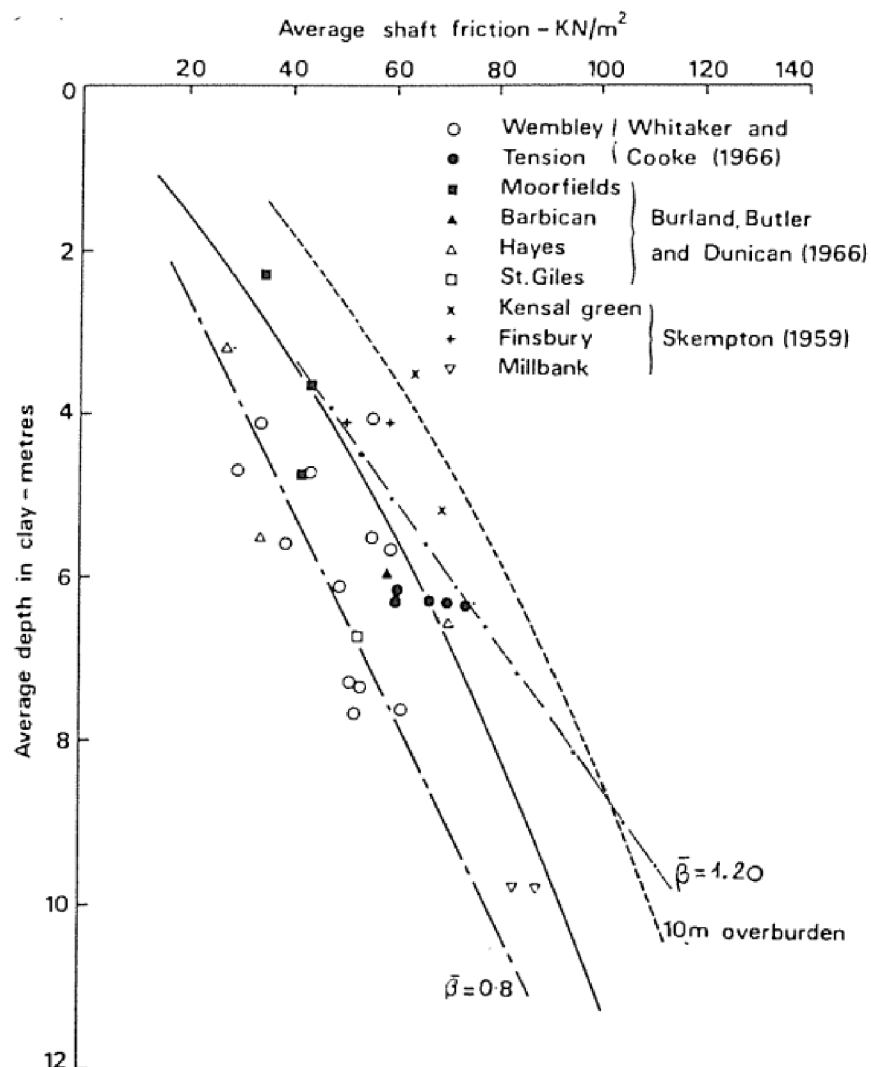
$$K_s = K_0^{oc} = (1 - \sin \varphi_{cv}) * OCR^{\sin(\varphi_{cv})} \quad (2.20)$$

Ďalej sa súčiniteľom bočného tlaku zaoberali (Vardanega a kol., 2012), ktorí určili, že stanovenie tohto súčiniteľa vychádza z vlastnej tiaže betónu pôsobiaceho na steny vrtu podľa rovnice 2.21.

γ_c je objemová tiaž betónu, γ je objemová tiaž zeminy, z je hĺbka a u je hydrostatický pórový tlak v hĺbke z .

$$K_s = \frac{\gamma_c * z - u}{\gamma * z - u} \quad (2.21)$$

(Burland, 1973) experimentálne stanovil hodnotu parametra β v rozsahu 0.8 až 1.2 pre prekonsolidované londýnske íly na základe závislosti medzi dĺžkou pilóty a priemerným medzným plášťovým trením (obrázok 2.4). V porovnaní s hodnotami pre normálne konsolidované íly sú tieto hodnoty značne vyššie, čo je spôsobené pravdepodobne vyššou hodnotou K_0 .



Obrázok 2.4 Závislosť medzného plášťového trenia na hĺbke (Burland, 1973) (Chalmrovský a kol., 2021)

Vyššie popísané prístupy sa zhodujú v tvrdení, že vodorovné napätie pôsobiace na pilótu sa nemení v priebehu zaťažovania. Ak zohľadníme zmenu radiálneho napätia v dôsledku zhotovenia pilóty $\Delta\sigma'_{hc}$ a následného zaťažovania $\Delta\sigma'_{hl}$ vzťah pre medzné plášťové trenie je možné zovšeobecniť do rovnice 2.22. (Chalmovský a kol., 2021)

$$\tau_{s,ult} = (\sigma'_{h0} + \Delta\sigma'_{hc} + \Delta\sigma'_{hl}) * \tan \delta \quad (2.22)$$

V priebehu zaťažovania dochádza k zmenám radiálneho napätia najmä z dôvodu rotácie hlavných napätí a dilatancie zemín v šmykovej zóne na rozhraní pilóta - zemina. (Chalmovský a kol., 2021)

2.4. PARAMETER β VO VÝPOČTOVOM MODELI

2.4.1. ÚROVEŇ RIEŠENIA 1(M)

V tejto úrovni je uvažovaný parameter β rovnaký pre každý segment pilóty, ďalej označovaný ako β_{av} . Je možné ho zapísať podľa vzťahu 2.23. Je tu relevantné použitie kritického uhlu vnútorného trenia, keďže sa predpokladá, že zemina v kontakte s plášťom je vplyvom zhotovenia porušená. Z hľadiska princípov mechaniky zemín je tento prístup vhodný pre normálne konsolidované súdržné zeminy (NC), v ktorých nie je súčiniteľ bočného tlaku závislý na hĺbke. Vzťah 2.23 je možné upraviť do podoby 2.24. Tento prístup je možné v podmienkach ČR využiť taktiež pre prekonsolidované súdržné zeminy terciárneho veku, nad ktorými sa nachádza kvartérny pokryv a zmena koeficientu zemného tlaku v pokoji už nie je tak značná.

$$\beta_{av} = K_s * \tan \delta = K_s * \tan \varphi_{cv} \quad (2.23)$$

$$\beta_{av} = K * \tan \delta = K_0^{NC} * \tan \varphi_{cs} = (1 - \sin \varphi_{cv}) * \tan \varphi_{cv} \quad (2.24)$$

Pri použití úrovne 1(M) je možné vložiť parameter β_{av} do výpočtu priamo alebo je možné ho odvodiť podľa vzťahu 2.24 pomocou kritického uhlu vnútorného trenia φ_{cv} .

Ten je možné stanoviť napríklad pomocou kruhovej šmykovej skúšky, triaxiálnej šmykovej skúšky alebo pomocou odporúčaných hodnôt podľa (Budhu, 2011). Táto úroveň riešenia bola v inverznej analýze využitá pre normálne konsolidované súdržné zeminy prípadne hrubozrnné zeminy. (Chalmovský a kol., 2021)

2.4.2. ÚROVEŇ RIEŠENIA 2(A)

Okrem riešenia s konštantnou hodnotou parametra β s hĺbkou je k dispozícii aj riešenie na úrovni 2(A), ktorá umožňuje premennú hodnotu parametra β na základe hĺbky a stupňa prekonsolidácie, ktorý je kvantifikovaný parametrom POP . Parameter POP vyjadruje rozdiel medzi maximálnym zvislým efektívnym napätím v minulosti a efektívnym napätím v prítomnosti. V tejto úrovni je zohľadnená závislosť súčiniteľa bočného zemného tlaku na hĺbke. Táto závislosť je dôležitým aspektom chovania prekonsolidovaných súdržných zemín (pre ktoré bola táto úroveň využitá aj v inverznej analýze). Pre parameter β platí vzťah 2.25, kde stupeň prekonsolidácie OCR vyjadruje pomer maximálneho napätia v minulosti a efektívneho geostatického napätia v súčasnosti. Rovnako ako v predošlej časti práce. (Chalmovský a kol., 2021)

$$\beta = (1 - \sin \varphi_{cv}) * OCR^{\sin(\varphi_{cv})} * \tan \varphi_{cv} \quad (2.25)$$

Nevýhodou parametra OCR je jeho závislosť na hĺbke. Každý segment pilóty by musel mať definovanú samostatnú hodnotu OCR . Z tohto dôvodu bol vzťah preformulovaný do podoby s využitím práve parametra POP na vzťah 2.26. POP je teda podľa už spomínanej definície konštantný s hĺbkou.

$$\beta = (1 - \sin \varphi_{cv}) * \left(\frac{POP}{\sigma'_{or}} + 1\right)^{\sin(\varphi_{cv})} * \tan \varphi_{cv} \quad (2.26)$$

V tejto úrovni riešenia je potom nutné definovať dva vstupné parametre φ_{cv} (kritický uhol vnútorného trenia) a POP .

Hodnotu POP je možné určiť z edometrickej skúšky alebo využitím korelácie s výsledkami CPT skúšok, napríklad vzťahy odvodené podľa (Kulhawy a kol., 1990). Použitie korelácie odporu na hrote na maximálnom napätí v minulosti bude uvedené v kapitole 6. INVERZNÉ ANALÝZY ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK.

2.5. ZHRNUTIE

Táto časť práce zahŕňa konečnú sumarizáciu prenosových funkcií použitých v následnej inverznej analýze a spôsob stanovenia medzného plášťového trenia v β metóde. V tabuľke 2.6 sú uvedené vstupné parametre do jednotlivých prenosových funkcií a ich počet. Ide o prenosové funkcie hyperbolické podľa (Bohn a kol., 2016), modelu FZ a modelu AB1. V tabuľke 2.7 sú následne uvedené odporúčané hodnoty empirických parametrov (α_s , α_b) podľa (Frank a kol., 1982) pre FZ model, podľa (Abchir a kol., 2016) pre AB1 model a parametrov počiatočnej tuhosti (M_s , M_b) pre hyperbolickú prenosovú funkciu podľa (Bohn a kol., 2016). Od týchto parametrov je odvodené medzné plášťové trenie a medzné napätie v päte vo všetkých prenosových funkciách.

Tabuľka 2.6 Prehľad prenosových funkcií a ich vstupných hodnôt

Model	Charakteristika	Parametre tuhosti		Počet
Hyperbolická (Bohn a kol., 2016)	Nelineárny model hyperbola	Plášť	M_s, d_s	2
		Päta	M_b, d_b	2
FZ model	Trilineárny model	Plášť	α_s, E_M, d_s	3
		Päta	α_b, E_M, d_b	3
AB1 model	Nelineárne elastický model	Plášť	α_s, E_M, d_s	3
		Päta	α_b, E_M, d_b	3

Tabuľka 2.7 Odporúčané hodnoty empirických vstupných parametrov jednotlivých prenosových funkcií

Model	M_s	M_b	α_s	α_b
Hyperbolická (Bohn a kol., 2016)	0.0038 pre jemnozrnné aj hrubozrnné zeminy	0.01 pre všetky typy podložia	-	-
FZ model	-	-	2 (súdržné) 0.8 (nesúdržné)	11 (súdržné) 4.8 (nesúdržné)
AB1 model	-	-	1 (súdržné) 0.8 (nesúdržné) 2 (krieda)	11 (súdržné) 4.8 (nesúdržné) 9 (krieda)

3. STANOVENIE MÉNARDOVHO PRESIOMETRICKÉHO MODULU E_M NA ZÁKLADE PRESIOMETRICKÝCH SKÚŠOK

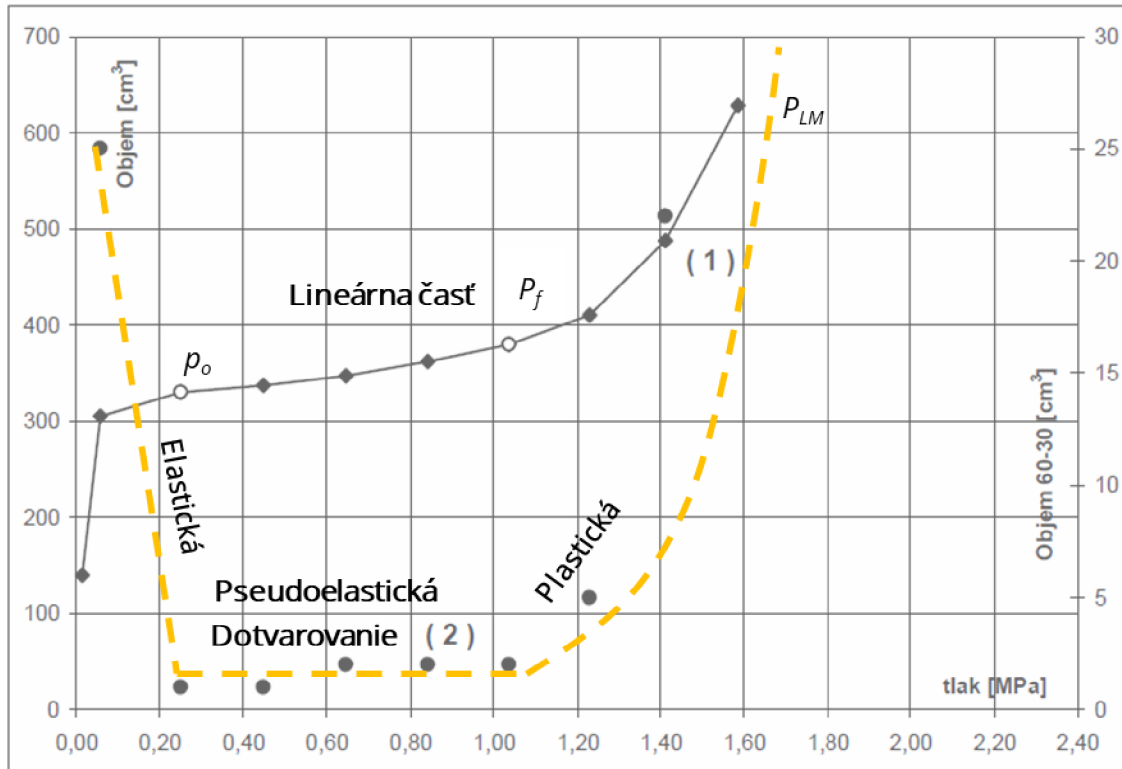
3.1. METODIKA PRESIOMETRICKÝCH SKÚŠOK

Presiometrické skúšky sú skúšky vykonávané priamo v nepaženej časti vrtu, ktorý musí byť stabilný a ide teda o skúšky „in situ“. Podstatou je namáhanie stien vrtu priemeru 46 až 52 mm pre sondu priemeru 44 mm (označenie AX), 60 až 66 mm pre sondu priemeru 58 mm (označenie BX) a 74 až 80 mm pre sondu priemeru 70/74 mm (označenie NX) podľa (ČSN EN ISO 22476-4, 2013). Pričom sa sleduje objemová zmena počiatočného profilu so súčasným sledovaním tlaku vody v sústave. Medzi primárne merané veličiny patria (Hudek, 2007):

- p_o začiatok pseudoelastickej fázy, t.j. radiálne napätie, pri ktorom dochádza k opätovnému uzavieraniu pórov alebo deliacich plôch roztvorených po uvoľnení v dôsledku odvrátenia.
- p_f hranica medzi pseudoelastickou a plastickou fázou pretvorenia, resp. koniec lineárneho štádia pretvárneho diagramu.
- p_{LM} medzný radiálny tlak, pri ktorom sa porušuje materiál na stenách vrtu (vytváranie šmykových plôch v dôsledku prekročenia šmykovej pevnosti). Je spravidla extrapolovaný (pri jeho vlastnom dosiahnutí by sa v dôsledku vývoja šmykových plôch vrt zavalil), je konštruovaný napríklad ako asymptota (v smere osy úsečiek) k pretvárnemu diagramu.
- E_M Ménardov presiometrický modul pretvárnosti je najdôležitejším výsledkom skúšky, ktorý je stanovený vždy z lineárnej pseudoelastickej fázy pretvárneho diagramu (a je teda maximálnou hodnotou modulov pretvárnosti v závislosti na oboroch napätosti). Výpočet je uvedený v nasledujúcej časti práce.

Ďalej je možné pomocou empirických vzťahov získať z primárnych veličín sekundárne veličiny akými sú v tomto prípade napríklad uhol vnútorného trenia, edometrický modul deformácie alebo modul pretvárnosti.

Presiometrická skúška umožňuje získať závislosť deformácie stien vrtu na pôsobiacom tlaku, ktorý sa v meraní zvyšuje po stupňoch až po kapacitu prístroja, alebo po medzný tlak, pri ktorom nastane porušenie horninového prostredia. Na obrázku 3.1 je zobrazená schéma výstupu presiometrickej skúšky s jednotlivými fázami.

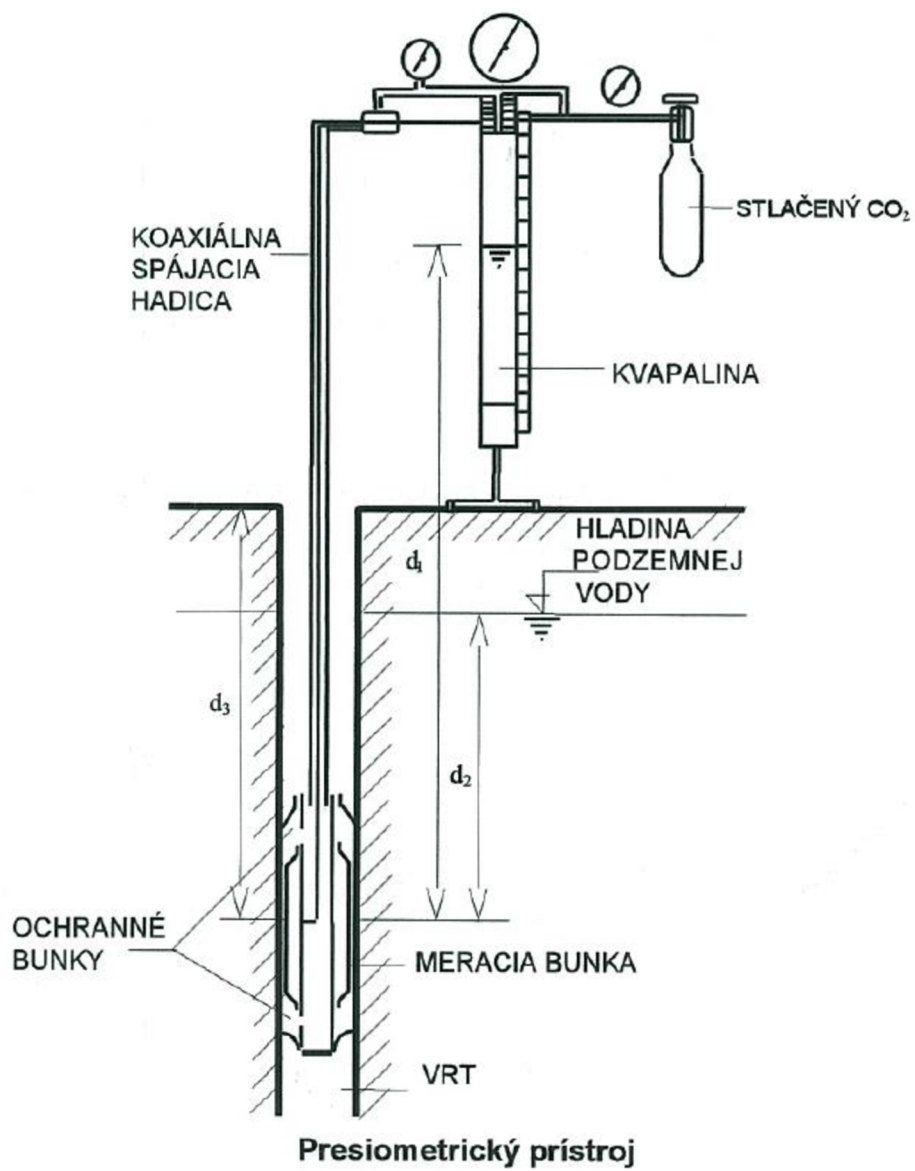


Obrázok 3.1 Schéma výstupu presiometrickej skúšky s jednotlivými fázami (Hudek, 2007) (SG-Geotechnika a.s., 2002)

Na obrázku 3.1 je možné vidieť meraný tlak na vodorovnej osi a meraný objem na zvislej osi. Plná krivka predstavuje namerané hodnoty v priebehu skúšky (závislosť medzi celkovou objemovou deformáciou a vyvedeným radiálnym tlakom ($V - p$)) a prerušovaná krivka predstavuje závislosť medzi rozdielom objemu bunky v 30., resp. 60. sekunde a vyvedeným radiálnym tlakom ($V_{30/60} - p$) daného zaťažovacieho stupňa. Na vodorovnej osi sú hodnoty vyvedeného radiálneho tlaku v MPa, na zvislej osi vľavo sú celkové objemové deformácie v cm^3 a na zvislej osi vpravo sú hodnoty rozdielov objemov meraných po 60, resp. 30 sekundách v cm^3 . Priebeh krivky je možné pomerne zreteľne rozdeliť do 3 fáz - elastická, pseudoelastická a plastická fáza, podľa toho v akom štádiu sa skúška, resp. zemina nachádzajú.

Na základe uváženia sa presiometrické skúšky vykonávajú v rôznych hĺbkach jedného vrtu. Pre každú zvolenú hĺbku skúšky sú zaznamenané hodnoty tlaku a objemu po 15, 30 a 60 sekundách pre každý zaťažovací stupeň. Tento postup sa aplikuje pre každú zvolenú hĺbku vo vrte a stanovia sa uvedené primárne a sekundárne charakteristiky. Na základe týchto výsledkov je možné zaviesť vzťah hĺbky a presiometrického modulu za predpokladu, že v danej lokalite prípadne inej lokalite, ale v podobnom podloží je zrealizovaných viac vrtov. Táto závislosť bude popísaná v ďalšom pokračovaní práce, 4.2. DEFINOVANIE ZÁVISLOSTI E_M A HĹBKY.

Na obrázku 3.2 je zobrazená schéma presiometrického prístroja. Ten sa skladá z valcovej radiálnej rozťažnej sondy, ktorá sa zapúšťa do vrtu na úroveň realizovanej skúšky a meracieho prístroja, ktorý zostáva na povrchu. Presiometrická sonda je z vrtu spojená s meracím prístrojom koaxiálnou hadicou. Tá je rozdelená na vnútornú a vonkajšiu. Vnútorná je naplnená vodou, resp. nemrznúcou kvapalinou a vonkajšia slúži na prívod stlačeného plynu, konkrétne ide o CO₂, vzduch alebo dusík (Matys a kol., 1990). Presiometrická sonda sa skladá z 3 buniek. Vnútorná - meracia bunka a dve ochranné bunky. Do meracej bunky je privádzaná kvapalina, ktorá vyvodzuje deformáciu stien vrtu, pričom do ochranných buniek je privádzaný stlačený plyn. Presiometrická skúška sa uskutočňuje v približne 10 zaťažovacích stupňoch, pričom sa deformácie odčítavajú vo funkcii času pre každý zaťažovací stupeň v intervaloch 15, 30 a 60 sekúnd do ustálenia tlaku v meracej bunke a ochranných bunkách. (INGEO a.s. Žilina, 1999) Presiometrické skúšky sú vhodné pre základovú pôdu typu skalné horniny, súdržné zeminy a nesúdržné zeminy (s väčším obsahom jemnozrnnej frakcie).



Obrázok 3.2 Schéma presiometrického prístroja (INGEO a.s. Žilina, 1999)

3.2. VÝPOČET MÉNARDOVHO PRESIOMETRICKÉHO MODULU E_M

Výsledkami presiometrických skúšok sú dve krivky. Príklad výsledku je zobrazený na obrázku 3.1. Plná krivka vyjadruje závislosť celkovej objemovej deformácie na vyvodenom radiálnom tlaku a prerušovaná krivka vyjadruje závislosť rozdielu objemov v 60. a 30. sekunde na vyvodenom radiálnom tlaku, tzv. funkcia tečenia. Presiometrický modul E_M sa stanovuje vždy z lineárnej pseudoelastickej fázy pretvárneho diagramu pomocou rovnice 3.1. (Varaksin Serge, 2015)

$$E_M = K * \frac{\Delta p}{\Delta V} = K * \frac{p_f - p_o}{V_2 - V_1} \quad (3.1)$$

V tejto rovnici K predstavuje koeficient sondy, ktorý sa určí podľa rovnice 3.2.

$$K = 2 * (1 + \nu) * (V_0 + V_m) \quad (3.2)$$

Kde ν je Poissonovo číslo, V_0 je základný objem sondy (nulové čítanie) a V_m je priemerný objem bunky vo vrte medzi tlakmi v meracej bunke presiometrického prístroja p_o a p_f podľa rovnice 3.3. p_o je tlak, pri ktorom dochádza k elastickej pretváraniu a p_f tlak, pri ktorom dochádza k plastickej pretváraniu stien vrtu.

$$V_m = (V_1 + V_2) / 2 \quad (3.3)$$

Ďalej sa v rovnici 3.1 vyskytujú celkové objemy bunky merané vo vrte V_1 (pri tlaku p_o) a V_2 (pri tlaku p_f).

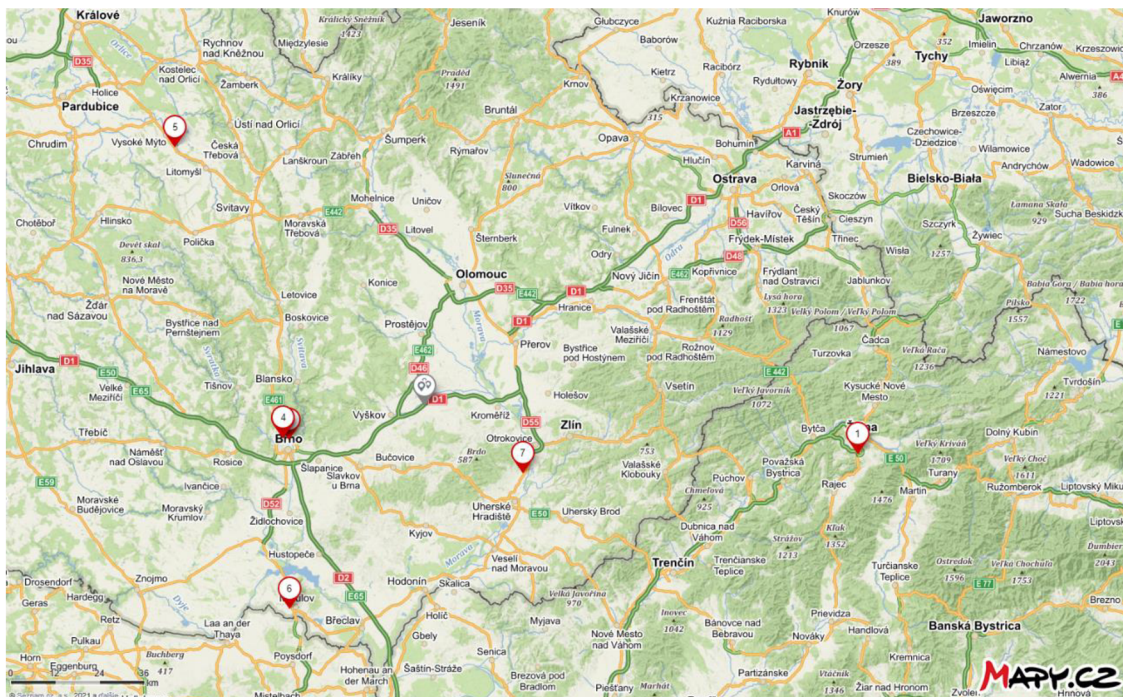
4. VYHODNOTENIE PRESIOMETRICKÝCH MODULOV

4.1. ZOZNAM LOKALÍT

Pre určenie Ménardovho presiometrického modulu boli spracované presiometrické skúšky z rôznych lokalít a teda aj geológií. Konkrétne išlo o 8 lokalít, ktorých zoznam je uvedený v tabuľke 4.1. Ku každej lokalite je priradený počet presiometrických skúšok, ktoré boli uskutočnené.

Tabuľka 4.1 Zoznam lokalít presiometrických skúšok

Lokalita	Počet skúšok	Číslo na mape
D1 Lietavská Lúčka - Višňové - Dubná Skala (INGEO a.s. Žilina, 1999)	11	1
V1, Arboretum, Brno (GEOSTAR, spol.s r.o., 2012)	2	2
Průzkumné štoly, VMO Dobrovského A, Brno I/42 (SG-Geotechnika a.s., 2002)	1	3
Ul. Slovinská, Brno (GEOSTAR, spol. s r.o., 2009)	6	4
D35 Džbánov – Litomyšl (GEOSTAR, spol. s r.o., 2020)	18	5
D52 Mikulov	24	6
R55 Napajedla – Babice (GEOSTAR, spol. s r.o., 2008)	48	7
Celkom	110	-



Obrázok 4.1 Mapa s lokalitami presiometrických skúšok (Mapy.cz, 2021)

Z uvedených lokalít a k nim patriacim presiometrických skúšok sa väčšina nachádzala v súdržných zeminách. V nesúdržných zeminách bolo len nepatrné množstvo skúšok. Skúšky boli rozdelené do 5 skupín na základe triedy zeminy, resp. horniny zemného prostredia popísaného vo výsledkoch presiometrických skúšok. Konkrétne skupiny vrátane početnosti skúšok sú uvedené v tabuľke 4.2. Celkový počet je vyšší o 2 oproti tabuľke 4.1 z dôvodu nedostatočného popisu geológie na zaradenie do konkrétnej skupiny v dvoch prípadoch. Preto boli tieto prípady vložené do skupiny F5 – F8 a zároveň do skupiny R4 – R6.

Tabuľka 4.2 Početné zastúpenie presiometrických skúšok v jednotlivých geológiách

Skupina zemín	Početné zastúpenie
Štrky	4
Piesky	3
F1 – F4	25
F5 – F8	35
R4 – R6	45
Celkom	112

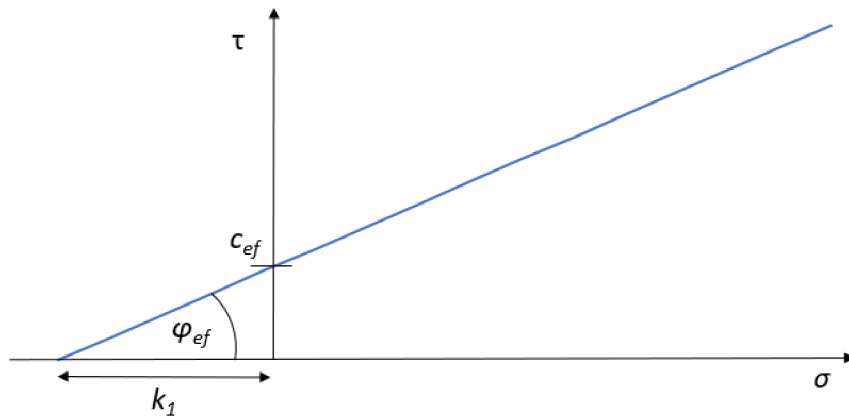
4.2. DEFINOVANIE ZÁVISLOSTI E_M A HĽBKY

V tomto prípade je hĺbka skúšky zakomponovaná v hodnote efektívneho geostatického napätia σ'_{or} . Predpoklad vychádza z rovnakej geológie po dĺžke vrtu a preto sa efektívne geostatické napätie lineárne zvyšuje. To platí nad hladinou podzemnej vody (HPV). V mieste, kde sa nachádza hladina podzemnej vody vzniká zlom v dôsledku pôsobenia pórového tlaku. Pre každú presiometrickú skúšku v určitej hĺbke, bolo preto vypočítané efektívne geostatické napätie, ktoré bolo vynesené na zvislú os grafu závislosti σ'_{or} na E_M . Predpoklad, že so stupňujúcou sa hĺbkou, resp. σ'_{or} stúpa aj hodnota E_M , je definovaný vzťahom 4.1. (Schanz a kol., 1999)

$$E_M = E_{M,REF} * \left(\frac{k_1 + \sigma'_{or}}{k_1 + \sigma'_{or,REF}} \right)^m \quad (4.1)$$

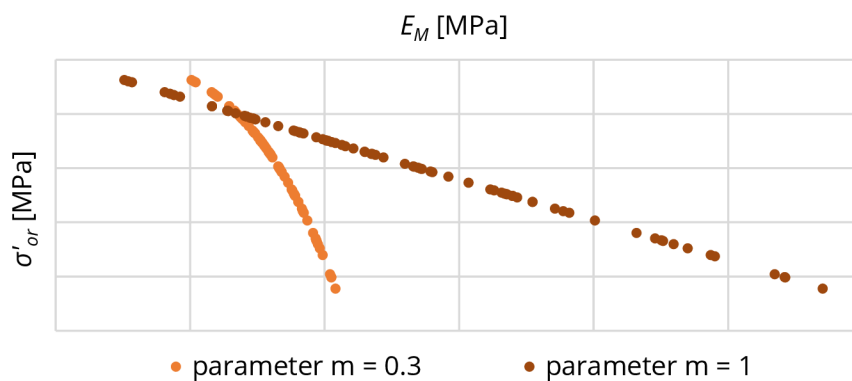
Použitý iteračný postup stanovenia E_M bude vysvetlený v nasledujúcej časti práce. Parameter k_1 predstavuje teoretickú ťahovú pevnosť zeminy zapísanú rovnicou 4.2 a zobrazenú v obrázku 4.4.

$$k_1 = c_{ef} * \cotg \varphi_{ef} \quad (4.2)$$



Obrázok 4.2 Vysvetlenie parametra k_1

V rovnici predstavuje c_{ef} efektívnu súdržnosť danej zeminy a φ_{ef} efektívny uhol vnútorného trenia. Parametru k_1 bola v iteračnom postupe obmedzená hodnota 0 až hodnota z rovnice 4.2 pre danú zeminu, kde hodnoty c_{ef} a φ_{ef} boli volené na základe smerových normových charakteristík (ČSN 73 1001, 1988). $\sigma'_{or}{}^{REF}$ vyjadruje pevne stanovenú hodnotu referenčného geostatického napätia 100 kPa a parameter m ovplyvňuje linearitu závislosti E_M a σ'_{or} . Je stanovený taktiež iteračne a obmedzený na hodnoty 0 až 1. Pričom pri hodnote 1 nadobúda závislosť lineárny tvar a pri nižších hodnotách nelineárny tvar, príklad priebehu v grafe 4.1.



Graf 4.1 Zobrazenie vplyvu parametra m na linearitu závislosti E_M a σ'_{or} .

4.3. ELIMINÁCIA ODLÁHLÝCH HODNÔT

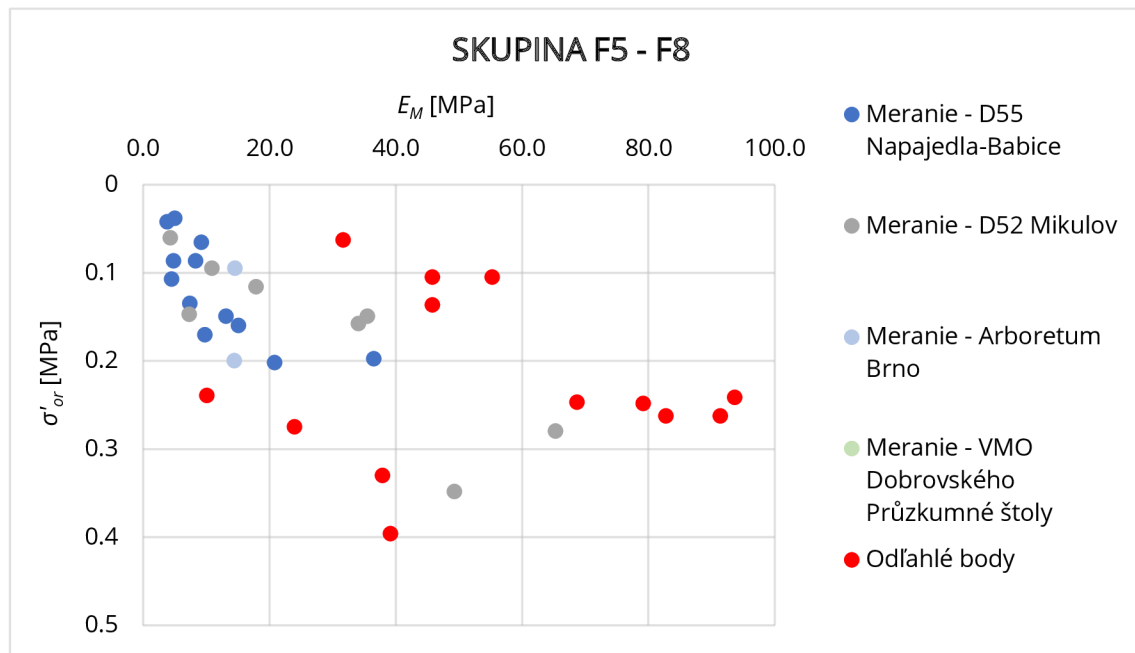
V rámci výsledkov presiometrických skúšok z lokalít uvedených v časti 4.1. ZOZNAM LOKALÍT, boli dopočítané uvedené charakteristiky zemín v okolí skúšobnej bunky. Medzi tieto charakteristiky patrili tlak na medzi dotvarovania, tlak na medzi únosnosti prostredia, Ménardov presiometrický modul a edometrický modul. Z týchto charakteristík bol pre analýzu dôležitý Ménardov presiometrický modul E_M .

V každej presiometrickej skúške boli uvedené okolnosti skúšky. Medzi ne patrili presná identifikácia skúšky, hĺbka skúšky, úroveň HPV, popis zemného prostredia a typ presiometrickej bunky. Na základe tohto popisu bola zemina zatriedená do tried podľa ČSN 73 1001. (ČSN 73 1001, 1988) Ďalej bola zemine priradená objemová tiaž podľa smerových normových charakteristík ČSN 71 1001. (ČSN 73 1001, 1988)

Podľa týchto charakteristík bolo možné určiť efektívne geostatické napätie v mieste skúšky. Pre každú presiometrickú skúšku bola teda dostupná hodnota presiometrického modulu E_M a hodnota efektívneho geostatického napätia σ'_{or} . Tieto hodnoty predstavovali body v grafe závislosti E_M a σ'_{or} . Závislosť je prostredníctvom hĺbky popísaná v časti 4.2. DEFINOVANIE ZÁVISLOSTI E_M A HĽBKY. Pre každú skupinu zemného prostredia, ktoré sú popísané v časti 4.1. bol teda zostavený graf závislosti E_M a σ'_{or} . Príklad takéhoto grafu je uvedený v grafe 4.2. Konkrétne ide o skupinu zemín F5 – F8.

V grafe je badateľná závislosť medzi efektívnym geostatickým napätím a presiometrickým modulom. Nezanedbateľné množstvo bodov je však odľahlých a tie by hodnotu určovaného presiometrického modulu pre danú skupinu zemného prostredia značne ovplyvňovali. Vzdialené body môžu byť spôsobené často neuvedenou chybou merania alebo samotným zemným prostredím. Prítomnosť napríklad úlomkov horniny vo veľkosti desiatok milimetrov v okolí meracej bunky môže značne zvýšiť hodnoty následne vypočítaného presiometrického modulu.

Naopak lokálna prítomnosť zemín s mäkšou konzistenciou mohla spôsobiť odľahlosť bodov na inverznú stranu ako v už spomínanom prípade s prítomnosťou úlomkov horniny.



Graf 4.2 Príklad zobrazenia závislosti E_M a σ'_{or} pre skupinu F5 - F8 a odľahlých bodov

Tieto body nazývame odľahlé (červené body v grafe 4.2) a bolo potrebné ich eliminovať regresnou analýzou podľa (Pardoe, 2012), ktorá prostredníctvom iteračného spôsobu vyradila odľahlé body z vyhodnotenia presiometrického modulu. Sledovaný bol aj koeficient determinácie, podľa ktorého je možné považovať regresný model za presný pri hodnote > 0.8 . Tento postup bude vysvetlený v pokračovaní tejto časti práce.

Pre výpočet a každú iteráciu bol použitý doplnok Riešiteľ v programe Microsoft Excel, ktorého nastavenie bude uvedené ďalej. Postup je spísaný v jednotlivých krokoch nasledovne:

1. Výpočet náhradného presiometrického modulu E_{Mi}' regresného modelu pre každú skúšku i na základe referenčnej hodnoty presiometrického modulu $E_{M,REF}$, ktorého hodnota bola zvolená riešiteľom. Výpočet prebehol podľa rovnice 4.3.

$$E_{Mi}' = E_{M,REF} * \left(\frac{k_1 + \sigma'_{ori}}{k_1 + \sigma'_{or,REF}} \right)^m \quad (4.3)$$

2. Nasledoval výpočet rezidia e_i , rozdielu vypočítaného E_{Mi}' a nameraného E_{Mi} zo skúšky. Podľa rovnice 4.4.

$$e_i = E_{Mi} - E_{Mi}' \quad (4.4)$$

3. Táto hodnota bola použitá do rovnice 4.5 pre získanie normovaného rezídia r_i .

$$r_i = \frac{|e_i|}{\sqrt{MS_E * (1-h_i)}} \quad (4.5)$$

Kde MS_E je stredná kvadratická odchýlka a vypočíta sa podľa rovnice 4.6.

$$MS_E = \frac{SS_E}{n - k - 1} \quad (4.6)$$

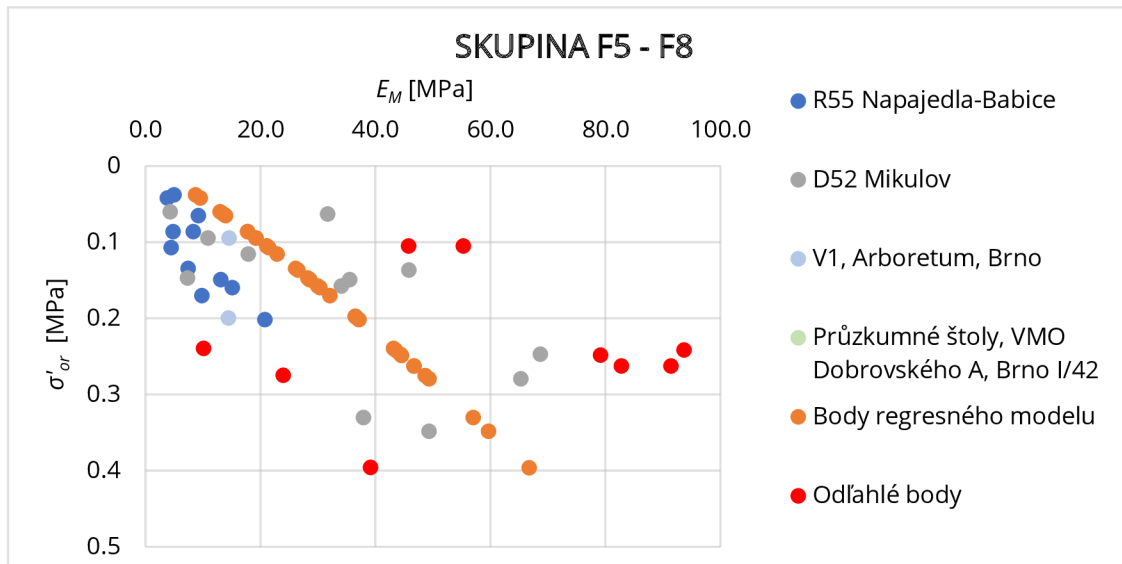
Kde SS_E je súčet druhých mocnín odchýlok e_i od ich strednej hodnoty e' , ktorú je možné získať aj pomocou funkcie DEVSQ v programe Microsoft Excel. n je počet skúmaných prípadov, v našom prípade presimetričných skúšok. k je počet neznámych, v našom prípade 1. Posledným parametrom v rovnici 4.5 je h_i , vzdialenosť od stredu hodnôt. Tá sa vypočíta pomocou rovnice 4.7.

$$h_i = \frac{1}{n} * \frac{\sigma'_{ori} - \sigma''_{or}}{SS_x} \quad (4.7)$$

Kde n predstavuje počet neznámych, σ'_{ori} hodnotu efektívneho geostatického napätia v mieste skúšky, σ''_{or} strednú hodnotu efektívneho geostatického napätia zo všetkých skúšok a SS_x rozptyl, ktorý je vypočítaný ako súčet druhých mocnín odchýlok σ'_{ori} od σ''_{or} . SS_x je možné získať taktiež pomocou funkcie DEVSQ.

4. Výsledkom tohto postupu je hodnota normovaného rezídia r_i pre každú dostupnú skúšku. Čím je hodnota menšia, tým je bod bližšie k pomyselnéj lineárnej, resp. nelineárnej závislosti popísanej rovnicou 4.3. Body tejto závislosti boli vypočítané pre každú skúšku. Hodnoty normovaného rezídia pre jednotlivé skúšky, ktoré prekročovali hodnotu 2, boli označené ako tzv. odľahlé body pre danú iteráciu a boli odstránené.

Týmto bola ukončená jedna iterácia celého postupu. Nasledoval rovnaký postup od kroku 1 v druhej iterácii, s tým rozdielom, že v tejto iterácii už nefigurovali tzv. odľahlé body. Pre ukážku sú v grafe 4.3 červenou zvýraznené body v prvej iterácii, ktoré boli označené týmto postupom ako odľahlé.

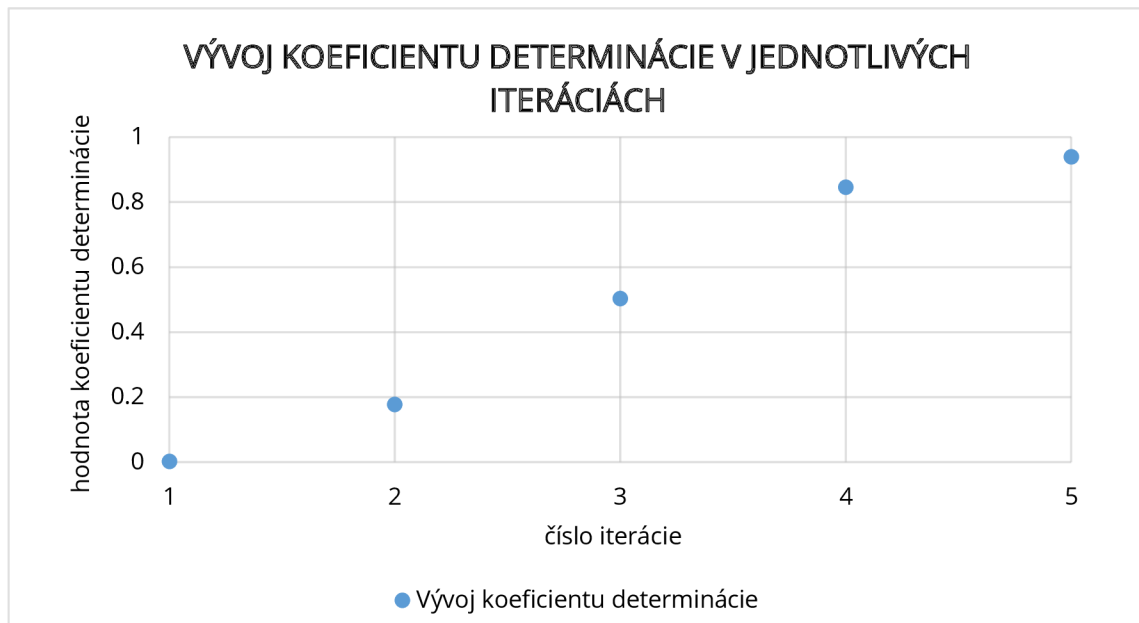


Graf 4.3 Príklad eliminácie odľahlých bodov v prvej iterácii

Riešiteľ bol spustený v každej iterácii a jeho nastavenie bolo nasledovné:

- Cieľ bol nastavený na minimálnu hodnotu súčtu druhých mocnín e_i .
- Medzi premenné bunky boli zaradené premenné: k_1 , m a $\sigma'_{or}{}^{REF}$.
- Hodnota m bola obmedzená intervalom 0 až 1
- Hodnota teoretickej ťahovej pevnosti k_1 bola obmedzená zdola 0 a zhora hodnotou z rovnice 4.2, pričom za c_{ef} a φ_{ef} boli dosadené hodnoty podľa smerových normových charakteristík ČSN 71 1001 (ČSN 73 1001, 1988) pre každú skupinu zemného prostredia.

Postup sa opakoval v ďalších iteráciách. Na určenie dostatočnej eliminácie odľahlých bodov bolo zavedené sledovanie koeficientu determinácie R^2 . Ak koeficient determinácie dosiahol hodnotu vyššiu ako 0.8, bol výpočet ukončený a bola získaná hodnota Ménardovho presiometrického modulu pre danú skupinu zemného prostredia. Vývoj koeficientu determinácie v jednotlivých iteráciách je zobrazený v grafe 4.4, pričom tento vývoj platí pre skupinu zemín F5 – F8.



Graf 4.4 Vývoj koeficientu determinácie v jednotlivých iteráciách

Koeficient determinácie R^2 bol vypočítaný v každej iterácii podľa nasledujúceho vzťahu 4.8.

$$R^2 = \frac{SS_{Y'}}{SS_Y} \quad (4.8)$$

Kde $SS_{Y'}$ je celkový súčet druhých mocnín rozdielu náhradného presiometrického modulu regresného modelu a jeho priemernej hodnoty z regresného modelu. Vypočíta sa podľa rovnice 4.9.

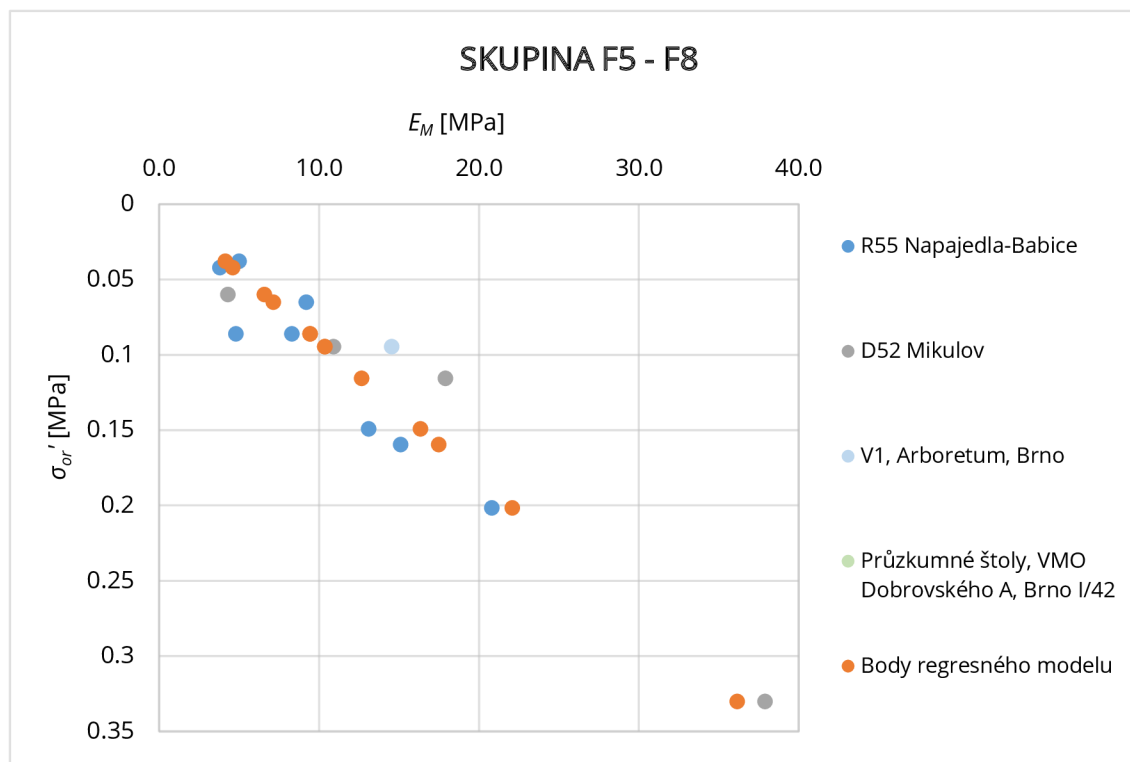
$$SS_{Y'} = \sum_{y=1}^i (E_{Mi}' - E_M'^{av})^2 \quad (4.9)$$

Kde $E_M'^{av}$ je priemerná hodnota náhradného presiometrického modulu regresného modelu E_{Mi}' .

SS_Y je celkový súčet druhých mocnín rozdielu nameraného presiometrického modulu E_{Mi} a jeho priemernej hodnoty E_M^{av} podľa rovnice 4.10.

$$SS_Y = \sum_{y=1}^i (E_{Mi} - E_M^{av})^2 \quad (4.10)$$

Na základe vypočítanej hodnoty koeficientu determinácie sa v každej iterácii rozhodlo, či bude výpočet pokračovať do ďalšej iterácie bez eliminovaných odľahlých bodov, alebo bude výpočet ukončený. Vo väčšine prípadov presiahla hodnota koeficientu determinácie požadovanú hodnotu 0.8 v 5. iterácii. Výsledky a počet iterácií budú uvedené v nasledujúcej časti práce 4.2. VÝSLEDKY ANALÝZY. Pre lepšiu predstavu je v nasledujúcom grafe 4.5 zobrazený konečný stav bodov v piatej iterácii. Ide o už zmienený graf 4.2, resp. 4.3. Rozdiel je v tom, že v grafe 4.5 sú eliminované odľahlé body. V tomto štádiu dosiahla hodnota koeficientu determinácie 0.8764, čo je možné považovať za dostatočný výsledok regresie závislosti E_M a σ'_{or} . Dôkazom je práve relatívne malá vzdialenosť nameraných bodov od závislosti podľa rovnice 4.3, ktorá predstavuje body regresného modelu.



Graf 4.5 Výsledok eliminácie odľahlých bodov v 5. iterácii skupiny zemného prostredia F5 - F8

Uvedená regresná analýza bola aplikovaná pre všetky skupiny zemného prostredia. V každej skupine bol výpočet ukončený dosiahnutím prípustnej hodnoty koeficientu determinácie > 0.8 . Podrobné výsledky každej regresnej analýzy budú uvedené v nasledujúcej časti práce.

4.4. VÝSLEDKY ANALÝZY

V tejto časti práce sú uvedené výsledky Ménardovho presiometrických modulov pre 3 skupiny zemného prostredia. Konkrétne ide o už spomenuté skupiny so značením podľa tried zemín v ČSN 73 1001. (ČSN 73 1001, 1988) Patrí medzi ne skupina F1 - F4, F5 - F8 a R4 - R6. Pre každú z týchto skupín bola vytvorená regresná analýza podľa postupu v časti 4.3. ELIMINÁCIA ODLAHLÝCH HODNÔT. Iteráciami bol získaný Ménardov presiometrický modul. Jednotlivé výsledky analýzy sú uvedené v tabuľke 4.3.

Tabuľka 4.3 Výsledky regresnej analýzy

Názov skupiny	Hodnota referenčného Ménardovho presiometrického modulu $E_{M,REF}$ [MPa]	Parameter k_1 [-]	Parameter m [-]	Efektívna súdržnosť c_{ef} [MPa]	Efektívny uhol vnútorného trenia φ_{ef} [°]	Hodnota koeficientu determinácie R^2 [-]
F1 – F4	11.7762	0.0188	0.7909	0.03	32	0.9391
F5 – F8	10.9587	0	1	0.025	19	0.8764
R4 – R6	10.2878	0	1	0.09	35	0.9026

V prípade skupín F1 – F4 a F5 – F8 bolo uskutočnených 5 iterácií, no v prípade skupiny R4 – R6 až 7 iterácií po dosiahnutí koeficientu determinácie vyššieho ako 0.8. Skupina F1 – F4 dosahovala v porovnaní so skupinou F5 – F8 mierne vyššie hodnoty, čo môže byť spôsobené prítomnosťou piesčitej a štrkovitej frakcie v okolí presiometrickej bunky pre skupinu F1 – F4. Prítomnosť tejto frakcie zvyšuje odpor voči deformácii stien vrtu, tým pádom môže zvyšovať odvodenú hodnotu referenčného presiometrického modulu. Hodnota referenčného modulu pre stanovené referenčné napätie skupiny R4 – R6 je podobná zvyšným dvom skupinám, čo je zrejme spôsobené tým, že väčšina meraní v horninách skupiny R4 – R6 bola uskutočnená vo väčšej hĺbke ako v prípade ostatných dvoch skupín. Priemerná hĺbka merania pre skupinu R4 – R6 bola na úrovni 11.9 m, pričom pre skupinu F1 – F4 bola priemerná hĺbka merania 8.9 m a pre skupinu F5 – F8 9.2 m.

Vo väčšej hĺbke s väčším efektívnym napätím, kde boli zastihnuté merania skupiny R4 – R6, je absolútna hodnota presiometrického modulu vyššia. Týmto sa hodnota referenčného presiometrického modulu priblížila hodnotám ostatných dvoch skupín. Hodnota Ménardovho presiometrického modulu pre hrubozrnné zeminy (štrky a piesky) nebola určená z dôvodu nedostatku meraní v tomto type zeminy.

5. PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ ZOSTAVENÝCH NA ZÁKLADE VÝSLEDKOV PRESIOMETRICKÝCH SKÚŠOK

V rámci tejto práce bola spracovaná parametrická štúdia, pre analýzu vplyvu zmeny hodnôt jednotlivých vstupných parametrov prenosových funkcií pre plášť na medznú zaťažovaciu krivku (MZK). Konkrétne išlo o parametre:

- $E_{M,REF}$ referenčná hodnota presiometrického modulu
- m parameter prenosovej funkcie ovplyvňujúci jej tvar z intervalu 0 až 1
- α_s empirický parameter pre plášť
- β_{av} priemerný parameter pre výpočet plášťového trenia

Štúdia bola realizovaná úrovňou výpočtu 1(M). Pôvodná hodnota každého z týchto parametrov bola zvolená na základe empirického určenia. Táto hodnota bola následne zvýšená a znížená o 25%, čím vznikli tri rôzne hodnoty daného parametra prenosových funkcií pre plášť. Nemenné vlastnosti pilóty a zeminy sú uvedené v tabuľke 5.1 na základe smerových normových charakteristík ČSN 73 1001. (ČSN 73 1001, 1988) Zvolená dĺžka pilót bola 10 m a 20 m. Z parametrov $E_{M,b}$ a $\sigma_{b,ult}$ vyplýva, že únosnosť v päte bola zanedbaná, pre lepšie zobrazenie vplyvu parametrov pre plášť.

Tabuľka 5.1 Nemenné vlastnosti pilóty a zeminy v parametrickej štúdii

Vlastnosť	Hodnota	Jednotka
Priemer ϕ	0.9	m
Modul pružnosti betónu E_c	30	GPa
Medzné napätie v päte $\sigma_{b,ult}$	10	kPa
Empirický parameter pre pätu a_b	11	-
Presiometrický modul zeminy v päte $E_{M,b}$	0.1	kPa
Stupeň konzistencie I_c	0.5	-
Objemová tiaž zeminy γ	21	kN/m^3
Objemová tiaž saturovanej zeminy γ_s	21	kN/m^3
Parameter počiatocnej tuhosti na plášti M_s	0.0038	-
Referenčný tlak p_{REF}	100	kPa
Teoretická ťahová pevnosť k_1	0	kPa

5.1. PREMENNÁ HODNOTA $E_{M,REF}$

Ako počiatková hodnota $E_{M,REF}$ bola zvolená získaná hodnota presiometrického modulu pre skupinu zemného prostredia F5 – F8, keďže s touto skupinou sa bude pracovať aj v nasledujúcich častiach práce a všetky analyzované zaťažovacie skúšky pilót boli práve v tomto zemnom prostredí. Počiatková hodnota referenčného presiometrického modulu bola $E_{M,REF} = 10.959$ MPa. Ako bolo už spomenuté, každá hodnota bola zvýšená a znížená o 25% pre zobrazenie jej vplyvu na MZK modelov FZ a AB1. Prehľad týchto hodnôt je uvedený v tabuľke 5.2, ku ktorým sú uvedené aj ostatné skúmané parametre. Zvyšné skúmané parametre boli v tejto časti konštantné.

Tabuľka 5.2 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného $E_{M,REF}$

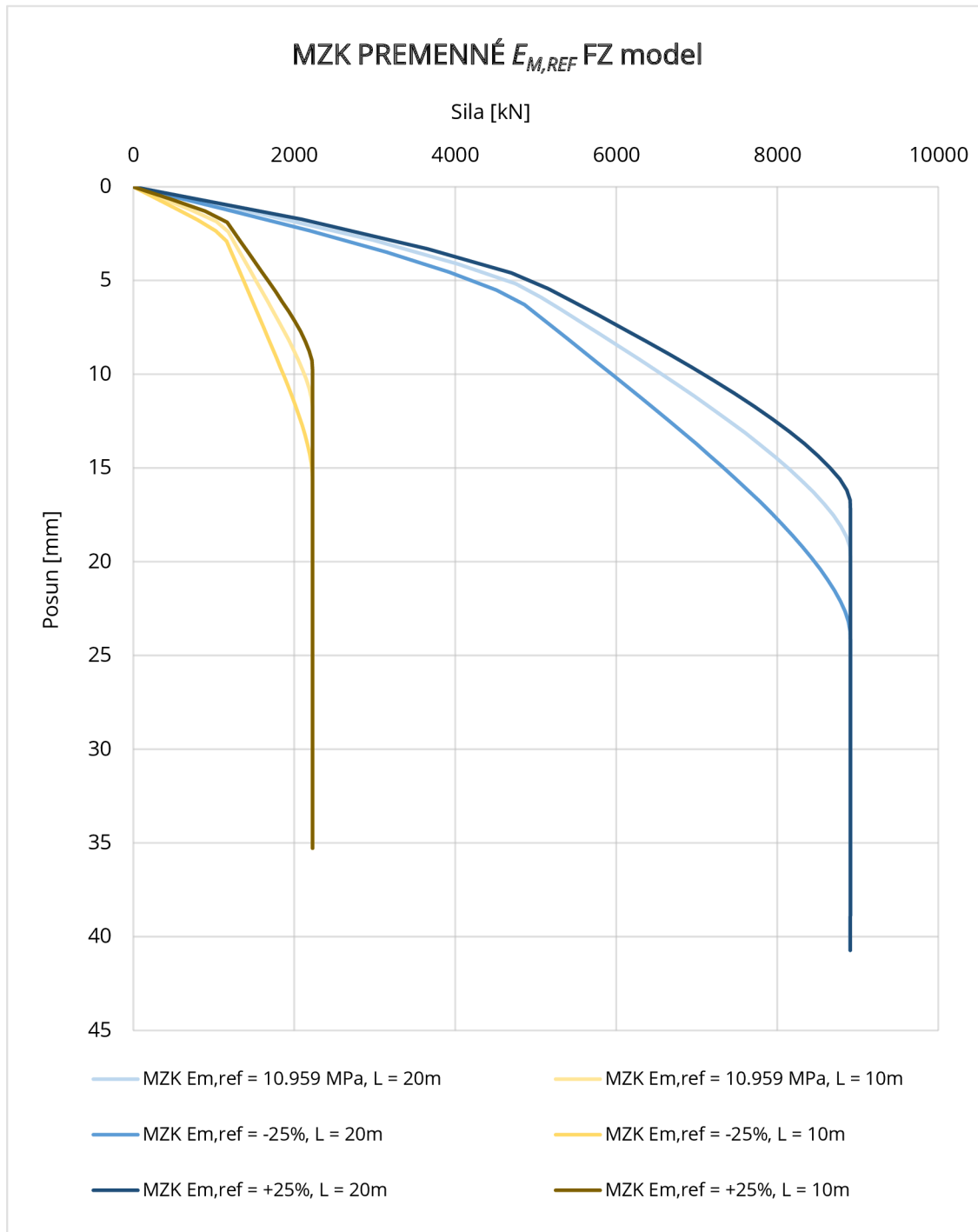
Parameter	Počiatková hodnota	- 25%	+ 25%
$E_{M,REF}$	10.959 MPa	8.219 MPa	13.699 MPa
m	0.75		
α_s	2		
β_{av}	0.75		

Medzné zaťažovacie krivky ako výstup sú zobrazené v grafe 5.1 pre model prenosovej funkcie FZ a v grafe 5.2 pre model prenosovej funkcie AB1, pričom každá predstavuje inú hodnotu $E_{M,REF}$. Tento parameter má pomerne veľký vplyv na výslednú MZK. Vplyv sa mierne zvyšuje s dĺžkou pilóty, kde významnú rolu zohráva celková tuhosť pilóty (vzťah 5.1), čím je pilóta dlhšia, tým je zvislý posun pilóty po jej dĺžke (L) menej rovnomerný a tuhosť prenosovej funkcie zohráva väčšiu rolu.

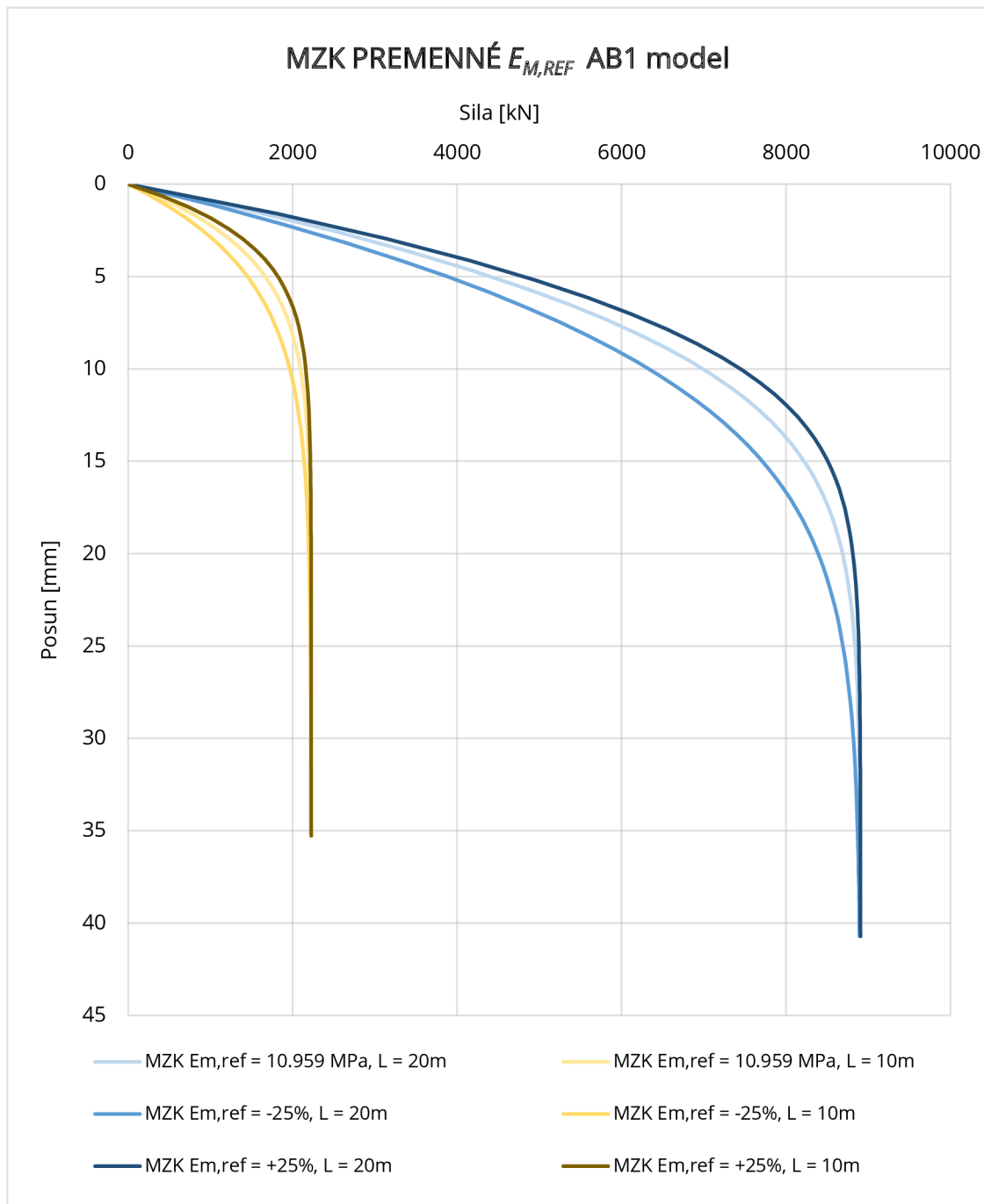
$$\text{celková tuhosť} = \frac{A_p * E_c}{L} \quad (5.1)$$

Parameter počiatkovej tuhosti zeminy je priamou úmerou ovplyvnený hodnotou $E_{M,REF}$ podľa vzťahov 2.13 a 2.14. V rámci jednej dĺžky pilóty spôsobuje zmena $E_{M,REF}$ prostredníctvom počiatkovej tuhosti zeminy rozdiel v mobilizovanom plášťovom trení a s tým spojený posun hlavy pilóty.

Napríklad pri sile 8000 kN je predikovaný posun v hlave 20 m pilóty o 3 mm viac pre 25% nižší parameter $E_{M,REF}$ a o 2 mm menej pre 25% vyšší parameter $E_{M,REF}$. To predstavuje 15 – 20 % rozdiel v posune hlavy pilóty pre oba modely prenosových funkcií.



Graf 5.1 MZK FZ modelu a premenného $E_{M,REF}$



Graf 5.2 MZK AB1 modelu a premenného $E_{M,REF}$

5.2. PREMENNÁ HODNOTA m

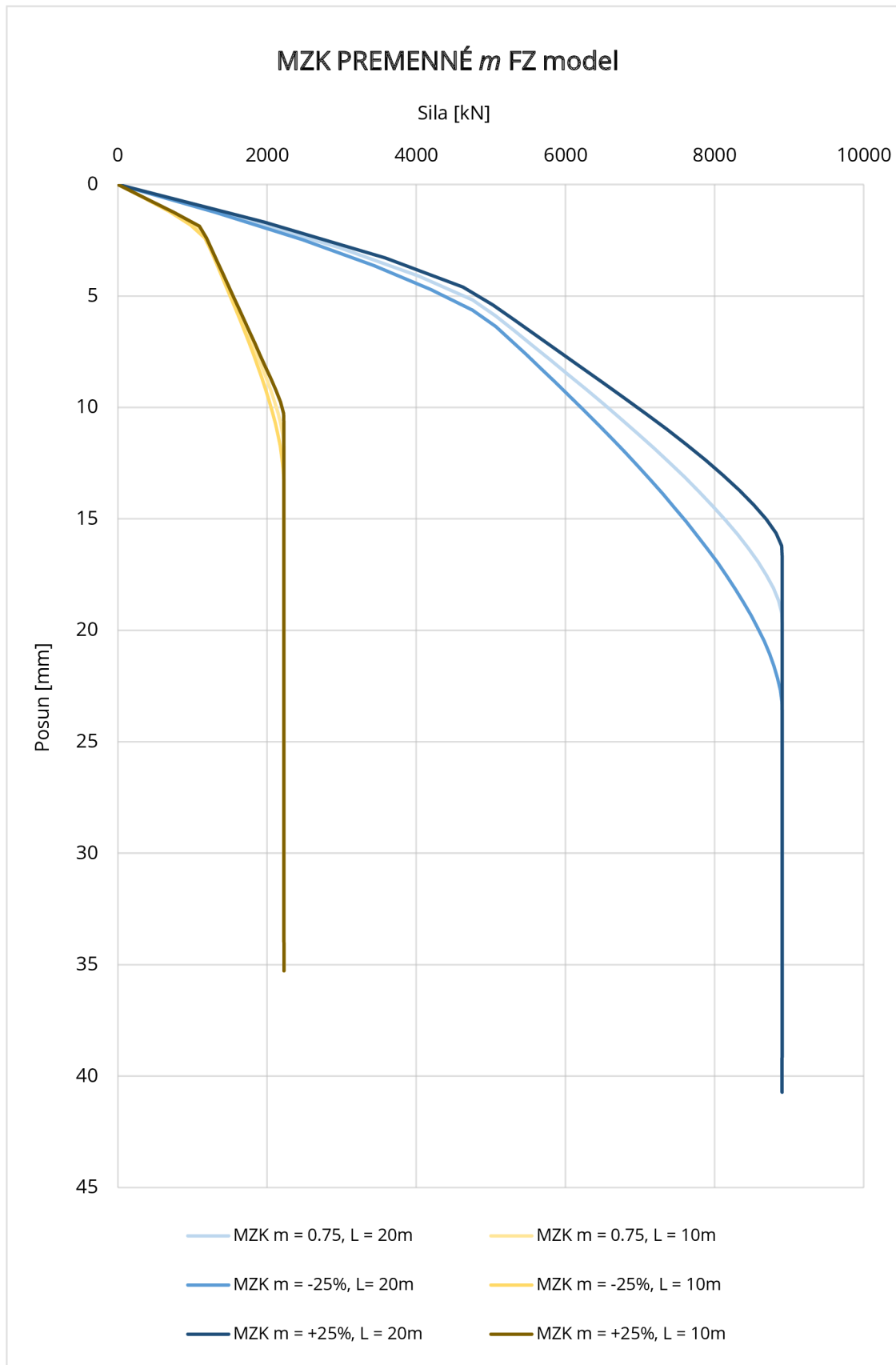
Ako počiatočná hodnota m bola zvolená hodnota 0.75 na základe obmedzenia hodnoty na interval 0 až 1 a hodnôt, ktoré vychádzali z výsledkov analýzy presiometrických skúšok. Ako bolo už spomenuté, každá hodnota bola zvýšená a znížená o 25% pre zobrazenie jej vplyvu na MZK modelov FZ a AB1.

Prehľad týchto hodnôt je opäť uvedený v tabuľke 5.3, ku ktorým sú uvedené aj ostatné skúmané parametre. Zvyšné skúmané parametre boli v tejto časti konštantné.

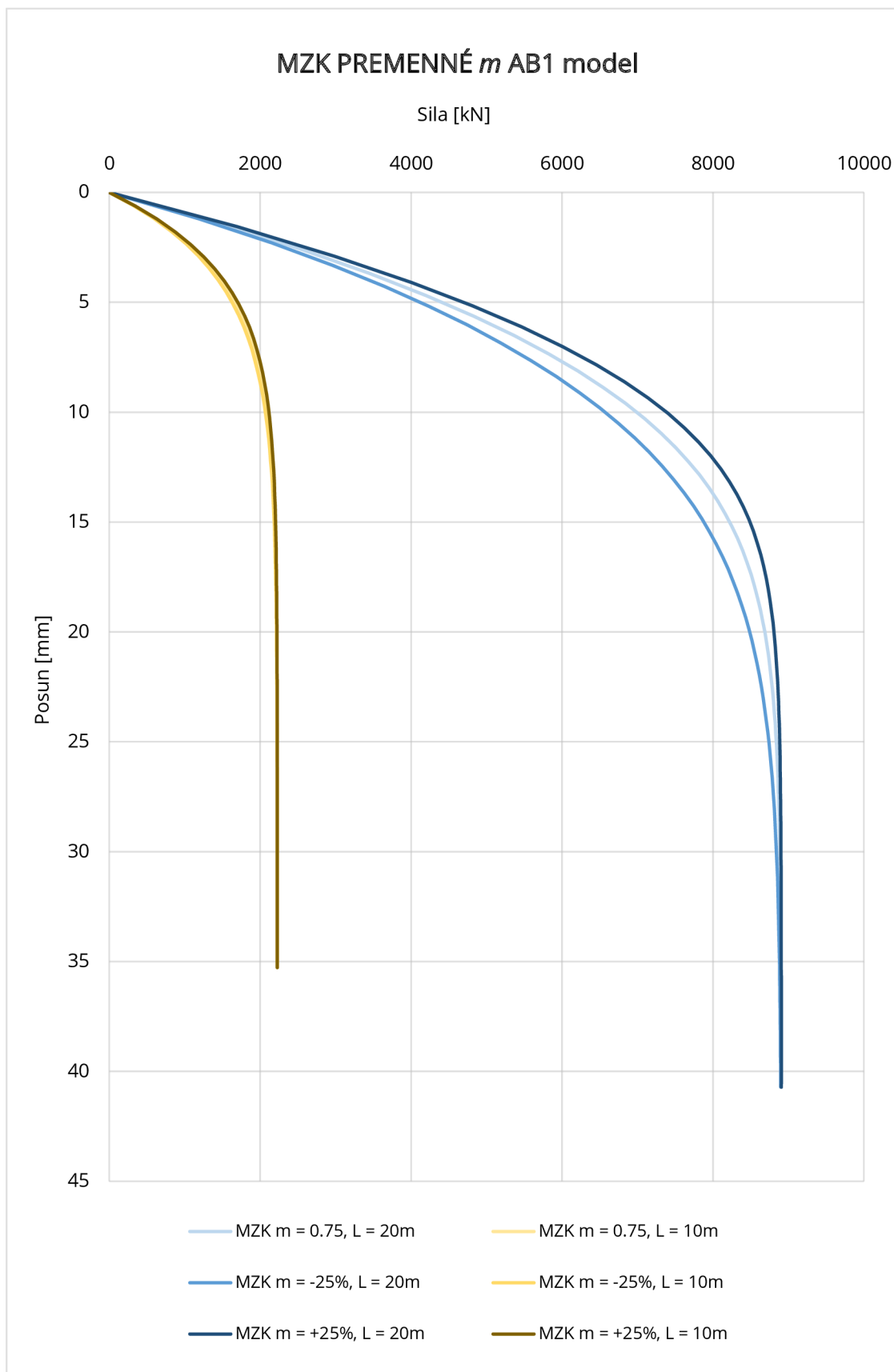
Tabuľka 5.3 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného m

Parameter	Počiatočná hodnota	- 25%	+ 25%
$E_{M,REF}$	10.959 MPa		
m	0.75	0.5625	0.9375
α_s	2		
β_{av}	0.75		

Medzné zaťažovacie krivky ako výstup sú zobrazené v grafe 5.3 pre model prenosovej funkcie FZ a v grafe 5.4 pre model prenosovej funkcie AB1, pričom každá predstavuje inú hodnotu m . Tento parameter má o niečo menší vplyv na MZK. Na druhej strane sa výrazne zvyšuje s dĺžkou pilóty, čo je spôsobené funkciou parametra m ako mocniteľa zo vzťahu 4.1. S vyššou hodnotou parametra m dochádza k vyššej rýchlosti nárastu presiometrického modulu E_M . Väčší rozdiel medzi krivkami pre dlhšiu pilótu súvisí s celkovou tuhosťou, kde sa závislosť medzi tuhosťou a napätím prejavuje výraznejšie. Tento jav je možné vidieť na grafoch 5.3 a 5.4. Pri dĺžke pilóty 10 m a sile v hlave pilóty na úrovni 85% medze vyčerpania plášťového trenia (približne 2000 kN), je rozdiel medzi posunom v hlave pilóty v rozmedzí ± 1 mm od MZK, kde hodnota parametra $m = 0.75$. Pričom pri dĺžke pilóty 20 m a sile v hlave pilóty taktiež na úrovni 85% medze vyčerpania plášťového trenia (približne 7700 kN), je rozdiel medzi posunom v hlave pilóty niekoľkonásobne vyšší, na úrovni 2-3 mm od MZK, kde je hodnota parametra počiatočná $m = 0.75$.



Graf 5.3 MZK FZ modelu a premenného m



Graf 5.4 MZK AB1 modelu a premenného m

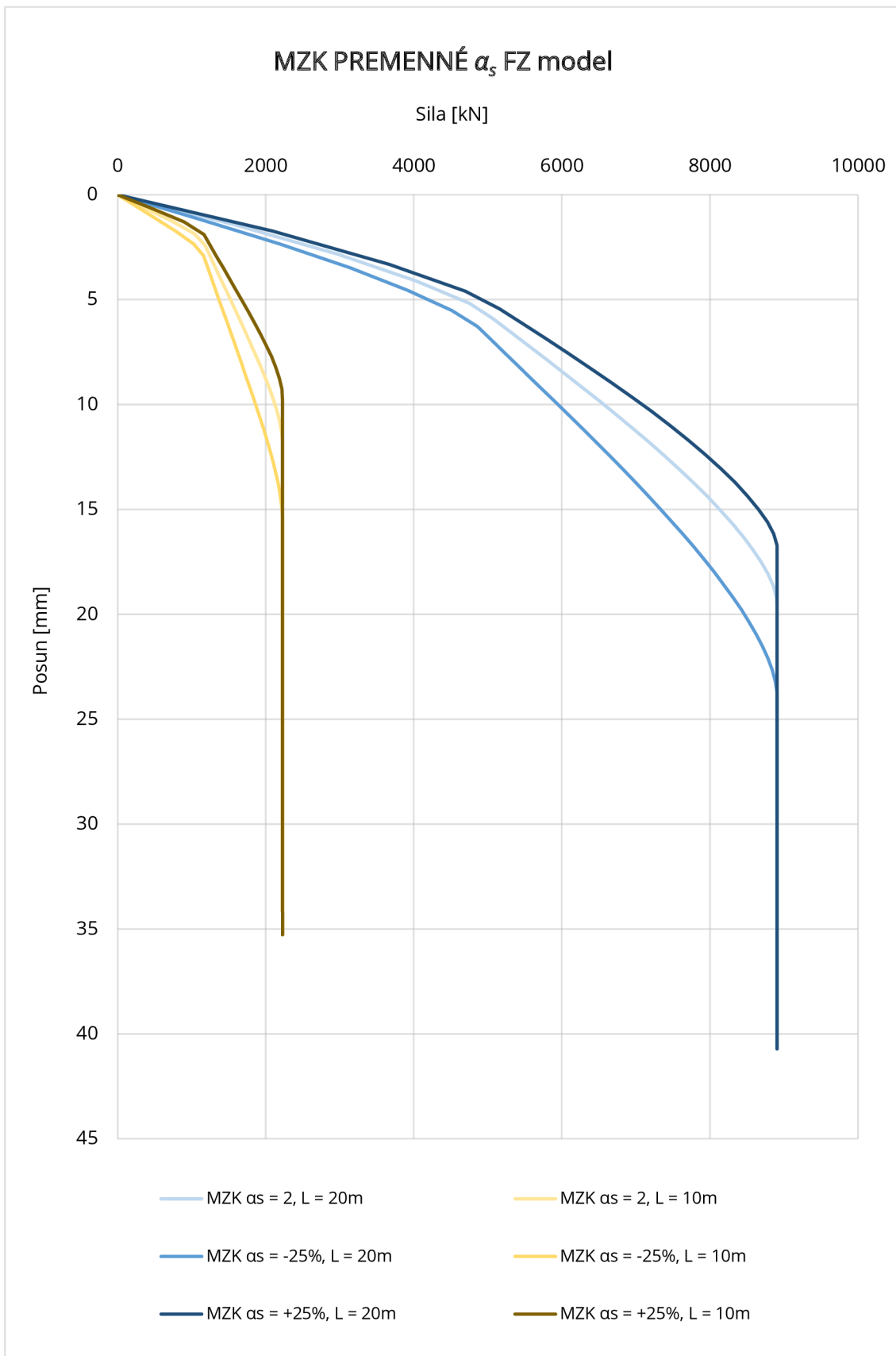
5.3. PREMENNÁ HODNOTA α_s

Ako v predošlých prípadoch bola počiatková hodnota α_s zvolená 2 na základe odporúčanej hodnoty pre súdržné zeminy podľa (Bohn a kol., 2016). Taktiež bola každá hodnota zvýšená a znížená o 25% pre zobrazenie jej vplyvu na MZK modelov FZ a AB1. Prehľad týchto hodnôt je opäť uvedený v tabuľke 5.4, ku ktorým sú uvedené aj ostatné skúmané parametre. Ostatné skúmané parametre zostali nezmenené.

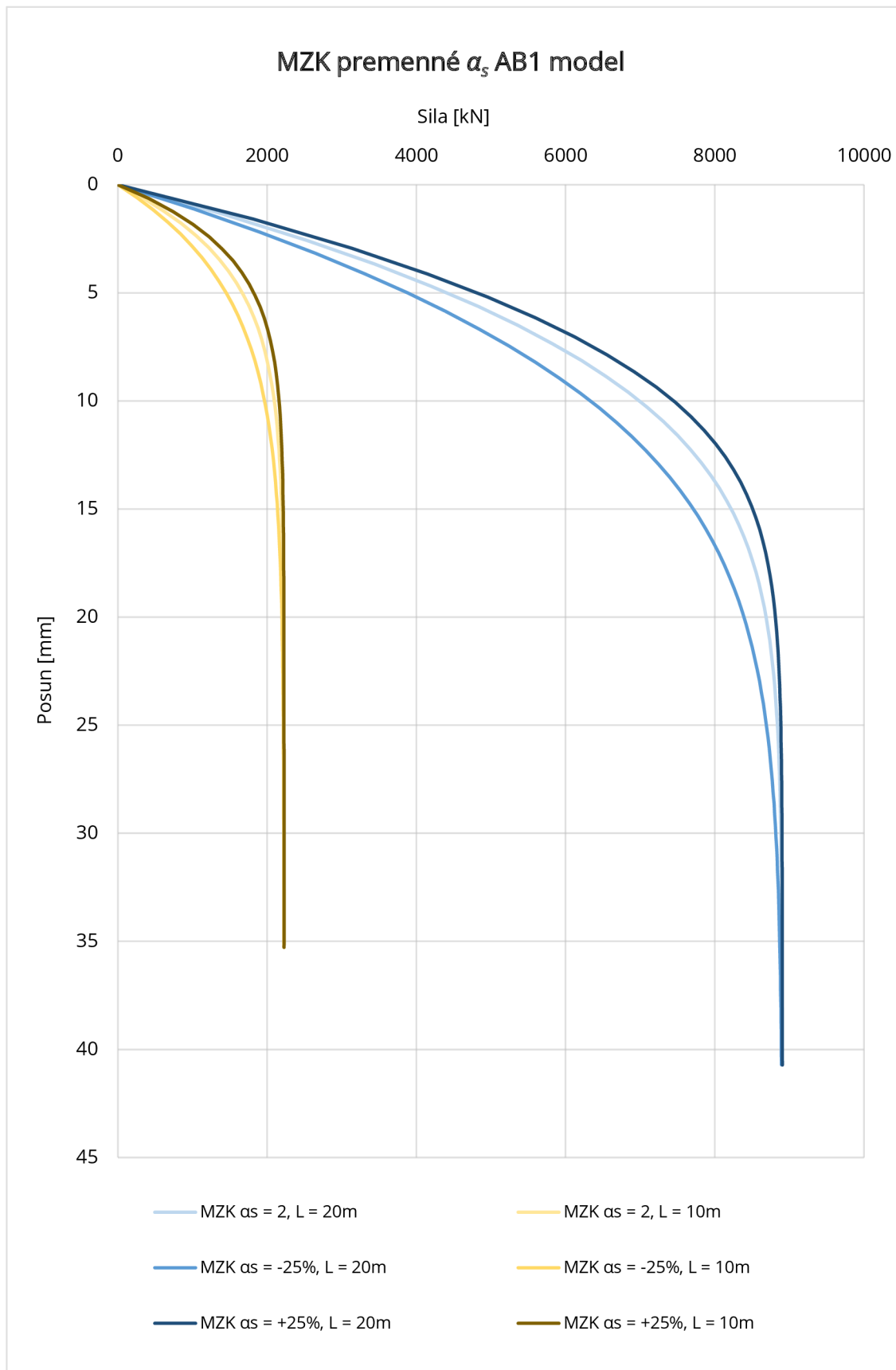
Tabuľka 5.4 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného α_s

Parameter	Počiatková hodnota	- 25%	+ 25%
$E_{M,REF}$	10.959 MPa		
m	0.75		
α_s	2	1.5	2.5
β_{av}	0.75		

Medzné zaťažovacie krivky ako výstup sú zobrazené v grafe 5.5 pre model prenosovej funkcie FZ a v grafe 5.6 pre model prenosovej funkcie AB1, pričom každá predstavuje inú hodnotu α_s . Tento parameter má vplyv porovnateľný s predošlými premennými parametrami $E_{M,REF}$ a m . Vplyv sa mierne zvyšuje s dĺžkou pilóty, kde významnú rolu zohráva celková tuhosť pilóty, čím je pilóta dlhšia, tým je zvislý posun pilóty po jej dĺžke menej rovnomerný a tuhosť prenosovej funkcie zohráva väčšiu rolu podobne ako v prípade 5.1. PREMENNÁ HODNOTA $E_{M,REF}$. Parameter počiatkovej tuhosti zeminy je priamou úmerou ovplyvnený hodnotou α_s podľa vzťahov 2.13 a 2.14. V rámci jednej dĺžky pilóty spôsobuje zmena α_s prostredníctvom počiatkovej tuhosti rozdiel v mobilizovanom plášťovom trení a s tým spojený posun hlavy pilóty. Napríklad pri sile 8000 kN je predikovaný posun v hlave pilóty o 4 mm viac pre o 25% nižší parameter α_s , čo predstavuje 15 % rozdiel a o 2.5 mm menej pre o 25% vyšší parameter α_s , čo predstavuje 23 % rozdiel v posune hlavy pilóty pre oba modely prenosových funkcií. Aj keď je parameter α_s empirickým faktorom, má významný vplyv na MZK, podobne ako $E_{M,REF}$.



Graf 5.5 MZK FZ modelu a premenného α_s



Graf 5.6 MZK AB1 modelu a premenného α_s

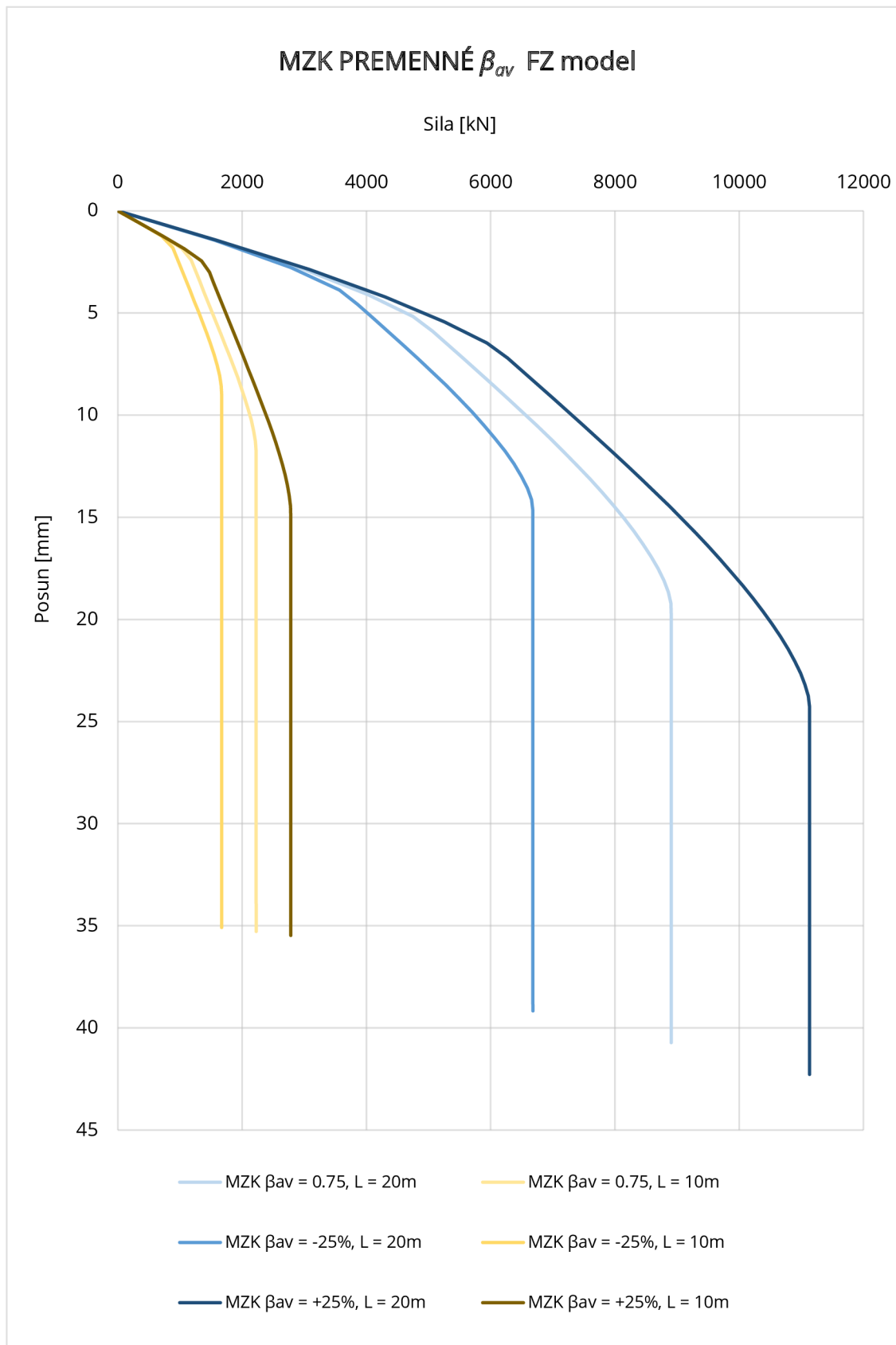
5.4. PREMENNÁ HODNOTA β_{av}

Ako posledným analyzovaným parametrom bol priemerný parameter plášťového trenia β_{av} . Počiatočná hodnota β_{av} bola zvolená 0.75 na základe experimentálne stanovených hodnôt a teoretických hodnôt podľa uhlu vnútorného trenia (Burland, 1973). Taktiež bola každá hodnota zvýšená a znížená o 25% pre zobrazenie jej vplyvu na MZK modelov FZ a AB1. Prehľad týchto hodnôt je opäť uvedený v tabuľke 5.5, ku ktorým sú uvedené aj ostatné skúmané parametre. Ostatné skúmané parametre zostali nezmenené.

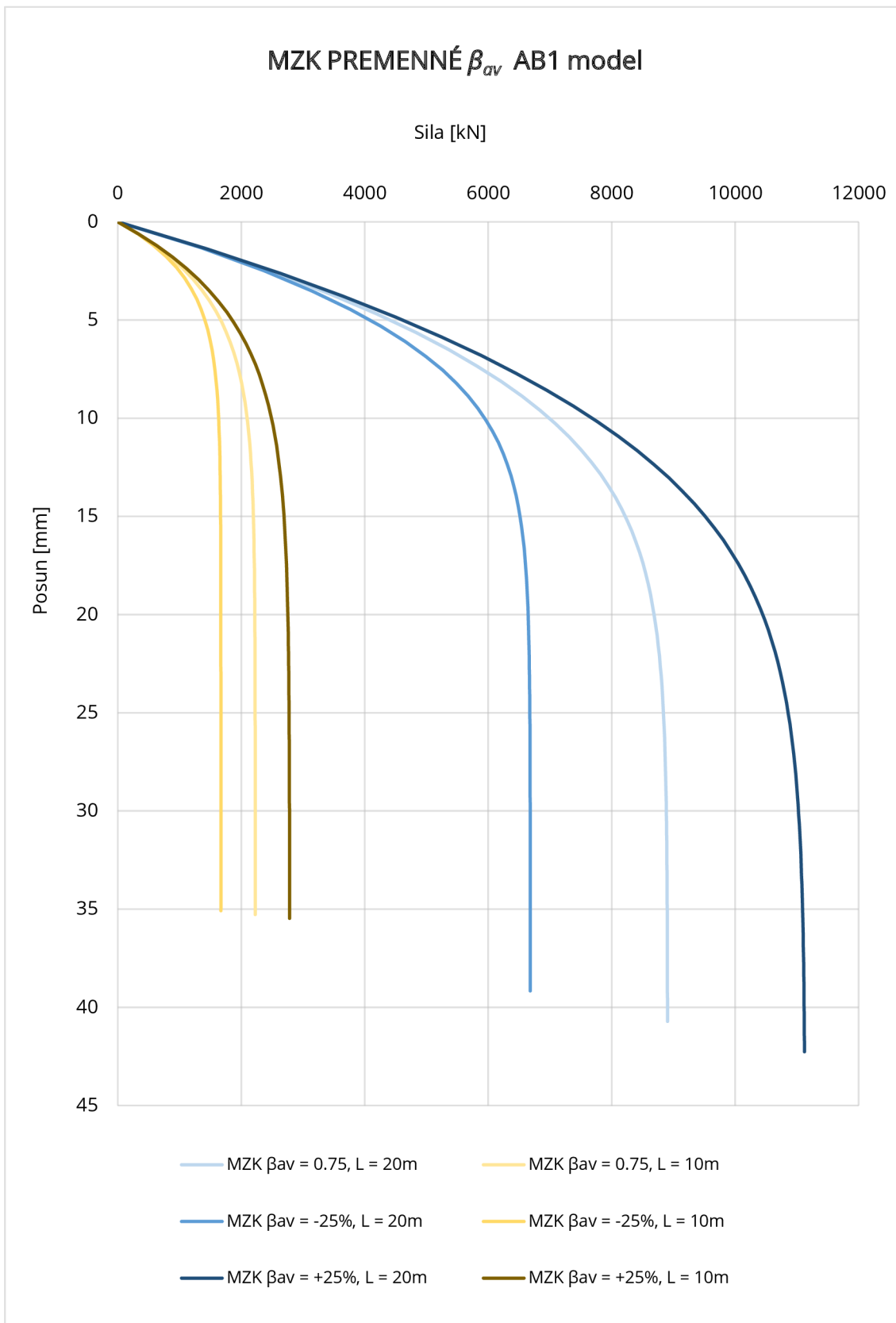
Tabuľka 5.5 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného β_{av}

Parameter	Počiatočná hodnota	- 25%	+ 25%
$E_{M,REF}$	10.959 MPa		
m	0.75		
α_s	2		
β_{av}	0.75	0.5626	0.9375

Medzné zaťažovacie krivky ako výstup sú zobrazené v grafe 5.7 pre model prenosovej funkcie FZ a v grafe 5.8 pre model prenosovej funkcie AB1, pričom každá predstavuje inú hodnotu β_{av} . Tento parameter má výrazný vplyv na MZK. Podľa vzťahu 2.16 a teórie stanovenia plášťového trenia v β metóde, priamo pôsobí na hodnotu medzného plášťového trenia ako násobiteľ efektívneho geostatického napätia. Z toho vyplýva, že parameter β_{av} , na rozdiel od predošlých analyzovaných parametrov, veľkou mierou ovplyvňuje hraničné zaťaženie na hlavu pilóty, pri ktorom dôjde k vyčerpaniu plášťového trenia. Miera efektu sa ako v predošlých prípadoch zvyšuje spolu s rastúcou dĺžkou pilóty, čo bude evidentné na uvedených grafoch 5.7 a 5.8. Pri dĺžke pilóty 10 m sa hraničné zaťaženie na hlavu pilóty, pri ktorom dôjde k vyčerpaniu plášťového trenia zvyšuje, resp. znižuje približne o 25%. V prípade 20 m pilóty sa toto zaťaženie zvyšuje, resp. znižuje o približne 27%.



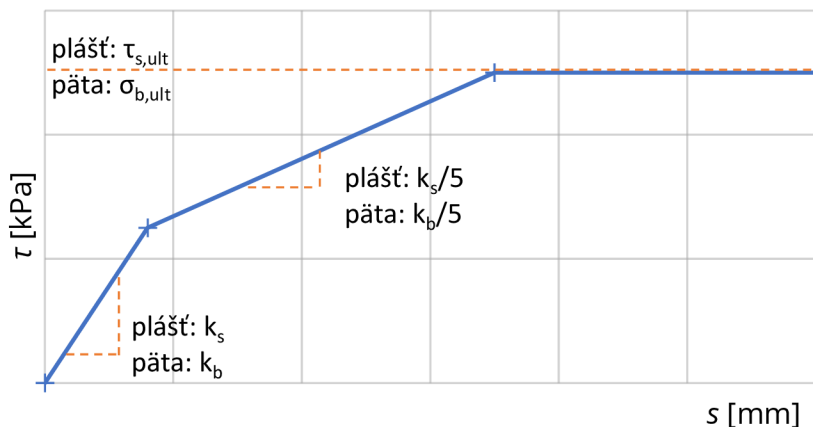
Graf 5.7 MZK FZ modelu a premenného β_{av}



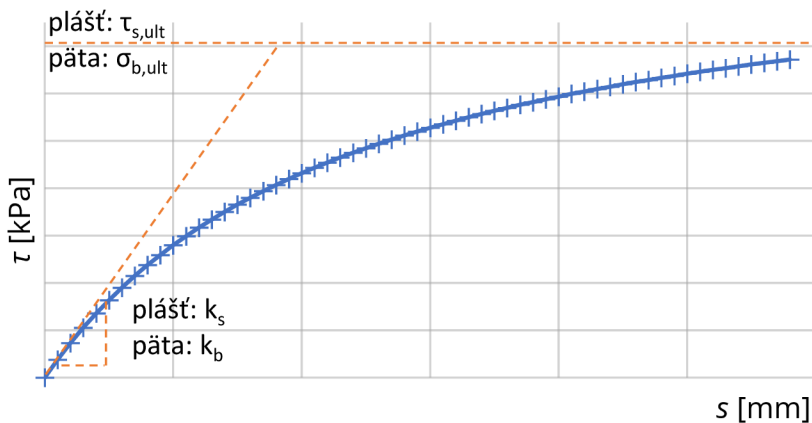
Graf 5.8 MZK AB1 modelu a premenného β_{av}

5.5. POROVNANIE FZ A AB1 MODELU

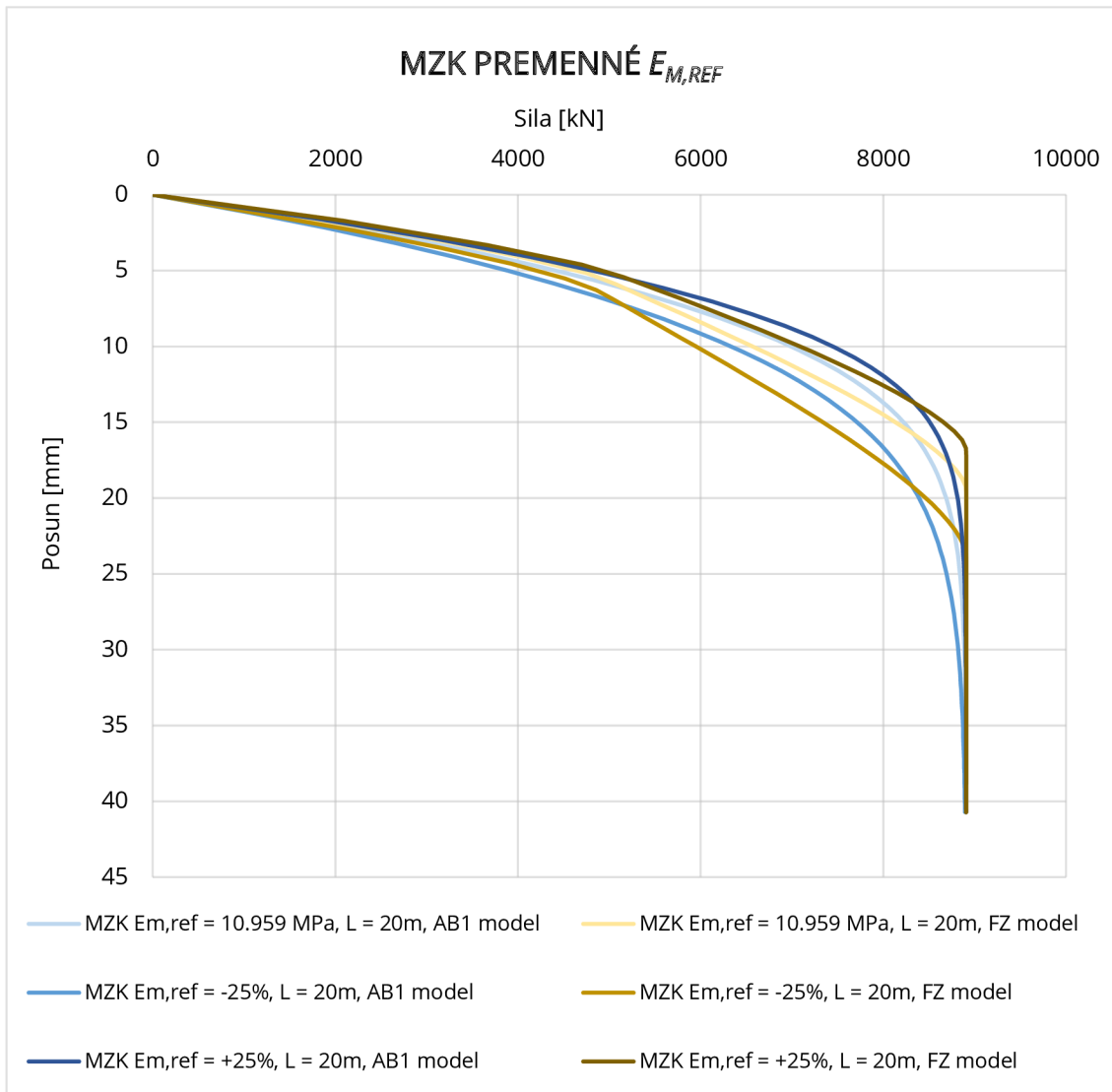
Oba modely prenosových funkcií boli použité pri rovnakých vstupných parametroch, čo je zrejme z predošlých častí tejto kapitoly. Vzájomne je medzi MZK pre FZ model a MZK pre AB1 model rozdiel badateľný. Tento rozdiel v tvare MZK vyplýva z tvaru prenosových funkcií oboch modelov, ktoré sú zobrazené v grafoch 5.9 a 5.10. Pre názornú ukážku bol vybraný skúmaný parameter $E_{M,REF}$, ktorého vplyv na MZK oboch modelov je zobrazený v grafe 5.11.



Graf 5.9 Prenosová funkcia FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982)



Graf 5.10 Prenosová funkcia AB1 modelu podľa (Abchir a kol., 2016)

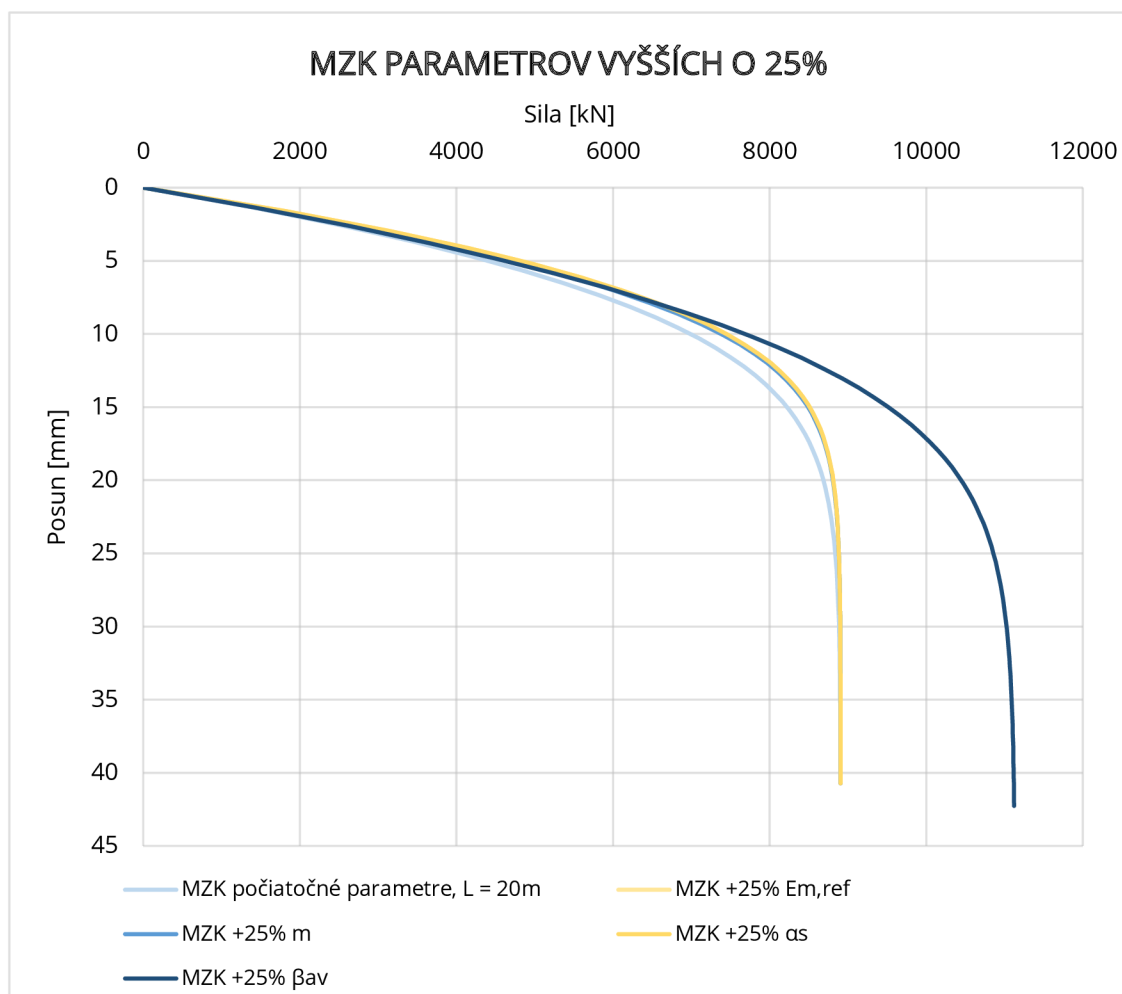


Graf 5.11 Porovnanie modelov prenosových funkcií pri premennej hodnote $E_{M,REF}$

5.6. VZÁJOMNÉ POROVNANIE SKÚMANÝCH PARAMETROV

V tejto časti sú zobrazené vzájomné vzťahy medzi jednotlivými skúmanými parametrami a ich vplyvom na MZK. Pre tento účel bol vybraný model AB1. Ako prvý prípad boli do jedného grafu vložené MZK ako výstup pre všetky skúmané parametre $E_{M,REF}$, m , α_s a β_{av} s hodnotou o 25% vyššou od MZK s počiatočnými hodnotami parametrov. Tento prípad je zobrazený v grafe 5.12. Na tomto grafe je evidentné, že parametre $E_{M,REF}$, m a α_s sú deformačnými charakteristikami, ktoré ovplyvňujú tuhosť MZK, ale nie celkovú únosnosť. Spôsobujú veľmi podobnú zmenu od počiatočnej krivky, ktorá je znázornená najsvetlejšou modrou farbou.

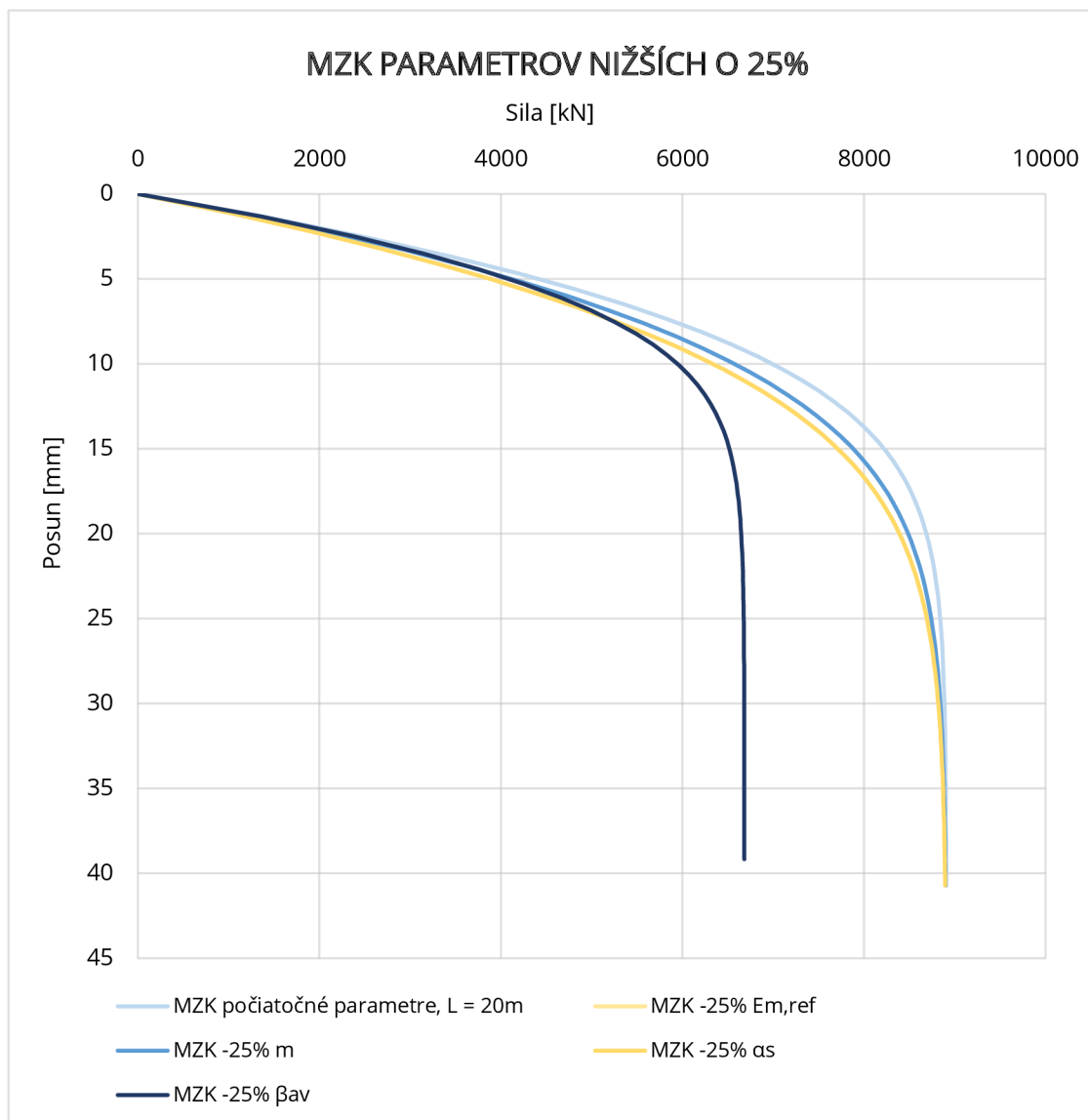
Toto vyplýva z ich vstupu do tvarov prenosových funkcií a v prípade parametra m zo spôsobu vplyvu ako mocniteľa na hodnotu presiometrického modulu podľa vzťahu 4.1. MZK pre hodnoty $E_{M,REF}$ a α_s sa prekrývajú z dôvodu ich vstupu do vzťahu pre počiatočnú tuhosť ako vzájomný súčin v čitateli (vzťahy 2.13 a 2.14). Posledný parameter β_{av} a jeho MZK z počiatku kopíruje počiatočnú krivku, no neskôr sa začne vzdalovať a stanoví vyššie hraničné zaťaženie na hlavu pilóty, pri ktorom dôjde k vyčerpaniu plášťového trenia približne o 25%, čo vyplýva z jeho priameho vplyvu na medzné plášťové trenie vo vzťahu k efektívnemu geostatickému napätiu podľa vzťahu 2.16.



Graf 5.12 MZK skúmaných parametrov s hodnotami vyššími o 25%

V prípade týchto parametrov s hodnotou o 25% nižšou oproti počiatočným, dochádza k mierne rozdielnemu priebehu, ale v princípe sa nelíši od prípadu s vyššími hodnotami. Deformačné charakteristiky $E_{M,REF}$, m a α_s aj v tomto prípade ovplyvňujú tuhosť MZK, ale nie celkovú únosnosť.

Parameter β_{av} znižuje hraničnú silu, pri ktorej dôjde k vyčerpaniu plášťového trenia o 25% podobne ako pre jeho vyššiu hodnotu, pričom tu dochádza k zníženiu tejto hraničnej sily v hlave pilóty. Ostatné parametre vstupujú do tvaru prenosových funkcií podobne ako v predošlej časti s hodnotami o 25% vyššími. Tieto MZK sú zobrazené v grafe 5.13, kde je možné opäť jednotlivé MZK porovnať s MZK s počiatočnými parametrami, zobrazenou najsvetlejšou modrou farbou. Pre model prenosových funkcií FZ by bol priebeh MZK veľmi podobný, ako je vysvetlené v časti 5.5. POROVNANIE FZ A AB1 modelu. MZK pre nižšie hodnoty $E_{M,REF}$ a α_s sa aj v tomto prípade prekrývajú z dôvodu ich vstupu do vzťahu pre počiatočnú tuhosť ako vzájomný súčin v čitateli (vzťahy 2.13 a 2.14).



Graf 5.13 MZK skúmaných parametrov s hodnotami nižšími o 25%

6. INVERZNÉ ANALÝZY ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK

Táto časť práce sa zaoberá inverznou analýzou šiestich zaťažovacích skúšok vrтанých pilót metódou prenosových funkcií. K analýze bol použitý softvér vyvíjaný na Ústave geotechniky Fakulty stavebnej VUT v Brne s názvom PMpLTO.

Ako výstup boli získané a hodnotené predikované MZK jednotlivých pilót, následne boli porovnávané s MZK nameranými počas zaťažovacích skúšok. Pre doplnenie boli pilóty namodelované taktiež v module Pilóta programu Geo5 2021, kde išlo o MZK postupu podľa (Masopust, 1994). Na základe tohto porovnania boli upravované vstupné parametre prenosových funkcií až po získanie maximálnej nožnej zhody s prihliadnutím na odporúčané, resp. reálne hodnoty. Pre jednotlivé modely prenosových funkcií použitých v inverznej analýze sú uvedené vstupné parametre v tabuľke 6.1.

Tabuľka 6.1 Vstupné parametre do inverznej analýzy pre jednotlivé modely

Model		Parametre zeminy	Parametre pilóty
(Masopust, 1994)		$\gamma, \gamma_s, \varphi_{ef}, c_{ef}, \nu, E_{def}, a, b, E_s, e, f, l_c$	d, L, E_c
Hyperbolická (Bohn a kol., 2016)	Plášť Päta	$\gamma, \gamma_s, \beta_{av}/POP, \varphi_{cv}, M_s$ $\sigma_{b,ult}, M_b$	d_s, L, E_c d_b
FZ model	Plášť Päta	$\gamma, \gamma_s, \beta_{av}/POP, \varphi_{cv}, a_s, E_{M,REF}, p_{REF}, m, k_1$ $\alpha_b, E_{M,b}, \sigma_{b,ult}$	d_s, L, E_c d_b
AB1 model	Plášť Päta	$\gamma, \gamma_s, \beta_{av}/POP, \varphi_{cv}, a_s, E_{M,REF}, p_{REF}, m, k_1$ $\alpha_b, E_{M,b}, \sigma_{b,ult}$	d_s, L, E_c d_b

Medzi parametre, ktorým bola venovaná najväčšia pozornosť patria a_s a a_b ako empirické parametre tuhosti, β_{av} , resp. POP ako parametre pevnosti. Hodnoty jednotlivých vstupných parametrov pre každú inverznú analýzu budú uvedené v tabuľkách pre každý model prenosových funkcií. Všetky zo šiestich analyzovaných pilót sa nachádzali v podobnom geologickom profile, z tohto dôvodu je väčšina parametrov zeminy rovnaká v každej analýze.

6.1. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU D 4707 SO 210

6.1.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV

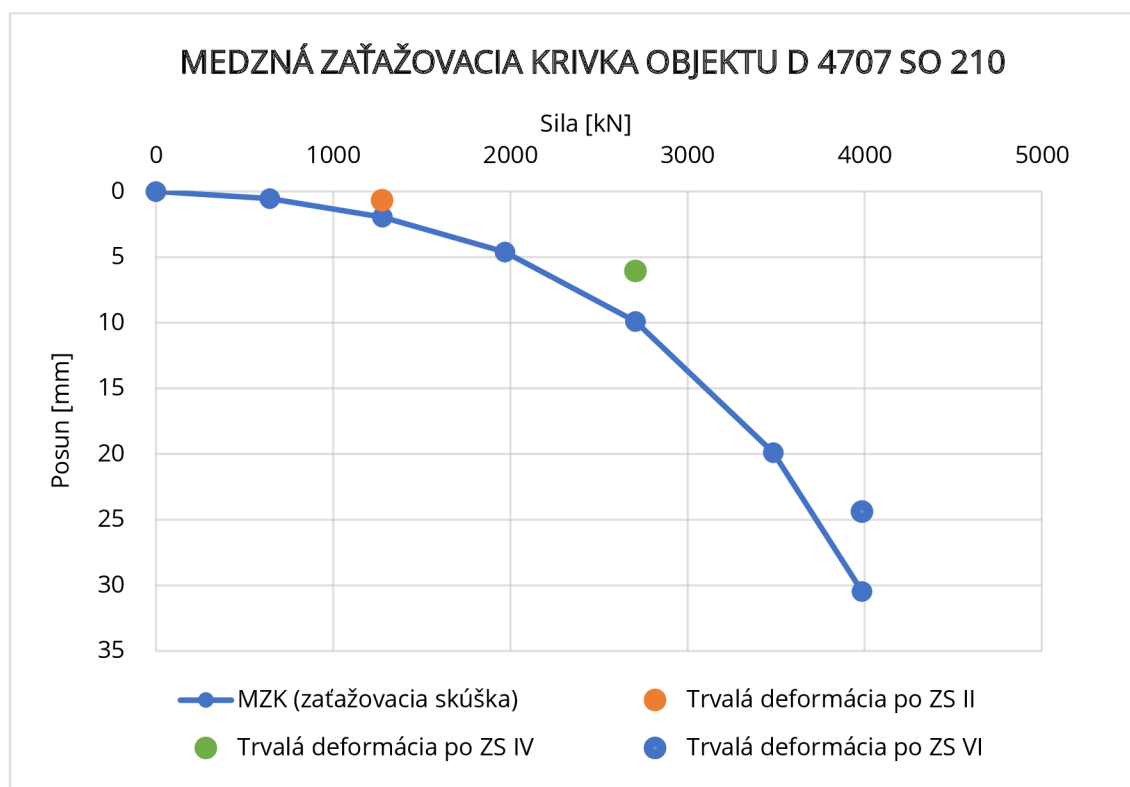
Informácie pre túto časť práce boli čerpané zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky (SKANSKA, 2005). Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vrtanej pilóte priemeru 1200 mm a dĺžky 16 m. Tento objekt bol navrhnutý ako základ pre most na diaľnici D47 cez cestu I/47. Pilóta bola vrtaná s dvojplášťovým oceľovým pažením a pre teleso pilóty bol použitý betón C30/37 s odolnosťou v agresívnom prostredí XA3, S4.

Počas zaťažovacej skúšky boli do armokoša pilóty osadené strunové tenzometre v hĺbkach 5 m; 9 m; 12.5 m; 15.5 m a na päte pilóty v hĺbke 16 m bol umiestnený pätný lis pre stanovenie prenosu sily (všetky hĺbky sú uvedené od úrovne terénu). Zaťažovacia sila bola vyvedená štyrmi hydraulickými lismi, ktorých reakcia bola prenesená ôsmimi zemnými kotvami. Predpokladané zvislé zaťaženie pilóty bolo uvažované 6500 kN. Očakávané boli nadmerné deformácie už pri nižších silách, preto boli volené nižšie hodnoty zaťažovacích stupňov (približne 60%). Meranie sily bolo uskutočnené pomocou tlaku v hydraulickej sústave, dynamometrov pod lismi a nepriamym meraním prostredníctvom predĺženia zväzkov zemných kotiev. Meraný posun v hlave pilóty bol získaný prostredníctvom štyroch kusov indukčných metrov. Hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch sú uvedené v tabuľke 6.2.

Tabuľka 6.2 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty D 4707 SO 210

Zaťažovací stav	I	II	III	IV	V	VI
Sila [kN]	642	1278	1969	2707	3484	3985

Zaťažovacia skúška bola ukončená po šiestom zaťažovacom stave pri sile 3985 kN a neustálenom posune hlavy pilóty 30 mm. Smerná únosnosť pilóty bola na základe meraní stanovená na 3750 kN pri zvislom posune hlavy pilóty 25 mm. Z nameraných hodnôt posunu v hlave pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch bolo možné stanoviť medznú zaťažovaciu krivku, ktorá je zobrazená v grafe 6.1. Pričom body predstavujú posun v hlave pilóty po odľahčení.



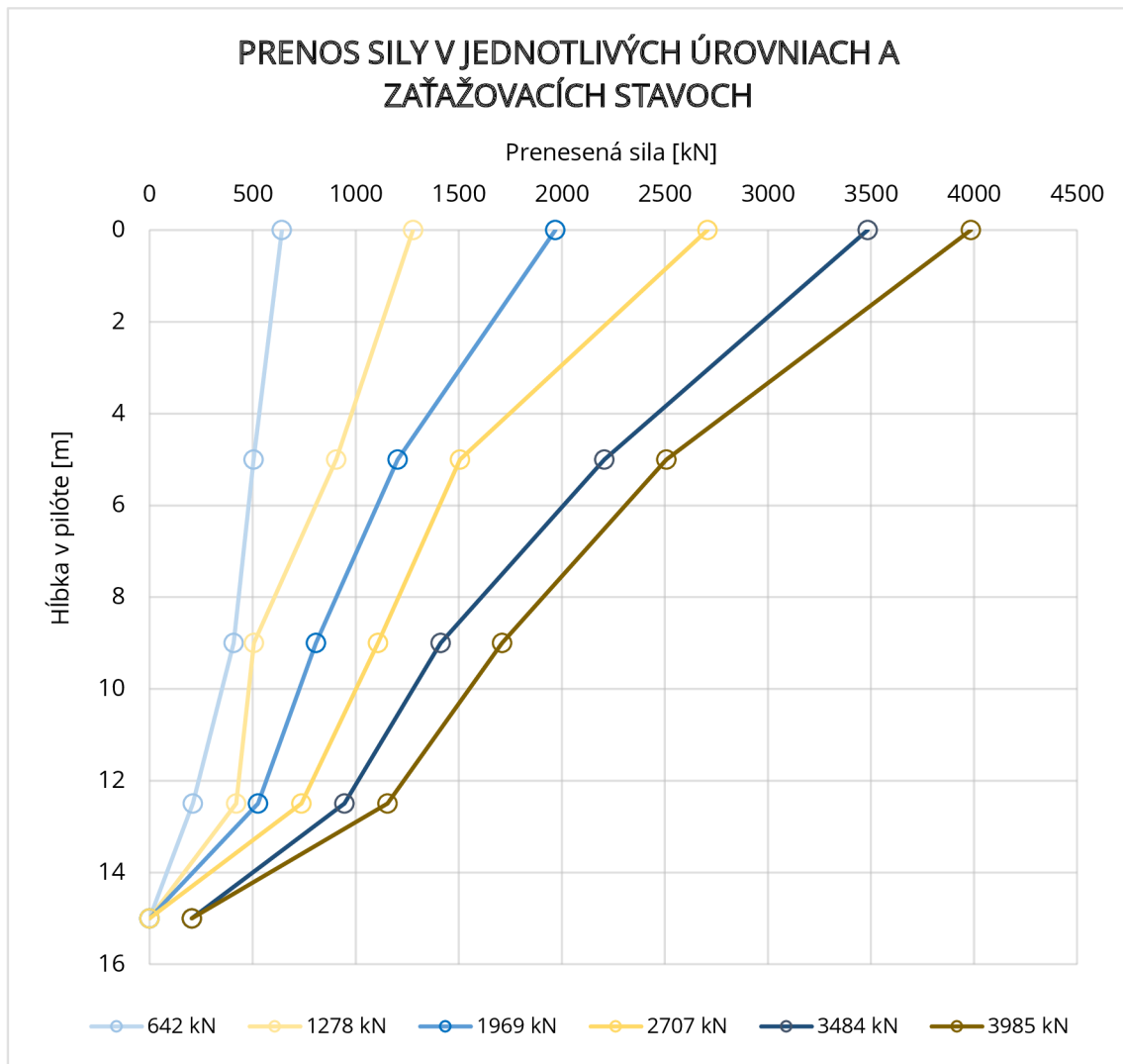
Graf 6.1 MZK objektu pilóty D 4707 SO 210

Inžiniersko – geologické podmienky pilóty boli popísané v zmysle ČSN 721001, 721002, 731001 pri vŕtaní pilóty 14.12.2005. Geologický profil je uvedený v tabuľke 6.3. Podzemná voda nebola priamo narazená. V hĺbke 8.5 m bol priesak vody na dne a pod okrajom pažnice. Z tohto údaju a z faktu, že geologický profil tvoril po celej dĺžke íl, je možné usúdiť, že hladina podzemnej vody bola v hĺbke približne 8 m. Táto hodnota však zostáva ako predpoklad a jej presné určenie pre inverznú analýzu nebolo možné na základe údajov v záverečnej správe zaťažovacej skúšky (SKANSKA, 2005).

Tabuľka 6.3 Geologický profil objektu pilóty D 4707 SO 210

Hĺbka [m]	Vrstva	Klasifikácia
0.0 – 2.0	Íl stredne plastický, šedohnedý, mäkkej až tuhej konzistencie.	F6 CI
2.0 – 3.5	Íl piesčitý, hrdzavohnedý, piesok veľmi jemnozrnný, mäkkej konzistencie.	F4 CS
3.5 – 4.5	Íl stredne plastický, hrdzavošedý, mäkkej až tuhej konzistencie.	F6 CI
4.5 – 5.0	Íl stredne plastický, tmavošedý, tuhej až pevnej konzistencie.	F6 CI
5.0 – 5.5	Íl vysoko plastický, šedý, tuhej konzistencie.	F8 CH
5.5 – 7.0	Íl vysoko plastický, šedý, tuhej konzistencie.	F8 CH
7.0 – 9.0	Íl stredne plastický, šedý, tuhej konzistencie.	F6 CI
9.0 – 10.5	Íl vysoko plastický, šedozelený, tuhej konzistencie, s čriepkami neogénneho ílu s tenkými vrstvami jemnozrnného piesku.	F8 CH
10.5 – 11.5	Íl vysoko plastický, šedozelený, tuhej konzistencie, s tenkými vrstvami jemnozrnného piesku. Prechod do neogénneho ílu.	F8 CH
11.5 – 13.0	Íl vysoko plastický, šedozelený, pevnej konzistencie, neogén.	F8 CH
13.0 – 16.0	Íl vysoko plastický, šedozelený, pevnej až tvrdej konzistencie, prechod do spevnených ílovcov.	F8 CH

Pri tejto zaťažovacej skúške bola pilóta opatrená tenzometrami v rôznych úrovniach pilóty po jej dĺžke. Na základe modulu pružnosti, plochy pilóty v priečnom reze a zmeraného pomerného pretvorenia mohli byť dopočítané prenesené sily po dĺžke pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch. Prenesená sila do päty pilóty mohla byť priamo zmeraná pomocou pätného lisu. Priebeh síl po dĺžke pilóty je zobrazený v grafe 6.2, kde sa na zvislej osi nachádza hĺbka (vzdialenosť od hlavy pilóty) a na vodorovnej osi veľkosť sily v danej úrovni pre každý zaťažovací stav. Z tohto grafu vyplýva, že do päty pilóty bolo pri sile 3985 kN (ZS VI) prenesených 205 kN, čo zodpovedá približne 5.1 % zaťaženia v hlave pilóty. Z tohto dôvodu boli aj v inverznej analýze prispôbené vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) (e a f), hyperbolickej prenosovej funkcie (M_b), modelu FZ a modelu AB1 ($E_{M,b}$, M_b) tak, že päta nevstupovala do únosnosti tejto pilóty. Konkrétne hodnoty budú uvedené v ďalšej časti práce.



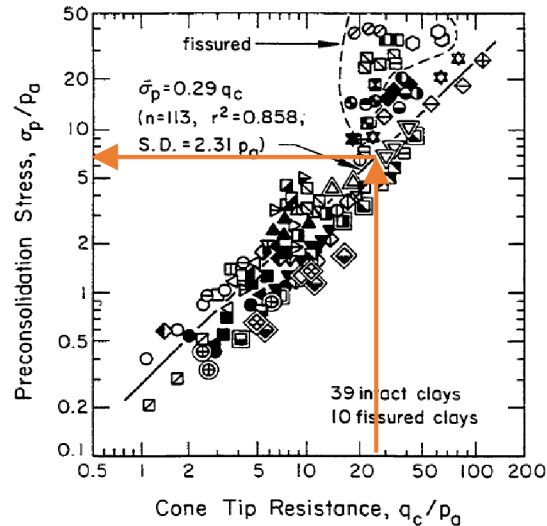
Graf 6.2 Prenos sily v jednotlivých zaťažovacích stavoch po dĺžke objektu pilóty D 4707 SO 210

6.1.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE

Metodika výpočtu bola založená na stanovení parametrov zeminy a pilóty na základe údajov zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky tak, aby čo najpresnejšie vystihovali skutočné podmienky. Pre metódu prenosových funkcií z výsledkov presiometrických skúšok bola použitá na účinné vrstvy úroveň riešenia 2(A), ktorá umožňuje nekonštantný priebeh hodnoty parametra plášťového trenia β_{av} . Táto úroveň riešenia je určená pre prekonsolidované tuhé až pevné íly, ktoré boli zaznamenané práve v zemnom prostredí analyzovaných zaťažovacích skúšok. Do výpočtu teda nevstupuje jedna hodnota β_{av} , ale je nahradená parametrami POP a φ_{cv} , z ktorých program dopočíta hodnotu β_{av} pre každý segment pilóty samostatne.

So stúpajúcou mierou prekonsolidácie stúpa aj hodnota parametra β_{av} . (Chalmovský a kol., 2021). Dôležité je aj to, že hodnota parametra β_{av} zároveň klesá s hĺbkou, čo potvrdzuje aj meranie podľa (Burland, 1973). Niektoré z parametrov sú empirické a teda ich hodnota je stanovená na základe už predtým vykonaných porovnaní skutočnosti s predikciou. Medzi ne patria parametre tuhosti M_b , M_s , α_b a α_s . Parametre M_b a M_s boli určené na základe ich odporúčanej hodnoty podľa (Bohn a kol., 2016). Ich konkrétna hodnota je uvedená v tabuľke 6.5. Parameter M_b bol volený tak, aby päta dosahovala veľmi malú tuhosť a tým neprispievala k únosnosti. Dôvodom bol výsledok analýzy zaťažovacej skúšky, z ktorého vyplývalo, že do päty pilóty je prenesená minimálna sila pre všetky zaťažovacie stavy. Parametre α_b a α_s vychádzali z odporúčaní podľa (Frank a kol., 1982) pre FZ model a (Abchir a kol., 2016) pre AB1 model, ktorých hodnoty sú uvedené v časti 2.4. ZHRNUTIE. Hodnoty týchto parametrov pre modely prenosových funkcií FZ a AB1 boli stanovené inverznou analýzou s ohľadom na čo najväčšiu zhodu predikovanej a nameranej MZK. Medzi ďalšie volené parametre patria $\sigma_{b,ult}$, POP , φ_{cv} , $E_{M,REF}$, p_{REF} , m , k_1 , $E_{M,b}$. Pre tieto parametre je uvedené vysvetlenie ich hodnoty nasledovne:

- $\sigma_{b,ult}$ – hodnota medzného napätia v päte pilóty bola zvolená podľa (Hulla a kol., 2004), kde je pre zeminu triedy F5 – F8 a $I_c > 1.0$ odporúčaná hodnota 3 000 kPa.
- POP – rozdiel medzi maximálnym napätím v minulosti a efektívnym geostatickým napätím bol volený na základe popisu konzistencie zeminy a z toho vyplývajúceho odporu na hrote statickej penetračnej skúšky $q_c = 0.9 - 4.2$ MPa podľa tabuľky 5.15 v (Look, 2007). Zvolená bola hodnota približne 2.8 MPa z dôvodu väčšinového zastúpenia tuhej až pevnej konzistencie ílu po dĺžke pilóty. Podľa očakávanej hodnoty q_c (2.8 MPa) pomerom k atmosférickému tlaku p_a (0.1 MPa) bolo ďalej stanovené napätie σ_p k p_a podľa obrázku 6.1 na hodnotu približne 6.7 (σ_p je teda približne 0.67 MPa = 670 kPa). $\sigma_p = POP + \sigma'_{or}$ a σ'_{or} uvažujeme pre stred vrstvy v hĺbke 8 m 168 kPa ($\gamma = 21$ kN/m³, HPV v hĺbke 8 m podľa záverečnej správy zaťažovacej skúšky). Následne je hodnota $POP = \sigma_p - \sigma'_{or} = 670 - 168 \approx 500$ kPa, ktorej odvodenie je znázornené schematicky na obrázku 6.1 (Kulhawy a kol., 1990).



Obrázok 6.1 Vzťah pomeru q_c/ρ_a a σ_p/ρ_a podľa (Kulhawy a kol., 1990)

- φ_{cv} – uhol vnútorného trenia v kritickom stave stanovený na základe smerových normových charakteristík ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988) bol mierne zvýšený vzhľadom na výskyt tenkých vrstiev jemnozrnného piesku na hodnotu 24.5° .
- $E_{M,REF}$ – Ménardov presiometrický modul bol stanovený pre triedy zeminy F5 – F8 z analýzy presiometrických skúšok na hodnotu 10 959 kPa.
- p_{REF} – referenčný tlak pre vyhodnotenie presiometrických skúšok bol stanovený na hodnotu 100 kPa.
- m – parameter ovplyvňujúci linearitu závislosti E_M a σ'_{or} bol stanovený regresnou analýzou presiometrických skúšok s použitím doplnku s názvom Riešiteľ v programe Microsoft Excel na hodnotu $m = 1$.
- k_1 – teoretická ťahová pevnosť, bola stanovená doplnkom s názvom Riešiteľ v programe Microsoft Excel v intervale od 0 do hodnoty súčinu efektívnej súdržnosti a kotangensu efektívneho uhlu vnútorného trenia podľa vzťahu 4.2. Regresnou analýzou bola stanovená na hodnotu $k_1 = 0$ kPa.
- $E_{M,b}$ – Ménardov presiometrický modul v oblasti päty pilóty bol stanovený podľa rovnice 4.1 pre efektívne geostatické napätie v úrovni päty pilóty. V inverznej analýze tejto zaťažovacej skúšky však bol stanovený na minimálnu hodnotu 0.1 kPa z dôvodu malej sily prenesenej do päty tejto pilóty.

Hodnoty parametrov $E_{M,REF}$, p_{REF} , m , k_1 sú odvodené z analýzy presiometrických skúšok v kapitole 4. VYHODNOTENIE PRESIOMETRICKÝCH MODULOV a sú stanovené pre všetky zeminy, ktoré patria do tried F5 – F8. Z toho vyplýva, že budú použité aj v ďalších inverzných analýzach z dôvodu veľmi podobného inžiniersko – geologického prostredia zámerne vybraných zaťažovacích skúšok vŕtaných pilót. Všetky vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, resp. postupy výpočtu sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách 6.4 (hodnoty parametrov postupu podľa (Masopust, 1994)) a 6.5 (hodnoty parametrov metódy prenosových funkcií). V module Pilóta programu Geo5 pre postup podľa (Masopust, 1994) bolo zemné prostredie zjednodušené do troch vrstiev na základe ich podrobného popisu uvedeného v tabuľke 6.3. V prístupe metódy prenosových funkcií bolo prostredie pre zjednodušenie modelované ako jedna vrstva, keďže vzájomný vzťah všetkých vrstiev bol vzhľadom na vstupné parametre veľmi podobný. Zvyšné, samostatne nevysvetlené parametre boli volené na základe smerových normových charakteristík podľa ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988).

Tabuľka 6.4 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty D 4707 SO 210

Parameter	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva
Hĺbka [m]	0 - 4.5	4.5 - 11.5	11.5 - ...
L [m]	16		
d_s [m]	1.2		
γ [kN/m ³]	21	21	21
φ_{ef} [°]	19	19	19
c_{ef} [kPa]	25	25	25
ν [-]	0.4	0.4	0.4
E_{def} [MPa]	12	16	20
γ_s [kN/m ³]	21	21	21
a [-]	46	71.5	97
b [-]	20	64	108
E_s [MPa]	10.58	33.47	53.74
e [-]	-	-	10
f [-]	-	-	0
l_c [-]	0.5	0.75	1

Dôvodom nízkej zvolenej hodnoty parametrov e a f je práve vylúčenie päty pilóty z prispievania k únosnosti.

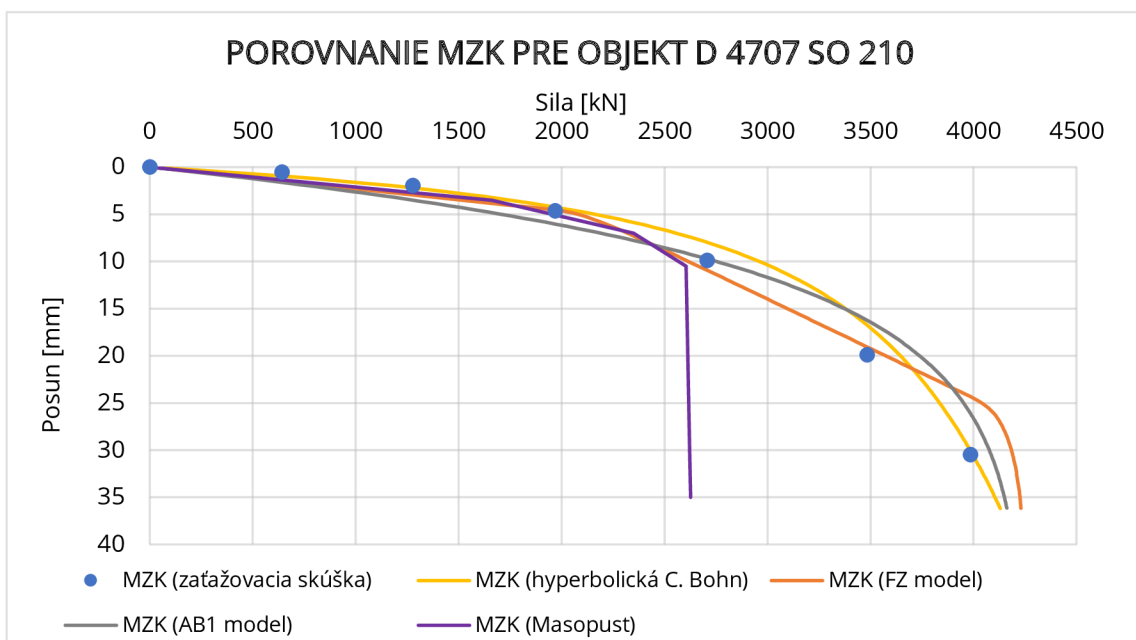
Tabuľka 6.5 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty D 4707 SO 210

Parameter	Hyperbolická prenosová funkcia (Bohn a kol., 2016)	Prenosová funkcia FZ modelu (Frank a kol., 1982)	Prenosová funkcia AB1 modelu (Abchir a kol., 2016)
L [m]	16		
d_s [m]	1.2		
E_c [MPa]	27 000		
$\sigma_{b,ult}$ [kPa]	3 000	3 000	3 000
M_b [-]	0.25	0.25	0.25
M_s [-]	0.0038	0.0038	0.0038
γ [kN/m ³]	21	21	21
γ_s [kN/m ³]	21	21	21
POP [kPa]	500	500	500
φ_{cv} [°]	24.5	24.5	24.5
α_b [-]	-	11	11
α_s [-]	-	0.6	0.59
$E_{M,REF}$ [kPa]	-	10 959	10 959
p_{REF} [kPa]	-	100	100
m [-]	-	1	1
k_1 [m]	-	0	0
$E_{M,b}$ [kPa]	-	0.1	0.1

6.1.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER

Štyri predikované MZK s využitím rôznych postupov sú znázornené v grafe 6.3. Prvá bola predikovaná už spomínaným postupom podľa Masopusta v module Pilóta programu Geo5 (Masopust, 1994), ďalšie tri MZK boli získané ako výstup z programu vyvíjanom na ústave geotechniky Fakulty stavebnej VUT v Brne s názvom PMpLTO, ktorý využíva metódu prenosových funkcií. Konkrétne išlo o prenosovú funkciu hyperbolickú podľa (Bohn a kol., 2016) a prenosové funkcie zostavené na základe výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ a AB1.

Všetky tieto MZK sú zobrazené v grafe 6.3 ako výsledok inverznej analýzy, kde bolo cieľom dosiahnutie maximálnej nožnej zhody predikovaných MZK s nameranou MZK zo zaťažovacej skúšky. Predikcie MZK sú taktiež ovplyvnené zanedbaním mobilizácie únosnosti na päte. Tento predpoklad vychádza z výsledkov tenzometrického merania počas zaťažovacej skúšky. Z grafu 6.3 vyplýva, že najväčšiu zhodu z troch použitých prenosových funkcií dosahuje prenosová funkcia FZ modelu. Prenosová funkcia AB1 modelu a hyperbolická prenosová funkcia sa vo vyšších fázach zaťažovania vzdávajú a predikujú menšie hodnoty posunu hlavy pilóty. Po dosiahnutí sily v hlave pilóty na úrovni 3500 kN sa krivky opäť približujú nameranej MZK. Rozdiel je spôsobený priebehom tuhosti vzhľadom na posun, ktorý bude zobrazený v záverečnej časti práce. Pri posune 10 až 20 mm dosahuje tuhosť AB1 modelu vyššie hodnoty oproti modelu FZ, vid'. 7. ZHRNUTIE A VYHODNOTENIE VSTUPNÝCH HODNÔT DO METÓDY PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ pre plášť. Celkovo je možné pozorovať dobrú zhodu MZK. Rozdiely medzi jednotlivými MZK sú v hodnotách maximálne niekoľko milimetrov pri rovnakej zaťažovacej sile. Z priebehu MZK postupu podľa (Masopust, 1994) je zjavný konzervatívnejší prístup, ktorý je ale taktiež spoľahlivý. Zobrazené MZK boli dosiahnuté pri vstupných parametroch uvedených v tabuľkách 6.4 pre postup podľa (Masopust, 1994) a 6.5 pre metódu prenosových funkcií.



Graf 6.3 Porovnanie MZK pre objekt pilóty D 4707 SO 210

6.2. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU D 4704 SO 225

6.2.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV

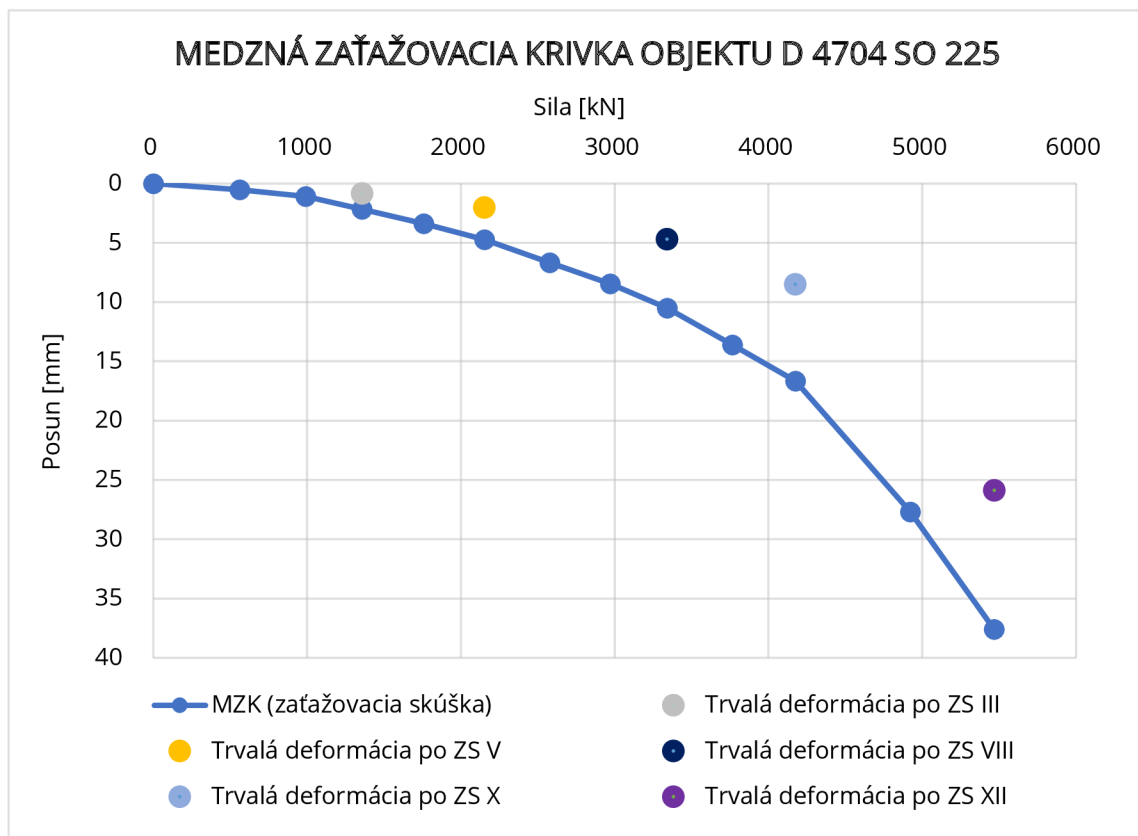
Informácie pre túto časť práce boli čerpané zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky (SKANSKA, 2006). Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vŕtanej pilóte priemeru 940 mm a celkovej dĺžky 19.35 m z toho účinná dĺžka je 15 m z dôvodu separácie dĺžky 4.35 m od hlavy pilóty. Tento objekt bol navrhnutý ako základ pre most na diaľnici D47 km 1.452 cez trať Českých dráh. Pilóta bola vŕtaná s oceľovým pažením a pre teleso pilóty bol použitý betón C25/30 s odolnosťou v agresívnom prostredí XA1.

Počas zaťažovacej skúšky boli do armokoša pilóty osadené strunové tenzometre v hĺbkach 1 m; 4.7 m; 10.15 m; 14.15 m; 18.15 m a na päte pilóty v hĺbke 19.35 m bol umiestnený pätný lis pre stanovenie prenosu sily (všetky hĺbky sú uvedené od hlavy pilóty). Zaťažovacia sila bola vyvodená štyrmi hydraulickými lismi, ktorých reakcia bola prenesená ôsmimi zemnými kotvami. Predpokladané zvislé zaťaženie pilóty bolo uvažované 3600 kN. Podľa projektu sa uvažovalo maximálne prevádzkové zaťaženie systémovej pilóty 3615 kN. Meranie sily bolo uskutočnené pomocou tlaku v hydraulickej sústave a dynamometrov pod lismi. Meraný posun v hlave pilóty bol získaný prostredníctvom štyroch kusov indukčných metrov. Hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch sú uvedené v tabuľke 6.6.

Tabuľka 6.6 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty D 4704 SO 225

Zaťažovací stav	I	II	III	IV	V	VI
Sila [kN]	563	991	1358	1759	2154	2579
Zaťažovací stav	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Sila [kN]	2972	3341	3767	4175	4923	5468

Zaťažovacia skúška bola ukončená po dvanástom zaťažovacom stave pri sile 5468 kN a neustálenom posune hlavy pilóty 37.61 mm. Smerná únosnosť pilóty bola na základe meraní stanovená na 4600 kN. Z nameraných hodnôt posunu v hlave pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch bolo možné stanoviť medznú zaťažovaciu krivku, ktorá je zobrazená v grafe 6.4. Pričom body predstavujú posun v hlave pilóty po odľahčení.



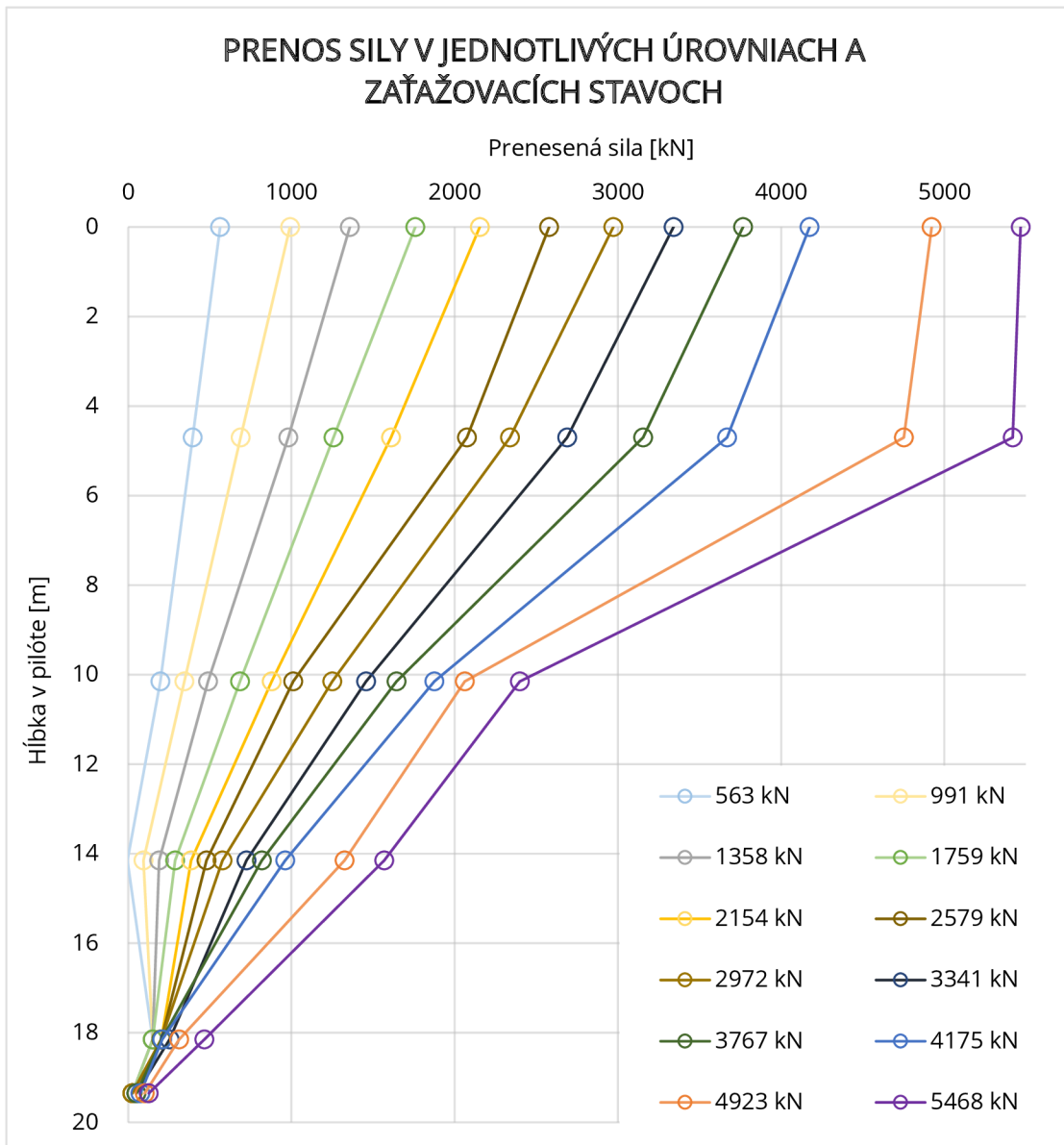
Graf 6.4 MZK objektu pilóty D 4704 SO 225

Pre tento objekt bol spracovaný podrobný geotechnický prieskum (Geotest, a.s., Brno, 2001). Geologický profil podrobného prieskumu sa zhodoval s profilom stanoveným pri vŕtaní pilóty. Inžiniersko - geologické podmienky pilóty boli popísané v zmysle ČSN 721001, 721002, 731001. Geologický profil je uvedený v tabuľke 6.7. Podzemná voda bola narazená v hĺbke 3.5 m (SKANSKA, 2005).

Tabuľka 6.7 Geologický profil objektu pilóty D 4704 SO 225

Hĺbka [m]	Vrstva	Klasifikácia
0.0 – 2.0	Hlina šedohnedá, tuhej konzistencie.	F5 MI
2.0 – 4.5	Íl tmavý, organický, tuhej až mäkkej konzistencie.	F6 CI
4.5 – 5.5	Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej až mäkkej konzistencie.	F4 CS
4.5 – 5.0	Íl stredne plastický, tmavošedý, tuhej až pevnej konzistencie.	F6 CI
5.5 – 13.0	Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej konzistencie.	F4 CS
13.0 – 15.0	Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej až pevnej konzistencie, s ojedinelou prímiesou úlomkov pieskovca.	F4 CS
15.0 – 19.2	Íl prachovito piesčitý, šedý, pevnej konzistencie.	F4 CS

Pri tejto zaťažovacej skúške bola pilóta taktiež opatrená tenzometrami v rôznych úrovniach pilóty po jej dĺžke. Vďaka tomu bolo aj pre tento objekt možné získať priebeh síl po dĺžke pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy. Ten je zobrazený v grafe 6.5, kde na zvislej osi je hĺbka (vzdialenosť od hlavy pilóty) a na vodorovnej osi je veľkosť sily v danej úrovni pre každý zaťažovací stav. Z tohto grafu vyplýva, že do päty pilóty bolo pri sile 5468 kN (ZS XII) prenesených 126 kN, čo zodpovedá približne 2.3 % zaťaženia v hlave pilóty. Z tohto dôvodu boli aj v inverznej analýze prispôsobené vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) (e a f), hyperbolickej prenosovej funkcie (M_b), modelu FZ a modelu AB1 ($E_{M,b}$, M_b) tak, že päta nevstupovala do únosnosti tejto pilóty. Konkrétne hodnoty budú uvedené v ďalšej časti práce.



Graf 6.5 Prenos sily v jednotlivých zatažovacích stavoch po dĺžke objektu pilóty D 4704 SO 225

6.2.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE

Metodika výpočtu bola založená opäť na stanovení parametrov zeminy a pilóty na základe údajov zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky tak, aby čo najpresnejšie vystihovali skutočné podmienky. Empirické parametre tuhosti M_b , M_s , α_b a α_s boli určené na základe ich odporúčanej hodnoty podľa (Bohn a kol., 2016) pre parametre M_b a M_s , a (Frank a kol., 1982), resp. (Abchir a kol., 2016) pre parametre α_b a α_s . Ich konkrétna hodnota je uvedená v tabuľke 6.8. Parameter M_b bol aj v tomto prípade volený tak, aby päta dosahovala veľmi malú tuhosť a tým neprispievala k únosnosti. Dôvod bol rovnaký ako v prípade objektu D 4707 SO 210, kde bola taktiež sila prenesená do päty pilóty minimálna. Parametre α_b a α_s vychádzali z odporúčaní podľa (Frank a kol., 1982) pre FZ model a (Abchir a kol., 2016) pre AB1 model, ktorých hodnoty sú uvedené v časti 2.4. ZHRNUTIE. Hodnoty týchto parametrov pre modely prenosových funkcií FZ a AB1 boli stanovené s ohľadom na čo najväčšiu zhodu predikovanej a nameranej MZK. Medzi ďalšie volené parametre patria $\sigma_{b,ult}$, POP , φ_{cv} , $E_{M,REF}$, ρ_{REF} , m , k_1 , $E_{M,b}$. Pre každý parameter je uvedené vysvetlenie jeho hodnoty v predošlej časti práce s názvom 6.1.3. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE. Princíp stanovenia parametrov je rovnaký aj v tomto prípade, pričom hodnoty parametrov $E_{M,REF}$, ρ_{REF} , m , k_1 sú rovnaké s ohľadom na veľmi podobný geologický profil s objektom D4707 SO 210, kde podložie taktiež tvoria majoritne súdržné jemnozrnné zeminy tried F5 – F8.

Všetky vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, resp. postupy výpočtu sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách 6.8 (hodnoty parametrov postupu podľa (Masopust, 1994)) a 6.9 (hodnoty parametrov metódy prenosových funkcií). V module Pilóta programu Geo5 pre postup podľa (Masopust, 1994) bolo zemné prostredie zjednodušené do štyroch vrstiev na základe ich podrobného popisu uvedeného v tabuľke 6.7. Hlava pilóty bola uvažovaná v hĺbke 4.35 m z dôvodu separácie v úrovni 0 – 4.35 m (1. vrstva). Prvá vrstva tým pádom nevstupovala do únosnosti pilóty, pôsobila len ako priťaženie ostatných vrstiev.

V prístupe metódy prenosových funkcií bolo prostredie pre zjednodušenie modelované ako dve vrstvy (tabuľka 6.9). Dĺžka pilóty bola modelovaná na 19.35 m. Prvá vrstva mocnosti 4.35 m svojimi parametrami tuhosti a pevnosti (M_s , β_{av}) predstavovala separáciu. Táto vrstva bola namodelovaná s úrovňou riešenia 1(M), to znamená, že parameter β_{av} bol priamo zadán na základe vlastností zeminy. Druhá vrstva bola modelovaná s úrovňou riešenia 2(A), keďže išlo pravdepodobne o prekonsolidované íly. Uhol vnútorného trenia v kritickom stave $\varphi_{cv} = 27^\circ$ bol volený s vyššou hodnotou oproti inverznej analýze objektu pilóty D 4707 SO 210 z dôvodu prítomnosti piesčitej frakcie. Zvyšné, samostatne nevysvetlené parametre boli volené na základe smerových normových charakteristík podľa ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988).

Tabuľka 6.8 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty D 4704 SO 225

Parameter	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva	4. vrstva
Hĺbka [m]	0 - 4.35	4.35 - 4.7	4.7 - 10.1	10.1 - ...
L [m]	15			
d_s [m]	0.94			
γ [kN/m ³]	20	21	21	21
φ_{ef} [°]	21	19	19	19
c_{ef} [kPa]	12	25	25	25
ν [-]	0.4	0.4	0.4	0.4
E_{def} [MPa]	8.5	12	16	18
γ_s [kN/m ³]	20	21	21	21
a [-]	46	56.2	71.5	97
b [-]	20	37.6	64	108
E_s [MPa]	10	18.11	30	50.25
e [-]	-	-	-	10
f [-]	-	-	-	0
l_c [-]	0.5	0.6	0.75	1

Dôvodom nízkej hodnoty parametrov e a f je práve vylúčenie päty pilóty z prispievania k únosnosti podobne ako pri objekte D 4707 SO 210.

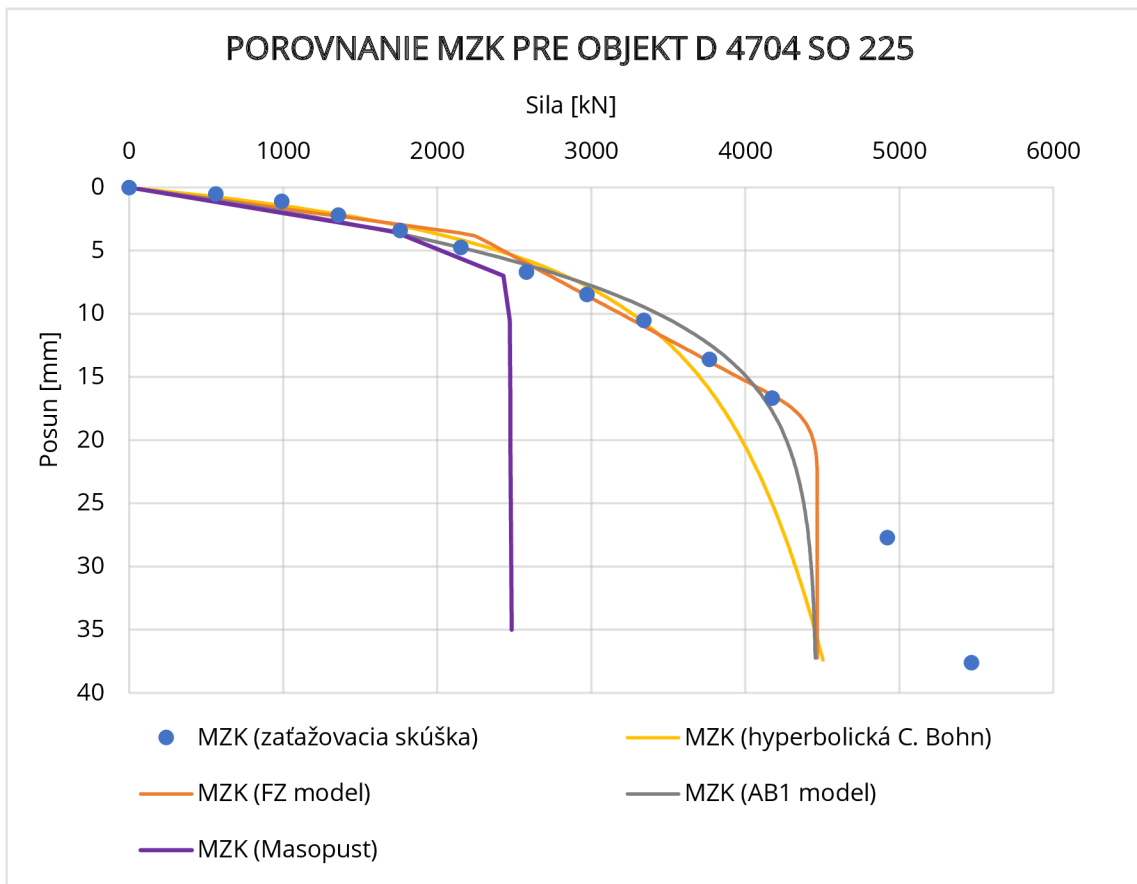
Tabuľka 6.9 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty D 4704 SO 225

Parameter	Hyperbolická prenosová funkcia (Bohn a kol., 2016)		Prenosová funkcia FZ modelu (Frank a kol., 1982)		Prenosová funkcia AB1 modelu (Abchir a kol., 2016)	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Vrstva	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Hĺbka [m]	0 - 4.35	4.35 - 20	0 - 4.35	4.35 - 20	0 - 4.35	4.35 - 20
L [m]	19.35					
d_s [m]	0.94					
E_c [MPa]	33 000					
$\sigma_{b,ult}$ [kPa]	-	5 000	-	5 000	-	5 000
M_b [-]	-	0.25	-	0.25	-	0.25
M_s [-]	0.1	0.0038	0.1	0.0038	0.1	0.0038
γ [kN/m ³]	21	21	21	21	21	21
γ_s [kN/m ³]	21	21	21	21	21	21
β_{av} [-] / POP [kPa]	0.001	750	0.001	750	0.001	750
φ_{cv} [°]	-	-	-	27	-	27
α_b [-]	-	-	-	11	-	11
α_s [-]	-	-	2	0.95	2	0.9
$E_{M,REF}$ [kPa]	-	-	10 959	10 959	10 959	10 959
p_{REF} [kPa]	-	-	100	100	100	100
m [-]	-	-	1	1	1	1
k_1 [m]	-	-	0	0	0	0
$E_{M,b}$ [kPa]	-	-	-	0.1	-	0.1

6.2.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER

Daná zaťažovacia skúška bola inverzne analyzovaná prostredníctvom troch predikovaných MZK. Konkrétne išlo aj v tomto prípade o prenosovú funkciu hyperbolickú podľa (Bohn a kol., 2016) a prenosové funkcie zostavené na základe výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ a AB1. Všetky tieto MZK sú zobrazené v grafe 6.6 ako výsledok inverznej analýzy, kde bolo cieľom dosiahnutie maximálnej nožnej zhody predikovaných MZK s nameranou MZK zo zaťažovacej skúšky.

Predikcie MZK sú taktiež ovplyvnené zanedbaním mobilizácie únosnosti na päte. Tento predpoklad vychádza z výsledkov tenzometrického merania počas zaťažovacej skúšky. Z grafu 6.6 vyplýva, že najväčšiu zhodu z troch použitých prenosových funkcií dosahuje prenosová funkcia FZ a AB1 modelu, keďže predikovaný posun je takmer zhodný aj pri hodnotách nad 15 mm. Rozdiely medzi jednotlivými MZK sú v hodnotách maximálne niekoľko milimetrov pri rovnakej zaťažovacej sile v oblasti, ktorá je pre predikciu podstatná. Táto oblasť je pri pilótach v rozmedzí približne do 15 mm posunu. Pre porovnanie je zobrazená aj MZK postupu podľa (Masopust, 1994), z nej je zjavný opäť konzervatívnejší prístup, ktorý je ale taktiež spoľahlivý. MZK boli dosiahnuté pri vstupných parametroch uvedených v tabuľkách 6.8 pre postup podľa (Masopust, 1994) a 6.9 pre metódu prenosových funkcií.



Graf 6.6 Porovnanie MZK pre objekt pilóty D 4704 SO 225

6.3. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTY TP1

6.3.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV

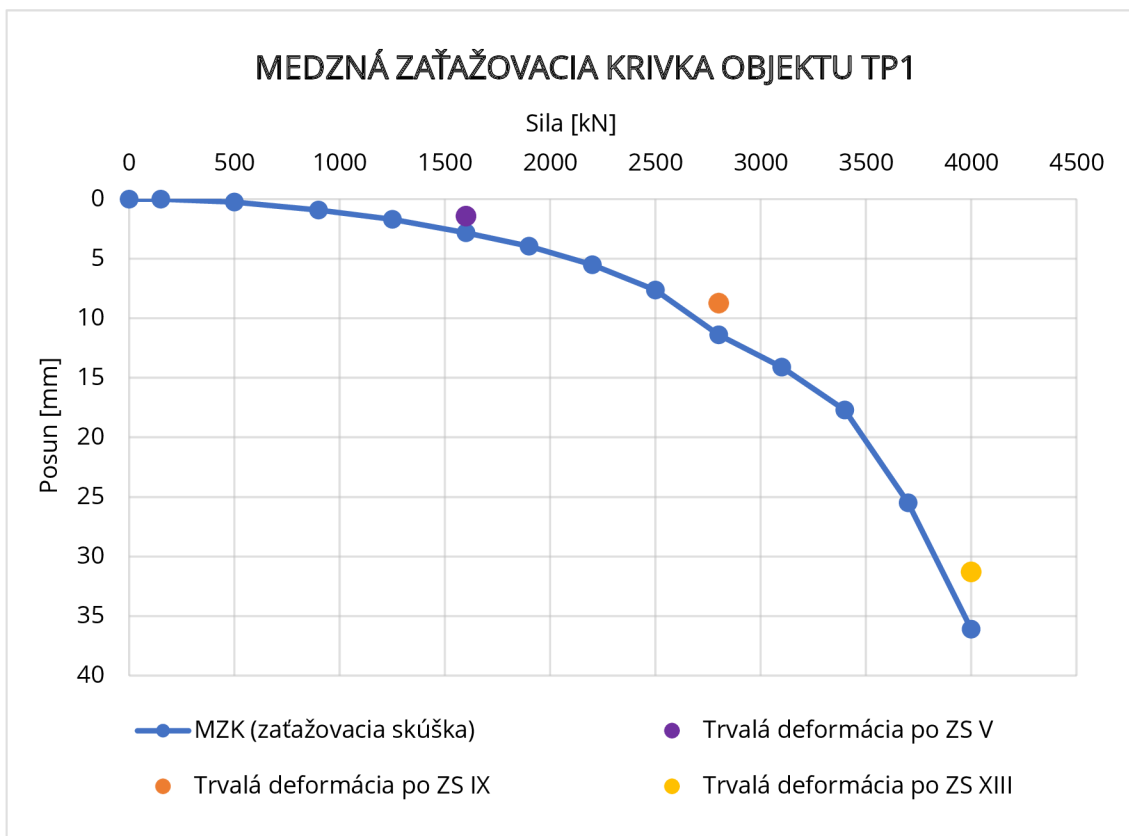
Informácie pre túto časť práce boli čerpané zo súhrnnej výskumnej správy (Chalmovský a kol., 2021). Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vŕtanej pilóte priemeru 880 mm v časti vŕtanej s pažením a 780 mm v časti vŕtanej bez paženia. Pri realizácii pilóty bola zapažená dĺžka 12 m a nezapažená dĺžka 5 m, teda celková dĺžka pilóty je 17 m. Pre teleso pilóty bol použitý betón C25/30 s odolnosťou v agresívnom prostredí XA1.

Spôsob zaťažovania bol silovo riadený po krokoch s udržovaním zaťaženia. Medzi merané údaje patrili sila pôsobiaca na hlavu pilóty a posun v hlave pilóty. Hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch sú uvedené v tabuľke 6.10. Vzhľadom na nedostatok archívnych skúšok bola jedna zo skúšaných pilót, konkrétne objekt TP1, zaťažovaná do posunu v hlave pilóty 36 mm.

Tabuľka 6.10 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty TP1

Zaťažovací stav	I	II	III	IV	V	VI	VII
Sila [kN]	150	500	900	1250	1600	1900	2200
Zaťažovací stav	VIII	IX	X	XI	XII	XIII	-
Sila [kN]	2500	2800	3100	3400	3700	4000	-

Zaťažovacia skúška bola ukončená po trinástom zaťažovacom stave pri sile 4000 kN a posune hlavy pilóty 36.1 mm. Z nameraných hodnôt posunu v hlave pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch bolo možné stanoviť medznú zaťažovaciu krivku, ktorá je zobrazená v grafe 6.7. Pričom body aj v tomto prípade predstavujú posun v hlave pilóty po odľahčení.



Graf 6.7 MZK objektu pilóty TP1

Geologický profil bol popísaný v troch vrstvách a je uvedený v tabuľke 6.11. Podzemná voda bola narazená v hĺbke 4.0 m pod úrovňou terénu.

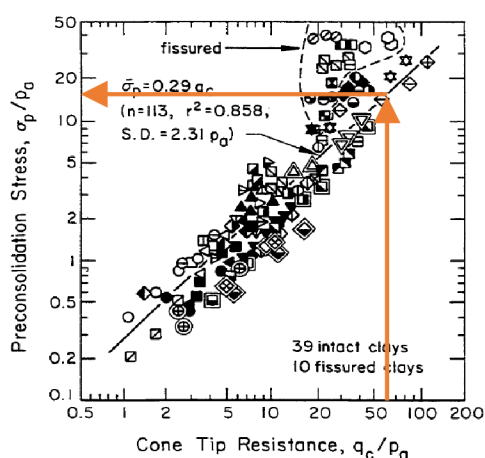
Tabuľka 6.11 Geologický profil objektu pilóty TP1

Hĺbka [m]	Vrstva	Klasifikácia
0.0 – 9.5	Íl so strednou plasticitou až íl prachovitý, kvartér.	F6 CI
9.5 – 10.5	Štrk ílovitý, íl štrkovitý zvodnený, kvartér.	G5 GC
10.5 – 17	Íl s laminami piesku, tuhý až pevný, neogén.	F4 CS

Pri tejto zaťažovacej skúške nebola pilóta opatrená tenzometrami, preto nebolo možné stanoviť priebeh síl po dĺžke pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch. V tomto prípade sa teda predpokladal príspevok päty k únosnosti pilóty mobilizáciou napätia v päte.

6.3.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE

Metodika výpočtu bola založená taktiež na stanovení parametrov zeminy a pilóty na základe údajov z výskumnej správy (Chalmovský a kol., 2021) tak, aby čo najpresnejšie vystihovali skutočné podmienky. Empirické parametre tuhosti M_b , M_s , α_b a α_s boli určené podobne ako v predošlých inverzných analýzach. Ich konkrétna hodnota je uvedená v tabuľke 6.13. Parameter M_b bol volený tak, aby päta dosahovala očakávanú tuhosť a tým prispievala k únosnosti prostredníctvom mobilizovaného napätia v päte pilóty. Parametre α_b a α_s vychádzali z odporúčaní podľa (Frank a kol., 1982) pre FZ model a (Abchir a kol., 2016) pre AB1 model, ktorých hodnoty sú uvedené v časti 2.4. ZHRNUTIE. Hodnoty týchto parametrov pre modely prenosových funkcií FZ a AB1 boli stanovené so snahou o čo najväčšiu zhodu predikovanej a nameranej MZK. Medzi ďalšie volené parametre patria $\sigma_{b,ult}$, POP , φ_{cv} , $E_{M,REF}$, p_{REF} , m , k_1 , $E_{M,b}$. Pre každý tento parameter je uvedené vysvetlenie jeho hodnoty v rámci časti inverznej analýzy objektu pilóty D 4707 SO 210 s názvom 6.1.3. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE. Ménardov presiometrický modul v oblasti päty pilóty $E_{M,b}$ bol stanovený podľa rovnice 4.1 pre efektívne geostatické napätie v úrovni päty pilóty. Parameter POP bol volený na vyššiu hodnotu na základe výsledkov CPT skúšky, kde vo vrstve prekonsolidovaného ílu odpor na hrote q_c dosahoval hodnotu 6 – 10 MPa. Podľa vyššie spomenutého princípu stanovenia parametra POP na základe hodnoty q_c a obrázku 6.2, bola jeho hodnota stanovená na 1500 kPa.



Obrázok 6.2 Vzťah pomeru q_c/p_a a σ_p/p_a podľa (Kulhawý a kol., 1990)

Princíp stanovenia parametrov je rovnaký aj v tomto prípade, pričom hodnoty parametrov $E_{M,REF}$, p_{REF} , m , k_1 sú rovnaké s ohľadom na geologický profil takmer zhodný s objektom D 4707 SO 210, kde podložie taktiež tvoria majoritne súdržné jemnozrnné zeminy triedy F5 – F8. Všetky vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, resp. postupy výpočtu sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách 6.12 (hodnoty parametrov postupu podľa (Masopust, 1994)) a 6.13 (hodnoty parametrov metódy prenosových funkcií). V module Pilóta programu Geo5 pre postup podľa (Masopust, 1994) bolo zemné prostredie zjednodušené do dvoch vrstiev na základe ich popisu uvedeného v tabuľke 6.11. V prístupe metódy prenosových funkcií bolo prostredie pre zjednodušenie modelované taktiež ako dve vrstvy (tabuľka 6.13). 1. vrstva v úrovni riešenia 1(M) a 2. vrstva v úrovni riešenia 2(A). Dĺžka pilóty bola modelovaná na 17 m. Priemer bol modelovaný v prístupe s prenosovými funkciami ako vážený priemer pilóty na základe dĺžok vŕtania s pažením a bez paženia, $d_s = 0.85$ m. Zvyšné, samostatne nevysvetlené parametre boli volené na základe smerových normových charakteristík podľa ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988).

Tabuľka 6.12 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty TP1

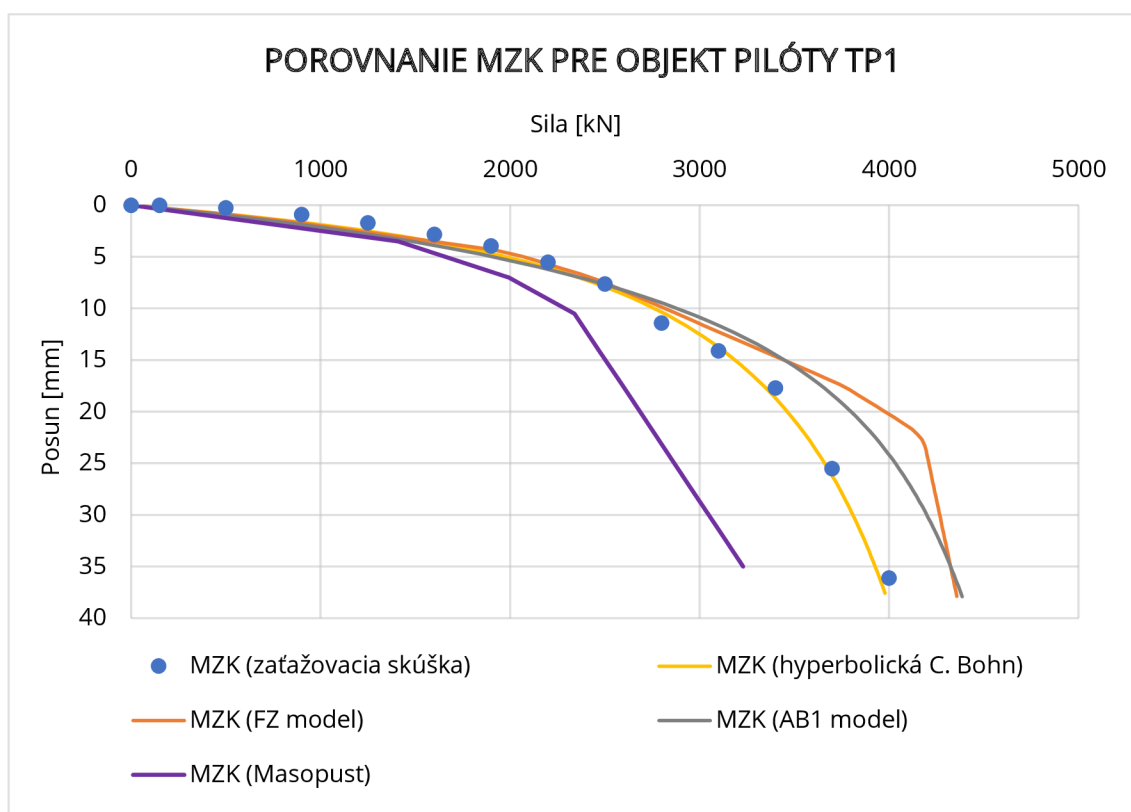
Parameter	1. vrstva	2. vrstva
Hĺbka [m]	0 - 9.5	9.5 - ...
L [m]	12 + 5 = 17	
d_s [m]	Premenný - 0.88 (s pažením) / 0.78 (bez paženia)	
γ [kN/m ³]	21	21
φ_{ef} [°]	19	19
c_{ef} [kPa]	25	25
ν [-]	0.4	0.4
E_{def} [MPa]	12	16
γ_s [kN/m ³]	21	21
a [-]	46	97
b [-]	20	108
E_s [MPa]	14.49	49.2
e [-]	-	988
f [-]	-	1084
l_c [-]	0.5	1

Tabuľka 6.13 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty TP1

Parameter	Hyperbolická prenosová funkcia (Bohn a kol., 2016)		Prenosová funkcia FZ modelu (Frank a kol., 1982)		Prenosová funkcia AB1 modelu (Abchir a kol., 2016)	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Vrstva	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Hĺbka [m]	0 - 9.5	9.5 - 20	0 - 9.5	9.5 - 20	0 - 9.5	9.5 - 20
L [m]	17					
d_s [m]	0.85					
E_c [MPa]	30 500					
$\sigma_{b,ult}$ [kPa]	-	3 000	-	3 000	-	3 000
M_b [-]	-	0.03	-	0.03	-	0.03
M_s [-]	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
γ [kN/m ³]	21	21	21	21	21	21
γ_s [kN/m ³]	21	21	21	21	21	21
β_{av} [-] / POP [kPa]	0.27	1500	0.27	1500	0.27	1500
φ_{cv} [°]	-	27	-	27	-	27
α_b [-]	-	-	11	3.5	11	3.2
α_s [-]	-	-	1	0.9	1	0.9
$E_{M,REF}$ [kPa]	-	-	10 959	10 959	10 959	10 959
p_{REF} [kPa]	-	-	100	100	100	100
m [-]	-	-	1	1	1	1
k_1 [m]	-	-	0	0	0	0
$E_{M,b}$ [kPa]	-	-	-	24 876	-	24 876

6.3.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER

Štyri predikované MZK s využitím rôznych postupov sú znázornené v grafe 6.8. Cieľom bolo dosiahnutie maximálnej možnej zhody predikovaných MZK metódy prenosových funkcií s nameranou MZK zo zaťažovacej skúšky. Z grafu 6.8 vyplýva, že najväčšiu zhodu z troch použitých prenosových funkcií dosahuje hyperbolická prenosová funkcia podľa (Bohn a kol., 2016), keďže predikovaný posun je takmer zhodný aj pri hodnotách nad 15 mm. Prenosové funkcie zostavené na základe výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ a AB1 dosahujú taktiež dobrú zhodu, ale len vo fázach zaťažovania približne do 2700 kN. V ďalších fázach zaťažovania sa vzdávajú a vykazujú menšie hodnoty posunu hlavy pilóty. Keďže sa toto odchylenie MZK začína pri hodnotách posunu hlavy vyšších ako 10 mm, je možné predikciu považovať za pomerne presnú. Z priebehu MZK postupu podľa (Masopust, 1994) je zjavný opäť konzervatívnejší prístup, ktorý je ale taktiež spoľahlivý. MZK boli dosiahnuté pri vstupných parametroch uvedených v tabuľkách 6.11 postupu podľa (Masopust, 1994) a 6.12 pre metódu prenosových funkcií.



Graf 6.8 Porovnanie MZK pre objekt pilóty TP1

6.4. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTY TP2

6.4.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV

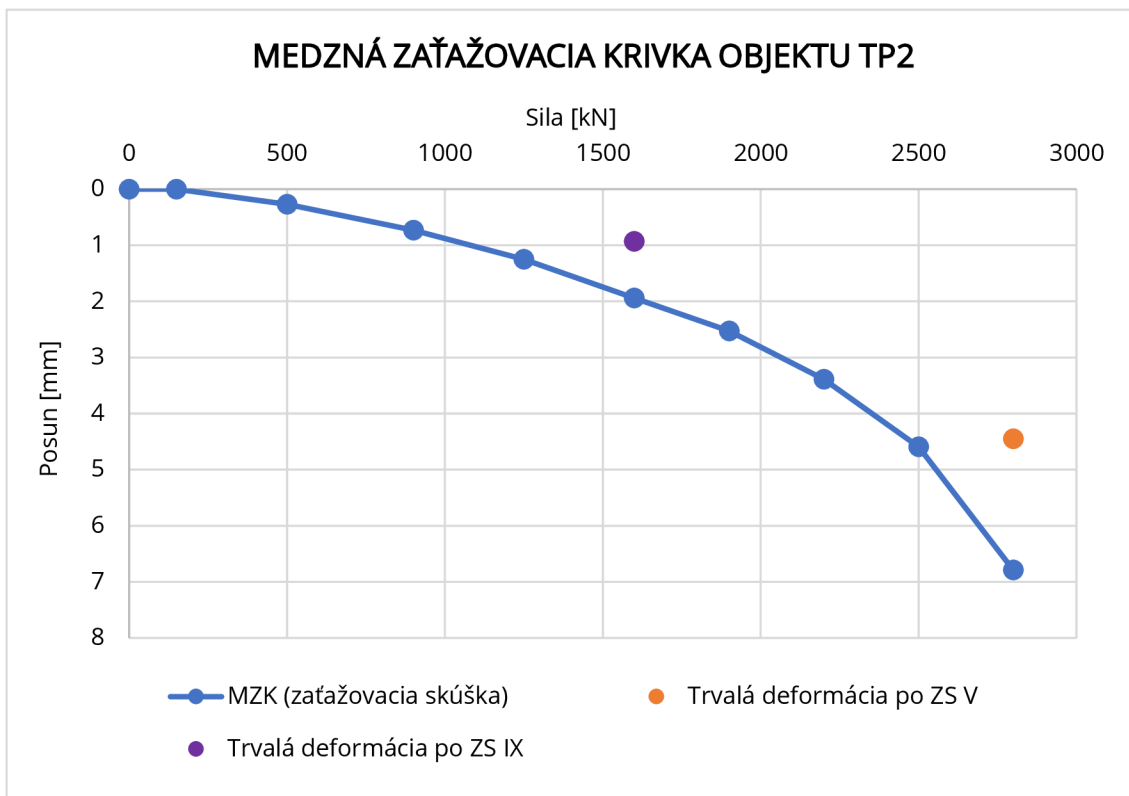
Informácie pre túto časť práce boli čerpané zo súhrnnej výskumnej správy (Chalmovský a kol., 2021). Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vrtanej pilóte podobnej objektu pilóty TP1. Priemer pilóty bol 880 mm v časti vrtanej s pažením a 780 mm v časti vrtanej bez paženia. Pri realizácii pilóty bola zapažená dĺžka 12 m a nezapažená dĺžka 7 m, teda celková dĺžka pilóty je 19 m. Pre teleso pilóty nebol uvedený použitý materiál, ale s najväčšou pravdepodobnosťou išlo taktiež o betón C25/30 s odolnosťou v agresívnom prostredí XA1 podľa objektu pilóty TP1.

Spôsob zaťažovania bol pravdepodobne rovnaký ako v prípade objektu pilóty TP1, a to silovo riadený po krokoch s udržovaním zaťaženia. Medzi merané údaje patrili sila pôsobiaca na hlavu pilóty a posun v hlave pilóty. Hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch sú uvedené v tabuľke 6.14.

Tabuľka 6.14 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty TP2

Zaťažovací stav	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX
Sila [kN]	150	500	900	1250	1600	1900	2200	2500	2800

Zaťažovacia skúška bola ukončená po deviatom zaťažovacom stave pri sile 2800 kN a posune hlavy pilóty 6.79 mm. Z nameraných hodnôt posunu v hlave pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch bolo možné stanoviť medznú zaťažovaciu krivku objektu pilóty TP2, ktorá je zobrazená v grafe 6.9. Pričom body predstavujú posun v hlave pilóty po odľahčení. Priebeh síl pre túto zaťažovaciu skúšku taktiež nebolo možné stanoviť, preto je predpokladaný príspevok päty do únosnosti pilóty.



Graf 6.9 MZK objektu pilóty TP2

Geologický profil bol rovnaký ako v prípade objektu pilóty TP1, keďže išlo o pilóty v rovnakej lokalite. Popísaný teda bol v troch vrstvách a je uvedený v tabuľke 6.15. Podzemná voda bola narazená v hĺbke 4.0 m pod úrovňou terénu.

Tabuľka 6.15 Geologický profil objektu pilóty TP2

Hĺbka [m]	Vrstva	Klasifikácia
0.0 – 9.5	Íl so strednou plasticitou až íl prachovitý, kvartér.	F6 CI
9.5 – 10.5	Štrk ílovitý, íl štrkovitý zvodnený, kvartér.	G5 GC
10.5 – 17	Íl s laminami piesku, tuhý až pevný, neogén.	F4 CS

6.4.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE

Metodika výpočtu bola, ako v predošlých prípadoch, založená na stanovení parametrov zeminy a pilóty na základe údajov z výskumnej správy (Chalmovský a kol., 2021) tak, aby čo najpresnejšie vystihovali skutočné podmienky. V tomto prípade boli predpokladané rovnaké vlastnosti ako v prípade objektu pilóty TP1. Empirické parametre tuhosti M_b , M_s , α_b a α_s boli určené obdobne ako v predošlých inverzných analýzách. Ich konkrétna hodnota je uvedená v tabuľke 6.17. Parameter M_b bol volený rovnako tak, aby päta dosahovala očakávanú tuhosť a tým prispievala k únosnosti prostredníctvom mobilizovaného napätia v päte pilóty. Parametre α_b a α_s vychádzali z odporúčaní podľa (Frank a kol., 1982) pre FZ model a (Abchir a kol., 2016) pre AB1 model, ktorých hodnoty sú uvedené v časti 2.4. ZHRNUTIE. Hodnoty týchto parametrov pre modely prenosových funkcií FZ a AB1 boli stanovené s ohľadom na čo najväčšiu zhodu predikovanej a nameranej MZK. Medzi ďalšie volené parametre patria $\sigma_{b,ult}$, POP , φ_{cv} , $E_{M,REF}$, ρ_{REF} , m , k_1 , $E_{M,b}$. Pre každý tento parameter je uvedené vysvetlenie jeho hodnoty v časti inverznej analýzy objektu pilóty D 4707 SO 210 s názvom 6.1.3. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE. Parameter POP je stanovený na základe výsledkov CPT skúšok rovnako ako v prípade objektu pilóty TP1. Hodnoty parametrov $E_{M,REF}$, ρ_{REF} , m , k_1 sú rovnaké s ohľadom na geologický profil takmer zhodný s predošlými analyzovanými objektmi, kde podložie taktiež tvoria majoritne súdržné jemnozrnné zeminy tried F5 – F8.

Všetky vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, resp. postupy výpočtu sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách 6.16 (hodnoty parametrov postupu podľa (Masopust, 1994)) a 6.17 (hodnoty parametrov metódy prenosových funkcií). V module Pilóta programu Geo5 pre postup podľa (Masopust, 1994) bolo zemné prostredie modelované rovnako ako v prípade objektu pilóty TP1. V prípade metódy prenosových funkcií bolo prostredie modelované taktiež ako dve vrstvy (tabuľka 6.17) a dĺžka pilóty bola modelovaná na 19 m. Priemer bol opäť v prístupe s prenosovými funkciami modelovaný ako vážený priemer pilóty na základe dĺžok vrtania s pažením a bez paženia, $d_s = 0.843$ m.

Zvyšné, samostatne nevysvetlené parametre boli volené na základe smerových normových charakteristík podľa ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988).

Tabuľka 6.16 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty TP2

Parameter	1. vrstva	2. vrstva
$Hlbka [m]$	0 - 9.5	9.5 - ...
$L [m]$	12 + 7 = 19	
$d_s [m]$	Premenný - 0.88 (s pažením) / 0.78 (bez paženia)	
$\gamma [kN/m^3]$	21	21
$\varphi_{ef} [^\circ]$	19	19
$c_{ef} [kPa]$	25	25
$\nu [-]$	0.4	0.4
$E_{def} [MPa]$	12	16
$\gamma_s [kN/m^3]$	21	21
$a [-]$	46	97
$b [-]$	20	108
$E_s [MPa]$	14.49	49.2
$e [-]$	-	988
$f [-]$	-	1084
$l_c [-]$	0.5	1

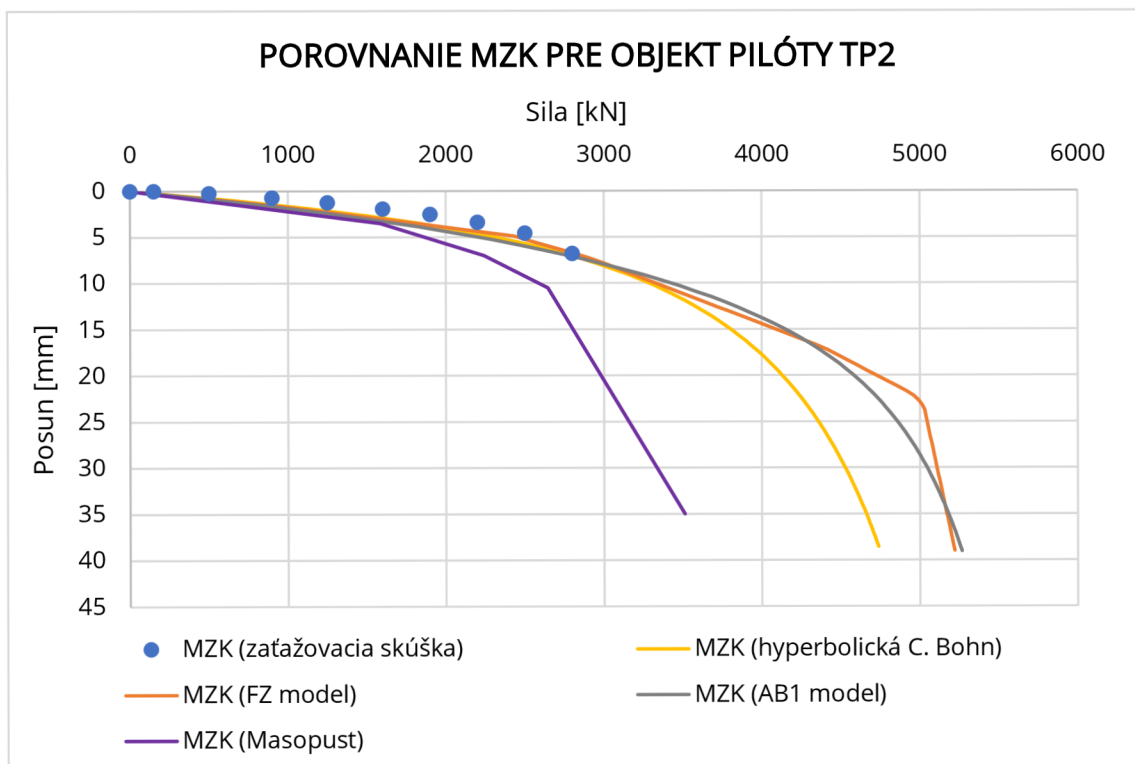
Tabuľka 6.17 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty TP2

Parameter	Hyperbolická prenosová funkcia (Bohn a kol., 2016)		Prenosová funkcia FZ modelu (Frank a kol., 1982)		Prenosová funkcia AB1 modelu (Abchir a kol., 2016)	
	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Vrstva	1.	2.	1.	2.	1.	2.
Hĺbka [m]	0 - 9.5	9.5 - 20	0 - 9.5	9.5 - 20	0 - 9.5	9.5 - 20
L [m]	19					
d_s [m]	0.843					
E_c [MPa]	30 500					
$\sigma_{b,ult}$ [kPa]	-	3 000	-	3 000	-	3 000
M_b [-]	-	0.03	-	0.03	-	0.03
M_s [-]	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038	0.0038
γ [kN/m ³]	21	21	21	21	21	21
γ_s [kN/m ³]	21	21	21	21	21	21
β_{av} [-] / POP [kPa]	0.27	1500	0.27	1500	0.27	1500
φ_{cv} [°]	-	27	-	27	-	27
α_b [-]	-	-	11	3.5	11	3.2
α_s [-]	-	-	1	0.9	1	0.9
$E_{M,REF}$ [kPa]	-	-	10 959	10 959	10 959	10 959
p_{REF} [kPa]	-	-	100	100	100	100
m [-]	-	-	1	1	1	1
k_1 [m]	-	-	0	0	0	0
$E_{M,b}$ [kPa]	-	-	-	27 287	-	27 287

6.4.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER

Štyri predikované MZK s využitím rôznych postupov sú znázornené v grafe 6.10. Cieľom bolo dosiahnutie maximálnej nožnej zhody predikovaných MZK metódy prenosových funkcií s nameranou MZK zo zaťažovacej skúšky. V tejto zaťažovacej skúške bolo uskutočnené zaťažovanie len do úrovne posunu hlavy pilóty 6.79 mm. Z dôvodu rovnakej lokality a geologických podmienok boli vstupné parametre rovnaké ako pre objekt pilóty TP1. MZK je možné teda považovať len za predikciu správania tejto pilóty, pričom v počiatočných fázach zaťažovania dosahovali všetky MZK dobrú zhodu.

MZK z postupu podľa (Masopust, 1994) sa mierne odchyľuje a vykazuje opäť konzervatívnejší prístup. MZK boli dosiahnuté pri vstupných parametroch uvedených v tabuľkách 6.16 pre postup podľa (Masopust, 1994) a 6.17 pre metódu prenosových funkcií.



Graf 6.10 Porovnanie MZK pre objekt pilóty TP2

6.5. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTY PRIEMERU 900 MM

6.5.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV

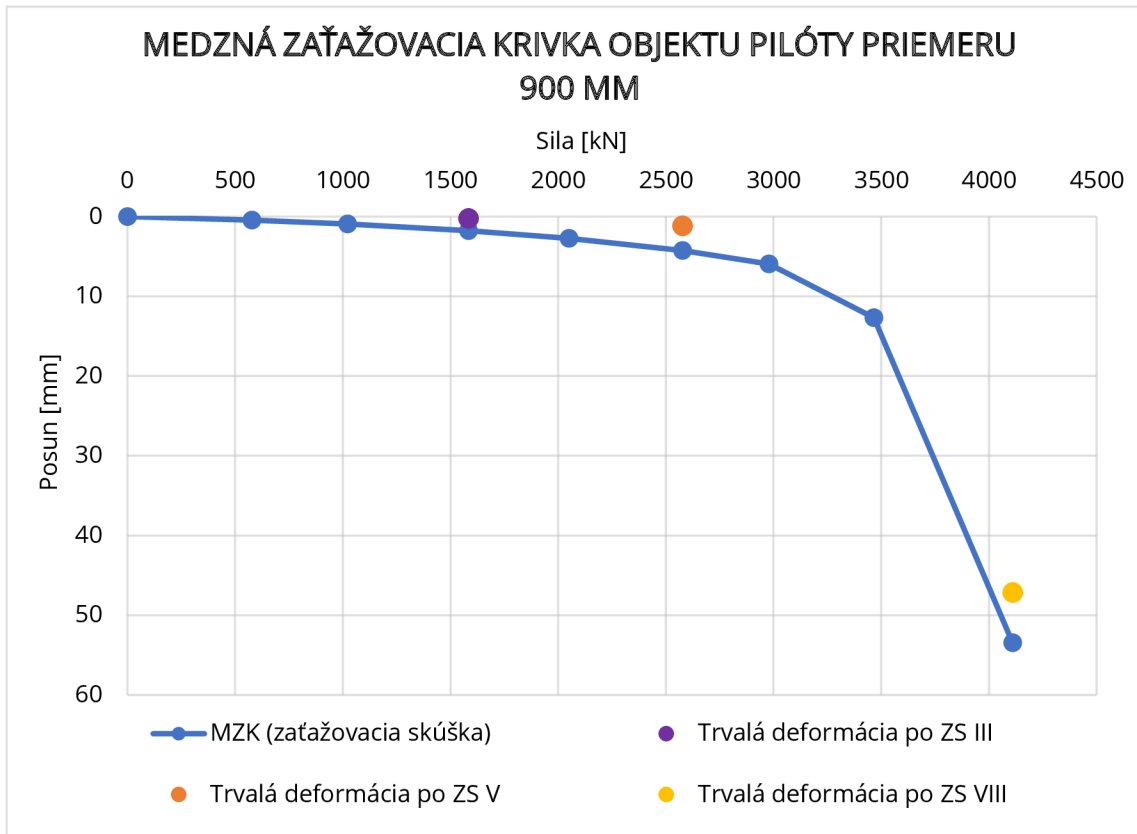
Informácie pre túto časť práce boli čerpané z predbežnej správy zaťažovacej skúšky (SKANSKA, 2006). Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vŕtanej pilóte priemeru 900 mm a celkovej dĺžky 21.5 m, z toho účinnej dĺžky 14.5 m z dôvodu separácie v hornej časti pilóty. Tento objekt bol navrhnutý ako základ pre mostný objekt. Pilóta bola vŕtaná s pažením a pre teleso pilóty bol použitý betón C25/30 s odolnosťou v agresívnom prostredí XA1.

Počas zaťažovacej skúšky boli do armokoša pilóty osadené strunové tenzometre v hĺbkach 1 m; 5 m; 6.8 m; 11.8 m; 16 m; 20 m a na päte pilóty v hĺbke 21.5 m bol umiestnený pätný lis pre stanovenie prenosu sily (všetky hĺbky sú uvedené od hlavy pilóty). Výsledky merania tenzometrami neboli v predbežnej správe dostupné, preto nebolo možné overiť prenos sily po dĺžke pilóty. Zaťažovacia sila bola vyvodená štyrmi hydraulickými lismi, ktorých reakcia bola prenesená ôsmimi zemnými kotvami. Maximálna skúšobná sila na pilótu bola v projekte predpísaná na 4830 kN. Meranie sily bolo uskutočnené pomocou tlaku v hydraulickej sústave a dynamometrov pod lismi. Meraný posun v hlave pilóty bol získaný prostredníctvom štyroch kusov indukčných metrov. Hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch sú uvedené v tabuľke 6.18. Zaťažovacia skúška bola ukončená po ôsmom zaťažovacom stave pri sile 4110 kN a neustálenom posune hlavy pilóty 53.46 mm.

Tabuľka 6.18 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty priemeru 900 mm

Zaťažovací stav	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Sila [kN]	578	1023	1584	2050	2578	2978	3466	4110

Na medznej zaťažovacej krivke bol zreteľný zlom, preto bola experimentálna únosnosť pilóty stanovená ako únosnosť na medzi zaborenia pri sile 3466 kN a ustálenom posune hlavy pilóty 12.68 mm. Z nameraných hodnôt posunu v hlave pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch bolo možné stanoviť medznú zaťažovaciu krivku, ktorá je zobrazená v grafe 6.11. Pričom body predstavujú posun v hlave pilóty po odľahčení.



Graf 6.11 MZK objektu pilóty priemeru 900 mm

Geologický profil je uvedený v tabuľke 6.19. Podzemná voda nebola priamo narazená. V hĺbke 3.5 m sa na základe popisu nachádzal zvodnený štrk hlinitý. Z tohto údaju bol predpokladaný výskyt hladiny podzemnej vody v hĺbke 3.5 m. Táto hodnota však zostáva ako predpoklad a jej presné určenie pre inverznú analýzu nebolo možné na základe údajov v predbežnej správe zaťažovacej skúšky (SKANSKA, 2006).

Tabuľka 6.19 Geologický profil objektu pilóty priemeru 900 mm

Hĺbka [m]	Vrstva	Klasifikácia
0.0 – 3.5	Navážka.	-
3.5 – 10.5	Štrk hlinitý zvodnený od 5.0 m štrk ílovitý.	G4 GM
10.5 – 17	Íl šedý, vápnitý, do 12.0 m tuhý, nižšie pevný.	F6 CI

6.5.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE

Metodika výpočtu bola, ako v predošlých prípadoch, založená na stanovení parametrov zeminy a pilóty na základe údajov z predbežnej správy zaťažovacej skúšky pilóty tak, aby čo najpresnejšie vystihovali skutočné podmienky. Empirické parametre tuhosti M_b , M_s , α_b a α_s boli určené obdobne ako v predošlých inverzných analýzach, so snahou dosiahnuť čo najväčšiu zhodu predikovanej a nameranej MZK. Ich konkrétna hodnota je uvedená v tabuľke 6.21. Medzi ďalšie volené parametre patria $\sigma_{b,ult}$, POP , φ_{cv} , $E_{M,REF}$, p_{REF} , m , k_1 , $E_{M,b}$. Pre každý tento parameter je uvedené vysvetlenie jeho hodnoty v časti inverznej analýzy objektu pilóty D 4707 SO 210 s názvom 6.1.3. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE. Hodnoty parametrov $E_{M,REF}$, p_{REF} , m , k_1 sú rovnaké s ohľadom na geologický profil okolia pilóty takmer zhodný s predošlými analyzovanými objektmi.

Všetky vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, resp. postupy výpočtu sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách 6.20 (hodnoty parametrov postupu podľa (Masopust, 1994)) a 6.21 (hodnoty parametrov metódy prenosových funkcií). V module Pilóta programu Geo5 pre postup podľa (Masopust, 1994) bolo zemné prostredie modelované v šiestich vrstvách aj z dôvodu separácie v hornej časti pilóty. Tá bola zohľadnená umiestnením hlavy pilóty do hĺbky 7 m pod terénom. V prístupe metódy prenosových funkcií bolo prostredie pre zjednodušenie modelované ako štyri vrstvy (tabuľka 6.21). Prvé tri v úrovni riešenia 1(M) a posledná v úrovni riešenia 2(A). Dĺžka pilóty bola modelovaná na 21.5 m s rešpektovaním separovanej časti pilóty. V separovanej časti boli hodnoty parametrov určené tak, aby predstavovali správanie separácie a neprispievali k únosnosti prostredníctvom mobilizovaného plášťového trenia.

Zvyšné, samostatne nevysvetlené parametre boli volené na základe smerových normových charakteristík podľa ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988).

Tabuľka 6.20 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty priemeru 900 mm

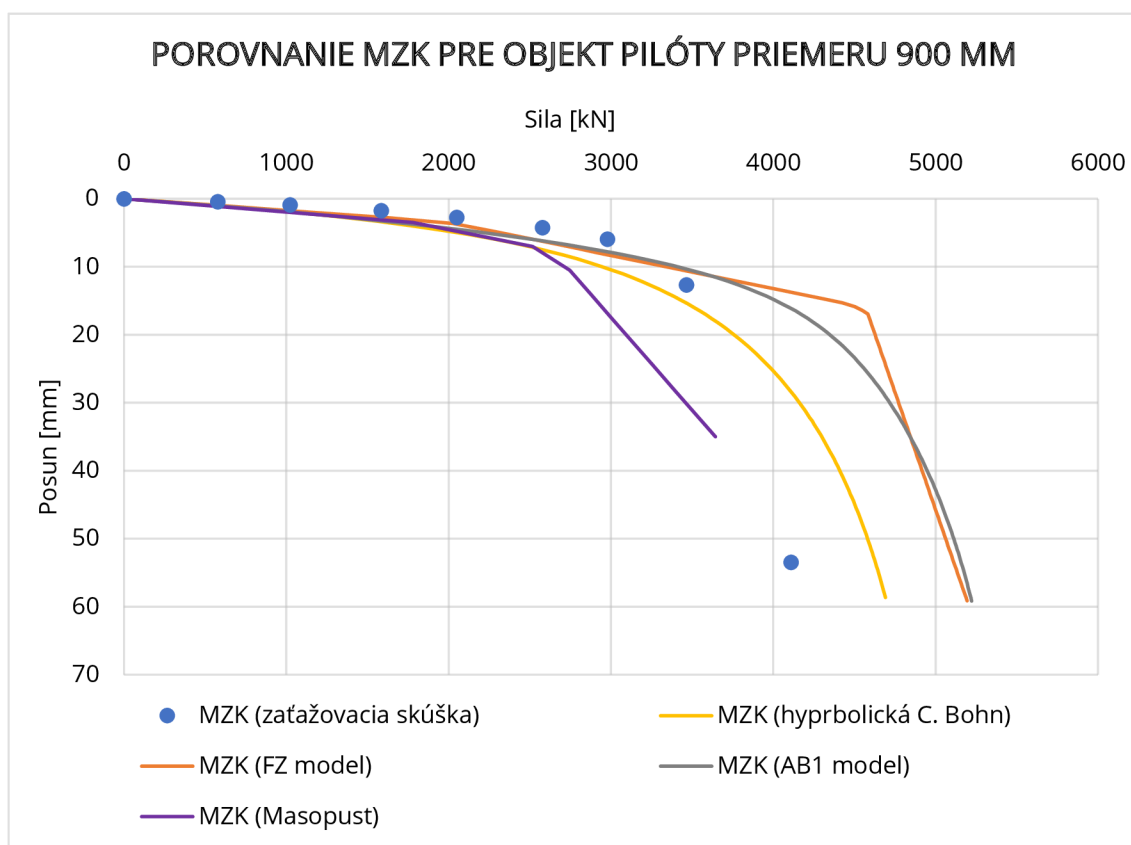
Parameter	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva	4. vrstva	5. vrstva	6. vrstva
Hĺbka [m]	0 - 3.5	3.5 - 5	5 - 7	7 - 7.5	7.5 - 12	12 - ...
L [m]	14.5					
d_s [m]	0.9					
γ [kN/m ³]	18	19	19.5	21	21	21
φ_{ef} [°]	26.5	32.5	30	19	19	19
c_{ef} [kPa]	12	4	6	25	25	25
ν [-]	0.35	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4
E_{def} [MPa]	6.5	70	50	16	16	16
γ_s [kN/m ³]	18	19	19.5	21	21	21
a [-]	46	46	46	91	71.5	97
b [-]	20	20	20	48	64	108
E_s [MPa]	8.35	13.86	16.01	37.31	34.2	49.55
e [-]	-	-	-	-	-	988
f [-]	-	-	-	-	-	1084
l_c [-]	0.5	0.5	0.5	0.75	0.75	1

Tabuľka 6.21 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty priemeru 900 mm

Para.	*platí len pre prenosové funkcie FZ a AB1 modelu		Hyperbolická prenosová funkcia (Bohn a kol., 2016)		Prenosová funkcia FZ modelu (Frank a kol., 1982)		Prenosová funkcia AB1 modelu (Abchir a kol., 2016)	
	1.	2.	3.	4.	3.	4.	3.	4.
Vrstva	1.	2.	3.	4.	3.	4.	3.	4.
Hĺbka [m]	0 - 3.5	3.5 - 7	7 - 7.5	7.5-24	7 - 7.5	7.5-24	7 - 7.5	7.5-24
L [m]	14.5							
d_s [m]	0.9							
E_c [MPa]	30 000							
$\sigma_{b,ult}$ [kPa]	-	-	-	3 000	-	3 000	-	3 000
M_b [-]	-	-	-	0.03	-	0.03	-	0.03
M_s [-]	0.1	0.1	0.005	0.0038	0.005	0.0038	0.005	0.0038
γ [kN/m ³]	21	20	20	21	20	21	20	21
γ_s [kN/m ³]	21	20	20	21	20	21	20	21
β_{av} [-] / POP [kPa]	0.001	0.001	0.3	750	0.3	750	0.3	750
φ_{cv} [°]	-	-	-	23	-	23	-	23
a_b [-]	-	-	-	-	-	3.5	-	3
a_s [-]	*2	*0.8	-	-	0.8	0.95	0.8	0.9
$E_{M,REF}$ [kPa]	*	*	-	-	30 000	10 959	30 000	10 959
ρ_{REF} [kPa]	*100	*100	-	-	100	100	100	100
m [-]	*0	*0	-	-	0	1	0	1
k_1 [m]	*0	*0	-	-	0	0	0	0
$E_{M,b}$ [kPa]	-	-	-	-	-	29 753	-	29 753

6.5.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER

Štyri predikované MZK s využitím rôznych postupov sú znázornené v grafe 6.12. Cieľom bolo dosiahnutie maximálnej možnej zhody predikovaných MZK metódy prenosových funkcií s nameranou MZK zo zaťažovacej skúšky. Najväčšiu zhodu v rámci posunu do 10 mm vykazujú MZK z prenosových funkcií modelu FZ a AB1. Hyperbolická prenosová funkcia je v tomto prípade o niečo konzervatívnejšia, ale zhoda v rámci určitej tolerancie pokračuje až do hodnôt posunu hlavy pilóty 15 až 20 mm. MZK z postupu podľa (Masopust, 1994) sa mierne odchyľuje a vykazuje opäť konzervatívnejší prístup. MZK boli dosiahnuté pri vstupných parametroch uvedených v tabuľkách 6.20 pre postup podľa (Masopust, 1994) a 6.21 pre metódu prenosových funkcií.



Graf 6.12 Porovnanie MZK pre objekt pilóty priemeru 900 mm

6.6. INVERZNÁ ANALÝZA OBJEKTU PILÓTY PRIEMERU 1300 MM

6.6.1. POPIS PILÓTY, ZAŤAŽOVACEJ SKÚŠKY A INŽINIERSKO – GEOLOGICKÝCH POMEROV

Informácie pre túto časť práce boli čerpané zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky. (DS Holding a.s., 2000) Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vŕtanej pilóte celkovej dĺžky 22.65 m, z toho účinnej dĺžky 21.65 m z dôvodu separácie v hornej časti pilóty. Priemer pilóty bol 1300 mm v časti vŕtanej s pažením a 1140 mm v časti vŕtanej bez paženia. Pri realizácii pilóty bola zapažená dĺžka 20 m a nezapažená dĺžka 2.65 m. Tento objekt bol navrhnutý ako základ pre mostný objekt rýchlostnej komunikácie R35 Olomouc – Lipník nad Bečvou. Pilóta bola vŕtaná s pažením a pre teleso pilóty bol použitý betón C16/20 konzistencie S3.

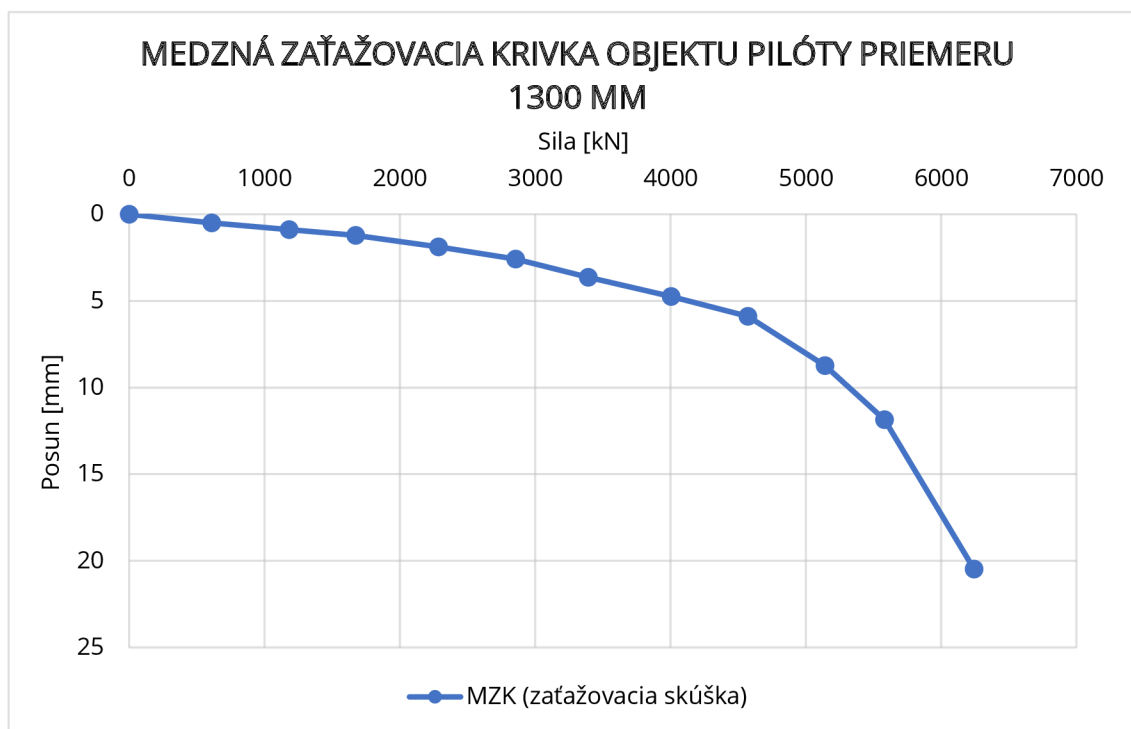
Počas tejto zaťažovacej skúšky neboli do armokoša pilóty osadené strunové tenzometre. Zaťažovacia sila bola vyvedená štyrmi hydraulickými lismi, ktorých reakcia bola prenesená ôsmimi zemnými kotvami. Predpokladané zvislé zaťaženie pilóty bolo uvažované približne 7000 kN. Meranie sily bolo uskutočnené pomocou tlaku v hydraulickej sústave, dynamometrov pod lismi a nepriamo meraním predĺženia zväzkov zemných kotiev. Meraný posun v hlave pilóty bol získaný prostredníctvom štyroch kusov indukčných metrov. Hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch sú uvedené v tabuľke 6.22. Zaťažovacia skúška bola ukončená po dvanástom zaťažovacom stave pri sile 6797 kN a posune hlavy pilóty 24.61 mm.

Tabuľka 6.22 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty priemeru 1300

mm

Zaťažovací stav	I	II	III	IV	V	VI	VII
Sila [kN]	610	1182	1673	2287	2856	3392	4004
Zaťažovací stav	VIII	IX	X	XI	XII	-	-
Sila [kN]	4573	5142	5581	6243	6797	-	-

K ukončeniu skúšky došlo po pretrhnutí lán jednej zo zemných kotiev, ku ktorému došlo v dôsledku vyčerpania únosnosti susedných kotiev. Únosnosť na medzi úmernosti pilóty bola na základe meraní odhadnutá na 4560 kN, pričom nebolo dosiahnutého ustáleného posunu pilóty 25 mm. Z nameraných hodnôt posunu v hlave pilóty v jednotlivých zaťažovacích stavoch bolo možné stanoviť medznú zaťažovaciu krivku, ktorá je zobrazená v grafe 6.13.



Graf 6.13 MZK objektu pilóty priemeru 1300 mm

Geologický profil je uvedený v tabuľke 6.23. Podzemná voda bola narazená v hĺbke 2 m s mierne napätou hladinou. Profil bol popísaný v troch vrstvách.

Tabuľka 6.23 Geologický profil objektu pilóty priemeru 1300 mm

Hĺbka [m]	Vrstva	Klasifikácia
0.0 – 2.0	Náplavové hliny.	F5 MI
2.0 – 7.5	Vlhké štrky a piesky zavodnené.	G1 GW / S1 SW
7.5 – 22.65	Neogénny íl, miestami s piesčitými preplastkami, konzistencia tuhá až pevná, hlbšie pevná.	F4 CS

6.6.2. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE

Metodika výpočtu bola, ako v predošlých prípadoch, založená na stanovení parametrov zeminy a pilóty na základe údajov z predbežnej správy zaťažovacej skúšky pilóty tak, aby čo najpresnejšie vystihovali skutočné podmienky. Empirické parametre tuhosti M_b , M_s , α_b a α_s boli určené obdobne ako v predošlých inverzných analýzach, so snahou dosiahnuť čo najväčšiu zhodu predikovanej a nameranej MZK. Ich konkrétna hodnota je uvedená v tabuľke 6.25. Medzi ďalšie volené parametre patria $\sigma_{b,ult}$, POP , φ_{cv} , $E_{M,REF}$, ρ_{REF} , m , k_1 , $E_{M,b}$. Pre každý tento parameter je uvedené vysvetlenie jeho hodnoty v časti inverznej analýzy objektu pilóty D 4707 SO 210 s názvom 6.1.3. METODIKA VÝPOČTU A VSTUPNÉ PARAMETRE. Hodnoty parametrov $E_{M,REF}$, ρ_{REF} , m , k_1 sú rovnaké s ohľadom na geologický profil okolia pilóty takmer zhodný s predošlými analyzovanými objektmi.

Všetky vstupné parametre pre jednotlivé prenosové funkcie, resp. postupy výpočtu sú uvedené v nasledujúcich tabuľkách 6.24 (hodnoty parametrov postupu podľa (Masopust, 1994)) a 6.25 (hodnoty parametrov metódy prenosových funkcií). V module Pilóta programu Geo5 pre postup podľa (Masopust, 1994) bolo zemné prostredie modelované v troch vrstvách. Separácia bola zohľadnená umiestnením hlavy pilóty do hĺbky 1 m pod terén. V prístupe metódy prenosových funkcií bolo prostredie kvôli separácii modelované ako štyri vrstvy (tabuľka 6.21). Prvé tri v úrovni riešenia 1(M) a posledná v úrovni riešenia 2(A). Dĺžka pilóty bola v tomto prípade modelovaná na 22.65 m s rešpektovaním separovanej časti pilóty. V separovanej časti boli určené hodnoty parametrov tak, aby predstavovali správanie separácie a neprispievali k únosnosti prostredníctvom mobilizovaného plášťového trenia. Priemer bol v prístupe s prenosovými funkciami modelovaný ako vážený priemer pilóty na základe dĺžok vrtania s pažením a bez paženia, $d_s = 1.28$ m. Zvyšné, samostatne nevysvetlené parametre boli volené na základe smerových normových charakteristík podľa ČSN 73 1001 (ČSN 73 1001, 1988).

Tabuľka 6.24 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty priemeru 1300 mm

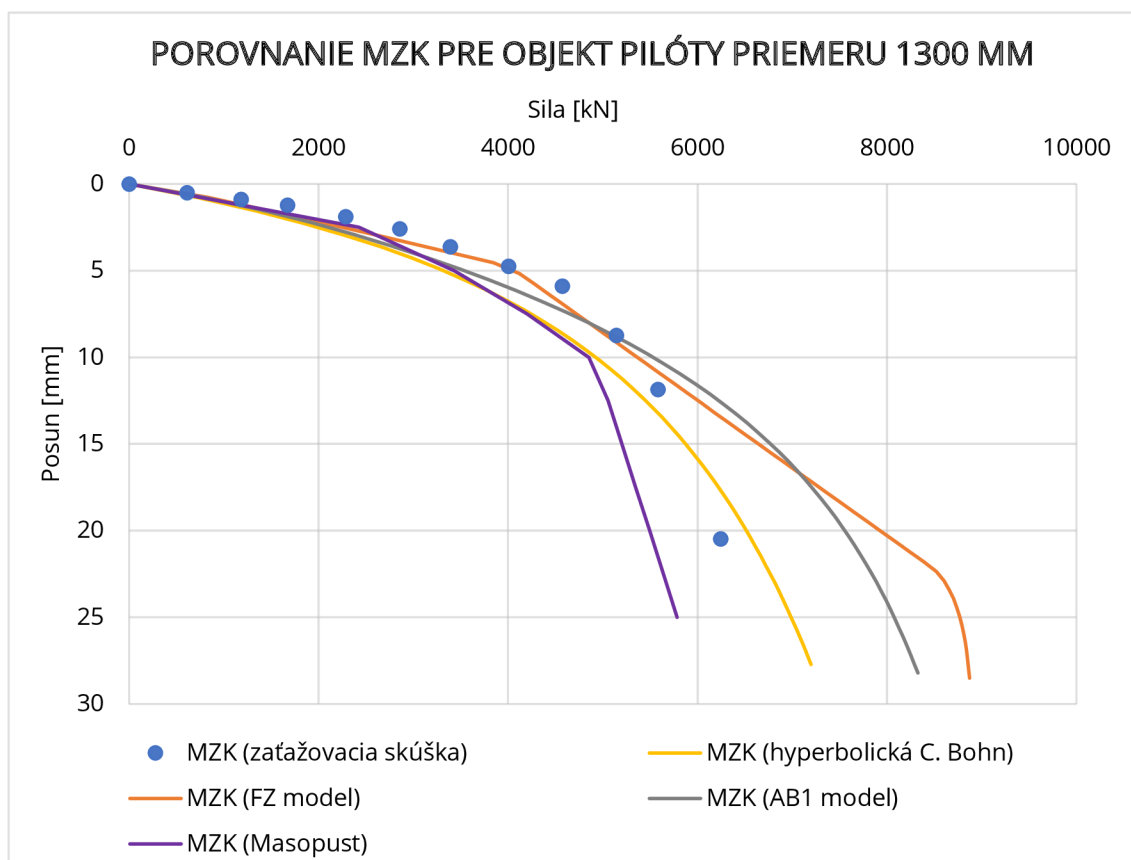
Parameter	1. vrstva	2. vrstva	3. vrstva
Hĺbka [m]	0 - 2	2 - 7	7 - ...
L [m]	20 + 2.65 = 22.65		
d_s [m]	Premenný – 1.3 (s pažením) / 1.14 (bez paženia)		
γ [kN/m ³]	20	18.5	21
φ_{ef} [°]	21	27	19
c_{ef} [kPa]	12	8	25
ν [-]	0.4	0.35	0.4
E_{def} [MPa]	4	8	16
γ_s [kN/m ³]	20	18.5	21
a [-]	46	62	86.8
b [-]	20	16	90.4
E_s [MPa]	8.32	33.36	48.62
e [-]	-	-	830
f [-]	-	-	897.2
l_c [-]	0.5	0.5	0.9

Tabuľka 6.25 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty priemeru 1300 mm

Para.	*platí len pre prenosové funkcie FZ a AB1 modelu		Hyperbolická prenosová funkcia (Bohn a kol., 2016)		Prenosová funkcia FZ modelu (Frank a kol., 1982)		Prenosová funkcia AB1 modelu (Abchir a kol., 2016)	
	1.	2.	3.	4.	3.	4.	3.	4.
Vrstva	1.	2.	3.	4.	3.	4.	3.	4.
Hĺbka [m]	0 - 1	1 - 2	2 - 7.5	7.5-24	2 - 7.5	7.5-24	2 - 7.5	7.5-24
L [m]	22.65							
d_s [m]	1.28							
E_c [MPa]	29 000							
$\sigma_{b,ult}$ [kPa]	-	-	-	3 000	-	3 000	-	3 000
M_b [-]	-	-	-	0.03	-	0.03	-	0.03
M_s [-]	0.1	0.005	0.005	0.0038	0.005	0.0038	0.005	0.0038
γ [kN/m ³]	21	21	20	21	20	21	20	21
γ_s [kN/m ³]	21	21	20	21	20	21	20	21
β_{av} [-] / POP [kPa]	0.001	0.37	0.3	750	0.3	750	0.3	750
φ_{cv} [°]	-	-	-	27	-	27	-	27
a_b [-]	-	-	-	-	-	3.5	-	3
a_s [-]	*2	*2	-	-	0.8	1	0.8	1
$E_{M,REF}$ [kPa]	*	*	-	-	30 000	10 959	30 000	10 959
ρ_{REF} [kPa]	*100	*100	-	-	100	100	100	100
m [-]	*0	*0	-	-	0	1	0	1
k_1 [m]	*0	*0	-	-	0	0	0	0
$E_{M,b}$ [kPa]	-	-	-	-	-	29 495	-	29 495

6.6.3. VÝSLEDKY INVERZNEJ ANALÝZY A ČIASTKOVÝ ZÁVER

Štyri predikované MZK s využitím rôznych postupov sú znázornené v grafe 6.14. Cieľom bolo dosiahnutie maximálnej možnej zhody predikovaných MZK metódy prenosových funkcií s nameranou MZK zo zaťažovacej skúšky. Najväčšiu zhodu v rámci posunu do 10 mm vykazujú MZK z prenosových funkcií modelu FZ a AB1. Hyperbolická prenosová funkcia je v tomto prípade o niečo konzervatívnejšia, ale zhoda v rámci určitej tolerancie pokračuje až do hodnôt posunu hlavy pilóty 15 až 25 mm. Posudzovaná je však najmä oblasť do posunu hlavy pilóty približne 10 mm, preto je zhoda s MZK FZ a AB1 modelu vyššia. Všetky predikované MZK prostredníctvom metódy prenosových funkcií teda vykazujú dobrú zhodu, rozdiely sú v rámci niekoľkých milimetrov. MZK z postupu podľa (Masopust, 1994) je opäť mierne konzervatívnejšia. MZK boli dosiahnuté pri vstupných parametroch uvedených v tabuľkách 6.24 pre postup podľa (Masopust, 1994) a 6.25 pre metódu prenosových funkcií.



Graf 6.14 Porovnanie MZK pre objekt pilóty priemeru 1300 mm

7. ZHRNUTIE A VYHODNOTENIE VSTUPNÝCH HODNÔT DO METÓDY PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ

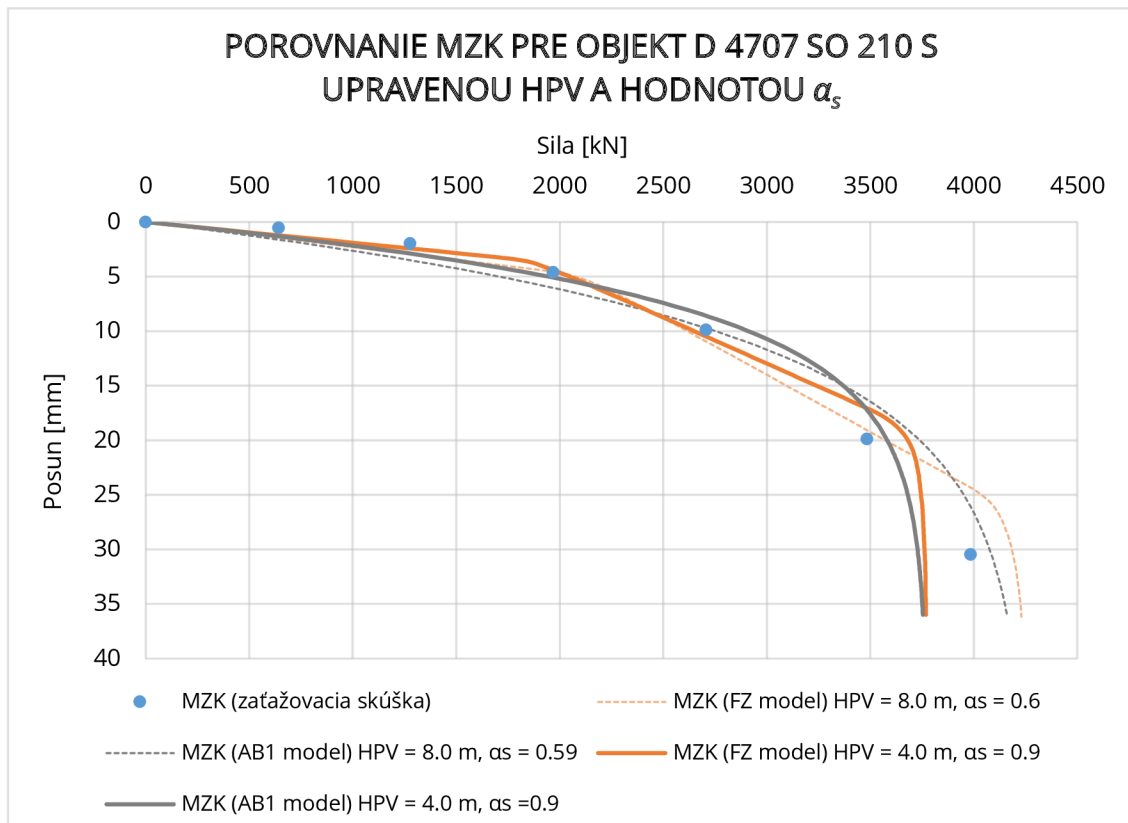
Pre každú inverznú analýzu boli zvolené vstupné parametre tak, aby zhoda v porovnaní s nameranou MZK bola čo najväčšia. V tejto časti práce budú analyzované empirické parametre tuhosti prenosových funkcií α_b a α_s , ktoré vytvárajú aj najväčšiu neistotu, keďže ich hodnota je určovaná empiricky a kompenzujú mechanizmus, ktorý nie je vo vzťahoch zahrnutý. Vstupom do počítačovej tuhosti, ale aj do priebehu tuhosti je v prípade modelov FZ a AB1 aj referenčný Ménardov presiometrický modul, ktorému je venovaná časť práce s názvom 4. VYHODNOTENIE PRESIOMETRICKÝCH MODULOV, kde bol stanovený pre triedy súdržných jemnozrnných zemín F5 – F8 na hodnotu 10 959 kPa, pre triedy súdržných jemnozrnných zemín F1 – F4 na hodnotu 11 776 kPa a pre horniny R4 – R6 na hodnotu 10 288 kPa. Tieto referenčné hodnoty presiometrických modulov E_M boli stanovené regresnou analýzou. Vstupné empirické parametre do tvarov prenosových funkcií modelov FZ a AB1 α_b a α_s vychádzali z hodnôt odporúčaných. Prvé odporúčanie k voľbe týchto hodnôt bolo publikované v (Frank a kol., 1982), ktorí odporúčali hodnoty pre súdržné zeminy nasledovne: $\alpha_b = 11$ pre päť a $\alpha_s = 2$ pre plášť. Tvaru prenosovej funkcie modelu AB1 sa venoval materiál od (Abchir a kol., 2016) a odporúčal hodnoty pre íl takto: $\alpha_b = 11$ pre päť a $\alpha_s = 1$ pre plášť. Dosiagnuté vstupné parametre inverznou analýzou pre jednotlivé zaťažovacie skúšky a prenosové funkcie zostavené na základe výsledkov presiometrických skúšok sú uvedené v tabuľke 7.1.

Tabuľka 7.1 Hodnoty vstupných parametrov tvarov prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok vychádzajúce z inverzných analýz tejto práce

Objekt	Prenosová funkcia FZ modelu		Prenosová funkcia AB1 modelu	
	α_b	α_s	α_b	α_s
D 4707 SO 210	-	0.6	-	0.59
D 4704 SO 225	-	0.95	-	0.9
TP1	3.5	0.9	3.2	0.9
TP2	3.5	0.9	3.2	0.9
900 mm	3.5	0.95	3	0.9
1300 mm	3.5	1	3	1

V prípade objektov D 4707 SO 210 a D 4704 SO 225 bol zvolený odporúčaný parameter $\alpha_b = 11$, ten však nemal na výslednú MZK vplyv, keďže bola päta vynechaná z príspevku k únosnosti. Päta pilót bola totiž priradená veľmi malá tuhosť podľa vzťahov 2.13 a 2.15 prostredníctvom veľmi malej hodnoty presiometrického modulu v päte $E_{M,b} = 0.1$ kPa.

Parameter α_s pre FZ model sa vo väčšine prípadov pohybuje v hodnotách od 0.9 až 1. Tieto hodnoty sú bližšie hodnote 1 oproti odporúčanej hodnote 2 podľa (Frank a kol., 1982), čo svedčí o tom, že α_s dosiahnutý inverznými analýzami ako empirický parameter výrazne menej kompenzuje mechanizmus, ktorý nie je vo vzťahoch zahrnutý (v tomto prípade nereálny tvar prenosovej funkcie modelu FZ alebo závislosť tuhosti na hĺbke). Pre objekt D 4707 SO 210 dosahuje parameter α_s nižšiu hodnotu, čo je pravdepodobne spôsobené neistotou v polohe hladiny podzemnej vody, ktorá vyplýva zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky (SKANSKA, 2005). Tuhosť prenosovej funkcie tzn. rýchlosť mobilizácie plášťového trenia je priamo úmerná parametru α_s a je taktiež závislá na medznom plášťovom trení $\tau_{s,ult.}$. Preto vedie nereálne zníženie HPV k predikcii vyššieho efektívneho geostatického napätia σ'_{or} a teda vyššej nereálnej hodnote plášťového trenia. Táto nepresnosť je v inverznej analýze kompenzovaná poklesom parametra α_s na už spomínanú hodnotu 0.6. Pre ilustráciu bola pre objekt D 4707 SO 210 namodelovaná HPV v úrovni 4 m (namiesto predošlých 8 m) pod hlavou pilóty a bola sledovaná hodnota α_s pre tento prípad. Najlepšiu zhodu MZK dosahovali modely FZ a AB1 pri hodnote $\alpha_s = 0.9$, čo zodpovedá hodnotám α_s získaným pre ostatné analyzované objekty pilót. Týmto je dokázané, že HPV skutočne značne ovplyvňuje hodnotu α_s prostredníctvom medzného plášťového trenia. Pre oba modely totiž platí, že so zvyšujúcou hodnotou α_s sa zvyšuje aj hodnota mobilizovaného plášťového trenia podľa vzťahov 2.13 pre FZ model a 2.14 pre AB1 model. MZK získaná pre HPV v hĺbke 4 m pod hlavou pilóty a $\alpha_s = 0.9$ objektu D 4707 SO 210 je zobrazená v grafe 7.1. Zreteľná je pomerne dobrá zhoda predikovaných MZK s nameranou MZK v rozmedzí posunu hlavy pilóty 0 až 15 mm.



Graf 7.1 MZK pre objekt D 4707 SO 210 s upravenou HPV a hodnotou α_s pre zdôvodnenie pôvodnej odchýlenej hodnoty α_s od ostatných analyzovaných objektov pilót

7.1. KRIVKY PRIEBEHU TUHOSŤI V ZÁVISLOSTI NA NORMOVANOM POSUNE PRE PLÁŠŤ

V tejto časti nasleduje zdôvodnenie dvojnásobne nižšej hodnoty parametra α_s získaného v inverzných zaťažovacích skúškach oproti odporúčanej hodnote tohto parametra podľa (Frank a kol., 1982). Tento rozdiel vzniká pre prenosové funkcie modelu FZ, naopak pre prenosové funkcie modelu AB1 je získaná hodnota α_s v porovnaní s odporúčanou hodnotou podľa (Abchir a kol., 2016) takmer totožná. V tabuľke 7.2 sú uvedené hodnoty parametra α_s získaného (bez hodnoty z inverznej analýzy objektu D 4707 SO 210 z dôvodu zrejmej neistoty úrovne HPV) a odporúčaného.

Tabuľka 7.2 Hodnoty parametra α_s získaného inverznou analýzou a odporúčaného pre plášť

	Prenosová funkcia FZ modelu	Prenosová funkcia AB1 modelu
Priemerná hodnota α_s získaná inverznými analýzami	0.94	0.92
Odporúčaná hodnota α_s	2	1

Zdôvodnenie nižšej získanej hodnoty parametra α_s je uvedené zobrazením priebehov tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na normovanom posune v grafe 7.2. Tuhosť je v podstate smernica prenosovej funkcie, ktorá nám udáva hodnotu mobilizovaného plášťového trenia na každý milimeter relatívneho posunu pilóta – zemina. Na vodorovnej osi je teda normovaný posun k priemeru pilóty a na zvislej osi je hodnota tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie. V tomto grafe sú krivky, ktoré možno rozdeliť do troch skupín:

- Vytvorené na základe odporúčaných hodnôt autorov prenosových funkcií. Medzi tieto patria krivky prenosových funkcií „C. Bohn – hyperbolická“ podľa (Bohn a kol., 2016), „Model pružného polopriestoru“ podľa (Randolph a kol., 1978), „Model lineárne elastický – perfektne plastický“ podľa (Randolph a kol., 1978), krivka FZ modelu so vstupnými hodnotami podľa (Frank a kol., 1982) a krivka AB1 modelu so vstupnými hodnotami podľa (Abchir a kol., 2016).
- Vytvorené na základe výpočtov iných autorov. Do tejto skupiny patrí krivka „(Briaud a kol., 1983) razená pilóta FZ model“. Autor v uvedenej správe vysvetľuje sériu príkladov, pre detailný popis krokov tzv. presiometrickej návrhovej metódy („Pressuremeter Design Method“) pre hĺbkové základy s vertikálnym zaťažením. Táto metóda využíva prenosové funkcie odvodené z výsledkov presiometrických skúšok, a to konkrétne FZ model (Frank a kol., 1982).
- Vytvorené na základe inverznej analýzy zaťažovacích skúšok v tejto práci. Vstupné parametre boli volené podľa výsledkov inverznej analýzy. Do tejto skupiny patria krivka modelu FZ so vstupnými hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce a krivka modelu AB1 so vstupnými hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce.

Jednotlivé krivky grafu pre plášť a ich závislosť medzi tuhosťou resp. smernicou prenosovej funkcie a normovaným posunom k priemeru pilóty sú popísané nižšie vrátane ich vstupov, vzťahov a zdrojov. Normovaný posun bol počítaný ako pomer relatívneho posunu pilóta – zemina s_s a priemeru pilóty d_s podľa vzťahu 7.1.

$$\text{normovaný posun} = \frac{s_s}{d_s} \quad (7.1)$$

- **Krivka C. Bohn – hyperbolická.** Priebeh tejto krivky vychádzal z tvaru hyperbolickej prenosovej funkcie pre plášť a jej vzťahov. Hyperbolický tvar prenosovej funkcie definovali (Bohn a kol., 2016). Podľa definície bola zostavená aj táto krivka. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na relatívnom posune pilóta – zemina zostavená podľa vzťahu 7.2. Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.3.

$$\frac{d\tau_s}{ds_s} = \frac{\tau_{s,ult}}{M_s * d_s + s_s} - \frac{\tau_{s,ult} * s_s}{(M_s * d_s + s_s)^2} \quad (7.2)$$

Tabuľka 7.3 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre hyperbolickú prenosovú funkciu plášťa

Parameter	Hodnota
Medzné plášťové trenie $\tau_{s,ult}$	100 kPa
Parameter počiatočnej tuhosti na plášti M_s	0.0038 odporúčaná podľa (Bohn a kol., 2016)
Priemer pilóty d_s	900 mm
Relatívny posun pilóta – zemina s_s	Premenný od 0 mm

- **(Briaud a kol., 1983) razená pilóta FZ model.** Priebeh tejto krivky vychádzal z prenosovej funkcie plášťa odvodenej z výsledkov presiometrických skúšok pre plášť a to konkrétne z FZ modelu a jeho vzťahov. Tvar tejto prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 2.3 ako trilineárna krivka. Tvar definovali z výsledkov presiometrických skúšok (Frank a kol., 1982).

Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na relatívnom posune pilóta – zemina stanovená podľa vzťahov 7.4. Vzťahy vychádzajú z vysvetľovaného príkladu tzv. presiometrickej návrhovej metódy pre razenú pilótu s priemerom 304.8 mm (1 ft) v ílovitej zemine (strana 41 v (Briaud a kol., 1983)). Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.5.

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_s}{ds_s} = k_s &= \frac{\alpha_s * E_M}{d_s} & \tau_s &\leq \frac{\tau_{s,ult}}{2} \\ \frac{d\tau_s}{ds_s} &= \frac{k_s}{5} & \frac{\tau_{s,ult}}{2} &< \tau_s \leq \tau_{s,ult} \\ \frac{d\tau_s}{ds_s} &= 0 & \tau_s &= \tau_{s,ult} \end{aligned} \quad (7.3)$$

$$\tau_s = \frac{s_s + 2 * \tau_{s,ult} * r}{5 * r}$$

$$r = \frac{0.5}{\alpha_s + 0.5 * E_M}$$

Tabuľka 7.4 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre plášť razenej pilóty podľa vysvetleného príkladu s použitím prenosovej funkcie modelu FZ odvodenej z výsledkov presiometrických skúšok

Parameter	Hodnota
Medzné plášťové trenie $\tau_{s,ult}$	40 kPa (stanovené v (Briaud a kol., 1983))
α_s	2.5 (stanovené v (Briaud a kol., 1983))
E_M	4000 kPa (stanovené v (Briaud a kol., 1983))
d_s	304.8 mm (1 ft)
Relatívny posun pilóta – zemina s_s	Premenný od 0 mm

- **Krivka modelu pružného polopriestoru.** Priebeh tejto krivky vychádzal z predpokladu pružného polopriestoru podľa (Randolph a kol., 1978). Priebeh tuhosti pre plášť v závislosti na relatívnom posune pilóta – zemina bol vytvorený podľa vzťahov 7.6. V tomto prípade je tuhosť konštantná pre všetky relatívne posuny. Hodnota teda nie je závislá na relatívnom posune ako vstupe a nadobúda pre tento prípad pilóty hodnotu 24.87 kPa/mm. Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.7.

$$\frac{d\tau_s}{ds_s} = \frac{2 * d_s * G_s}{(1-\nu) * \pi * \left(\frac{d_s}{2}\right)^2} \quad (7.4)$$

$$G_s = \frac{E_{oed}}{2 * (1+\nu)}$$

Tabuľka 7.5 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre model pružného polopriestoru (plášť)

Parameter	Hodnota
E_{oed}	16 000 kPa
ν (Poissonovo číslo zeminy)	0.3
d_s	900 mm

- Krivka modelu lineárne elastického – perfektne plastického.** Priebeh tejto krivky vychádzal z lineárne elastického chovania zeminy doplneného perfektne plastickým segmentom. Pre plášť autori vychádzali z rovnice rovnováhy elementu v zvislom smere v rotačno-symetrickej úlohe, kde G_s je šmykový modul zeminy v okolí plášťa a r_m je polomer zóny ovplyvnenej sadaním pilóty, za ktorou sa už neprejavuje zvislá deformácia zemného prostredia v dôsledku zaťažovania. r_m nie je konštantný s hĺbkou, pre jeho hodnotu bol odvodený vzťah uvedený v rovniciach 7.7, kde L je dĺžka pilóty a ν je Poissonovo číslo zeminy. Hodnota plášťového trenia τ_s pre jednotlivé relatívne posuny bola vypočítaná dosadením príslušnej hodnoty posunu do vzťahov pre zmenu tuhosti. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na relatívnom posune pilóta – zemina vytvorená podľa vzťahov 7.7. Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.8. Priebeh tuhosti dosahuje hodnotu 3.36 kPa/mm až po dosiahnutie medzného plášťového trenia $\tau_{s,ult}$, ďalej je už tuhosť nulová.

$$\frac{d\tau_s}{ds_s} = \frac{G_s}{\frac{d_s}{2} * \ln\left(\frac{r_m}{d_s/2}\right)} \quad \tau_s < \tau_{s,ult}$$

$$\frac{d\tau_s}{ds_s} = 0 \quad \tau_s = \tau_{s,ult} \quad (7.5)$$

$$r_m = 2.5 * L * (1-\nu)$$

$$G_s = \frac{E_{oed}}{2 * (1+\nu)}$$

Tabuľka 7.6 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre model lineárne elastický - perfektne plastický (plášť)

Parameter	Hodnota
E_{oed}	16 000 kPa
L	15 m
ν (Poissonovo číslo zeminy)	0.3
d_s	900 mm

- Krivky modelu FZ so vstupnými hodnotami podľa (Frank a kol., 1982) a so vstupnými hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce. Priebeh týchto kriviek vychádzal z prenosovej funkcie plášťa odvodenej z výsledkov presiometrických skúšok a to konkrétne z FZ modelu a jeho vzťahov (Frank a kol., 1982). Tvar tejto prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 2.3 ako trilineárna krivka. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na relatívnom posune pilóta - zemina stanovená podľa vzťahov 7.8 (Frank a kol., 1982). Vstupné parametre s hodnotami podľa (Frank a kol., 1982) a s hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce sú uvedené v tabuľke 7.9. Hodnota plášťového trenia τ_s pre jednotlivé relatívne posuny bola vypočítaná dosadením príslušnej hodnoty relatívneho posunu do vzťahov pre zmenu tuhosti. Hodnota presiometrického modulu je jednotná pre obe krivky a dopočítaná pre hĺbku 10 m s ostatnými parametrami získanými v inverznej analýze práce ($k_1 = 0$, $m = 1$) podľa vzťahu 4.1 na hodnotu 16 438 kPa z referenčnej hodnoty $E_{M,REF} = 10\,959$ kPa pre skupinu zemín F5 - F8.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\tau_s}{ds_s} &= k_s = \frac{\alpha_s * E_M}{d_s} & \tau_s &\leq \frac{\tau_{s,ult}}{2} \\
 \frac{d\tau_s}{ds_s} &= \frac{k_s}{5} & \frac{\tau_{s,ult}}{2} &< \tau_s \leq \tau_{s,ult} \\
 \frac{d\tau_s}{ds_s} &= 0 & \tau_s &= \tau_{s,ult}
 \end{aligned}
 \tag{7.6}$$

Tabuľka 7.7 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre prenosovú funkciu plášťa odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ

Parameter	Hodnota podľa (Frank a kol., 1982)	Hodnota podľa inverznej analýzy práce
Medzné plášťové trenie $T_{s,ult}$	100 kPa	100 kPa
α_s	2	0.94
E_M	16 438 kPa	16 438 kPa
d_s	900 mm	900 mm
Relatívny posun pilóta – zemina s_s	Premenný od 0 mm	

- Krivky modelu AB1 so vstupnými hodnotami podľa (Abchir a kol., 2016) a so vstupnými hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce. Priebeh týchto kriviek vychádzal taktiež z prenosovej funkcie plášťa odvodenej z výsledkov presiometrických skúšok, a to konkrétne z nelineárneho elastického AB1 modelu a jeho vzťahov (Abchir a kol., 2016). Tvar tejto prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 2.5. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na relatívnom posune pilóta – zemina stanovená podľa vzťahov 7.9 (Abchir a kol., 2016). Vstupné parametre s hodnotami podľa (Abchir a kol., 2016) a s hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce sú uvedené v tabuľke 7.10. Hodnota presiometrického modulu je jednotná pre obe krivky a dopočítaná pre hĺbku 10 m s ostatnými parametrami získanými v inverznej analýze práce ($k_1 = 0$, $m = 1$) podľa vzťahu 4.1 na hodnotu 16 438 kPa z referenčnej hodnoty $E_{M,REF} = 10 959$ kPa pre skupinu zemín F5 – F8.

$$\frac{d\tau_s}{ds_s} = \frac{\tau_{s,ult} - \tau_s}{\lambda_s}$$

$$\lambda_s = \frac{\tau_{s,ult} * d_s}{\alpha_s * E_M} \quad (7.7)$$

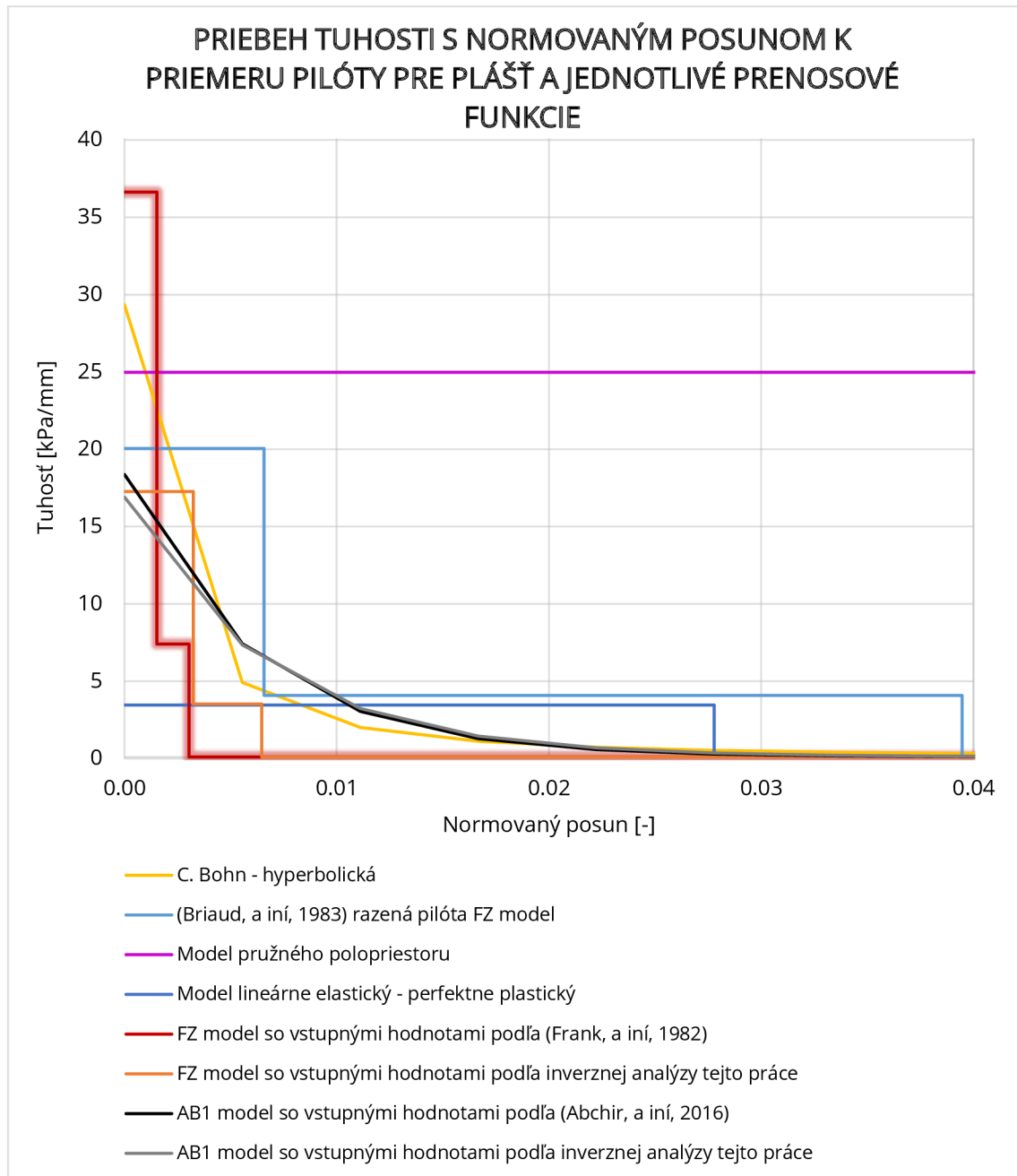
$$\tau_s(s_s) = \tau_{s,ult} * (1 - e^{-s_s/\lambda_s})$$

Tabuľka 7.8 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre prenosovú funkciu plášťa odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu AB1

Parameter	Hodnota podľa (Frank a kol., 1982)	Hodnota podľa inverznej analýzy práce
Medzné plášťové trenie $T_{s,ult}$	100 kPa	100 kPa
α_s	1	0.92
E_M	16 438 kPa	16 438 kPa
d_s	900 mm	900 mm
Relatívny posun pilóta – zemina s_s	Premenný od 0 mm	

Všetky uvedené krivky sú zobrazené v grafe 7.2 ako zdôvodnenie nižšej hodnoty parametra α_s pre FZ model získanej inverznými analýzami v tejto práci podľa tabuľky 7.2. Z grafu je evidentné, že prenosová funkcia FZ modelu so vstupnou hodnotou parametra podľa (Frank a kol., 1982), kde $\alpha_s = 2$ v porovnaní s prenosovou funkciou so vstupnou hodnotou parametra získanou z inverzných analýz tejto práce, kde $\alpha_s = 0.94$ a ostatnými prenosovými funkciami vedie k vysokej počiatkovej tuhosti. Priebeh krivky vychádzajúcej z prenosovej funkcie modelu FZ s použitím hodnoty parametra $\alpha_s = 0.94$ (oranžová krivka) podľa inverznej analýzy tejto práce je príbuznejší ostatným krivkám v porovnaní s priebehom krivky vychádzajúcej z prenosovej funkcie FZ modelu s použitím odporúčanej hodnoty parametra $\alpha_s = 2$ (bordová zvýraznená krivka) podľa (Frank a kol., 1982). Je možné predpokladať, že nižšia hodnota parametra α_s bola získaná z dôvodu zavedenia závislosti tuhosti na geostatickom napätí v hodnote E_M v kombinácii s reálnym tvarom prenosovej funkcie. Závislosť bola zavedená v rámci tejto práce a vedie k zníženiu empirického parametra v prípade prenosovej funkcie modelu FZ. Hodnota empirického parametra sa priblížila hodnote 1, čo naznačuje, že zavedená závislosť vedie k eliminácii potreby použitia empirického parametra. Z tohto vyplýva, že hodnota α_s získaná inverznými analýzami zaťažovacích skúšok v tejto práci a z nej vychádzajúca prenosová funkcia modelu FZ pre plášť je opodstatnená.

Získané hodnoty α_s z inverzných analýz tejto práce platia teda podľa tabuľky 7.2. V prípade prenosovej funkcie modelu AB1 pre plášť boli počiatkové tuhosti porovnateľné s ostatnými prenosovými funkciami. Rozdiel empirického parametra α_s získaného z inverznej analýzy a odporúčaného podľa (Abchir a kol., 2016) je minimálny a pravdepodobne spôsobený jeho subjektívnou voľbou v inverzných analýzach pre dosiahnutie najväčšej zhody medzných zaťažovacích kriviek.



Graf 7.2 Priebeh tuhosti s normovaným posunom k priemeru pilóty pre plášť a jednotlivé prenosové

7.2. KRIVKY PRIEBEHU TUHOSTI V ZÁVISLOSTI NA NORMOVANOM POSUNE PRE PÄTU

Nasleduje zdôvodnenie približne trojnásobne nižšej hodnoty parametra α_b pre inverzné zaťažovacie skúšky oproti hodnote tohto parametra odporúčanej podľa (Frank a kol., 1982) a (Abchir a kol., 2016). Tento rozdiel vzniká pre prenosové funkcie modelu FZ aj AB1. V tabuľke 7.11 sú uvedené hodnoty parametra α_b odporúčaného a získaného (bez uvažovania hodnoty z inverznej analýzy objektu D 4707 SO 210 z dôvodu zrejmej neistoty úrovne HPV).

Tabuľka 7.9 Hodnoty parametra α_b získaného inverznou analýzou a odporúčaného pre pätu

	Prenosová funkcia FZ modelu	Prenosová funkcia AB1 modelu
Priemerná hodnota α_b získaná inverznými analýzami	3.5	3.1
Odporúčaná hodnota α_b	11	11

Zdôvodnenie nižšej získanej hodnoty parametra α_b je uvedené zobrazením priebehov tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na normovanom posune v grafe 7.3. Teda tuhosť je v podstate smernica prenosovej funkcie, ktorá nám udáva hodnotu mobilizovaného napätia v päte na každý milimeter posunu v päte. Na vodorovnej osi je teda normovaný posun k priemeru pilóty a na zvislej osi je hodnota tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie. V tomto grafe sú krivky, ktoré možno rozdeliť do troch skupín podľa ich vytvorenia rovnako ako v predošlej časti práce 7.1. KRIVKY PRIEBEHU TUHOSTI V ZÁVISLOSTI NA NORMOVANOM POSUNE PRE PLÁŠŤ na krivky:

- Vytvorené na základe odporúčaných hodnôt autorov prenosových funkcií.
- Vytvorené na základe výpočtov iných autorov.
- Vytvorené na základe inverznej analýzy zaťažovacích skúšok v tejto práci.

Jednotlivé krivky grafu závislosti medzi tuhosťou resp. smernicou prenosovej funkcie a normovaným posunom k priemeru pilóty sú popísané nižšie vrátane ich vstupov, vzťahov a zdrojov. Normovaný posun bol počítaný ako pomer posunu v päte s_b a priemeru pilóty v oblasti päty d_b podľa vzťahu 7.10.

$$\text{normovaný posun} = \frac{s_b}{d_b} \quad (7.8)$$

- **Krivka C. Bohn – hyperbolická.** Priebeh tejto krivky vychádzal z tvaru hyperbolickej prenosovej funkcie pre päťu a jej vzťahov. Hyperbolický tvar prenosovej funkcie definovali (Bohn a kol., 2016). Na základe definície bola zostavená aj táto krivka. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na posune v päte zostavená podľa vzťahu 7.11. Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.12.

$$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{\sigma_{b,ult}}{M_b * d_b + s_b} - \frac{\sigma_{b,ult} * s_b}{(M_b * d_b + s_b)^2} \quad (7.9)$$

Tabuľka 7.10 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre hyperbolickú prenosovú funkciu päty

Parameter	Hodnota
Medzné napätie v päte $\sigma_{b,ult}$	3000 kPa (odporúčaná podľa (Hulla a kol., 2004))
Parameter počiatocnej tuhosti v päte M_b	0.01 odporúčaná podľa (Bohn a kol., 2016)
Priemer pilóty v päte d_b	900 mm
Posun v päte s_b	Premenný od 0 mm

- **(Briaud a kol., 1983) razená pilóta FZ model.** Priebeh tejto krivky vychádzal z prenosovej funkcie päty odvodennej z výsledkov presiometrických skúšok pre päťu a to konkrétne z FZ modelu a jeho vzťahov. Tvar tejto prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 2.3 ako trilineárna krivka. Tvar definovali z výsledkov presiometrických skúšok (Frank a kol., 1982).

Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na posune v päte je stanovená podľa vzťahov 7.13. Vzťahy vychádzajú z vysvetľovaného príkladu tzv. presiometrickej návrhovej metódy pre razenú pilótu s priemerom 304.8 mm (1 ft) v ílovitej zemine (strana 41 v (Briaud a kol., 1983)). Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.14.

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_b}{ds_b} = k_b = \frac{\alpha_b * E_M}{d_b} & \quad \sigma_b \leq \frac{\sigma_{b,ult}}{2} \\ \frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{k_b}{5} & \quad \frac{\sigma_{b,ult}}{2} < \sigma_b \leq \sigma_{b,ult} \\ \frac{d\sigma_b}{ds_b} = 0 & \quad \sigma_b = \sigma_{b,ult} \end{aligned} \quad (7.10)$$

$$\sigma_b = \frac{s_b + 2 * \sigma_{b,ult} * r}{5 * r}$$

$$r = \frac{0.5}{\alpha_b + 0.5 * E_M}$$

Tabuľka 7.11 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte razenej pilóty podľa vysvetleného príkladu s použitím prenosovej funkcie modelu FZ odvodenéj z výsledkov presiometrických skúšok pre pätu

Parameter	Hodnota
Medzné napätie v päte $\sigma_{b,ult}$	1054 kPa (stanovené v (Briaud a kol., 1983))
α_b	5.5 (stanovené v (Briaud a kol., 1983))
E_M	4000 kPa (stanovené v (Briaud a kol., 1983))
d_b	304.8 mm (1 ft)
Posun v päte s_b	Premenný od 0 mm

- **Krivka modelu pružného polopriestoru.** Priebeh tejto krivky vychádzal z predpokladu pružného polopriestoru podľa (Randolph a kol., 1978). Priebeh tuhosti pre pätu v závislosti na posune v päte bola vytvorená podľa vzťahov 7.15. V tomto prípade je tuhosť konštantná pre všetky posuny. Hodnota teda nie je závislá na posune v päte ako vstupe a nadobúda pre tento prípad pilóty hodnotu 38.87 kPa/mm. Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.16.

$$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{2 * d_b * G_b}{(1-\nu) * \pi * \left(\frac{d_b}{2}\right)^2} \quad (7.11)$$

$$G_b = \frac{E_{oed}}{2 * (1+\nu)}$$

Tabuľka 7.12 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre model pružného polopriestoru

Parameter	Hodnota
E_{oed}	25 000 kPa
ν (Poissonovo číslo zeminy)	0.3
d_b	900 mm

- **Krivka modelu lineárne elastického – perfektne plastického.** Priebeh tejto krivky vychádzal z lineárne elastického chovania zeminy doplneného perfektne plastickým segmentom. Pre päť autori vychádzali z analytického riešenia sadania tuhého kruhového základu, kde G_b je šmykový modul zeminy pod päťou pilóty a η je redukčný súčiniteľ zohľadňujúci vplyv hĺbky päty pilóty (Chalmovský a kol., 2021). Hodnota mobilizovaného napätia v päte σ_b pre jednotlivé posuny bola vypočítaná dosadením príslušnej hodnoty posunu do vzťahov pre zmenu tuhosti. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na posune v päte vytvorená podľa vzťahov 7.16. Vstupné parametre a ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 7.17.

$$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{8 * G_b}{\pi * d_b * (1-\nu) * \eta} \quad \sigma_b < \sigma_{b,ult}$$

$$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = 0 \quad \sigma_b = \sigma_{b,ult} \quad (7.12)$$

$$G_b = \frac{E_{oed}}{2 * (1+\nu)}$$

Tabuľka 7.13 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune v päte pre model lineárne elastický – perfektne plastický

Parameter	Hodnota
E_{oed}	25 000 kPa
η	1
ν (Poissonovo číslo zeminy)	0.3
d_b	900 mm

- Krivky modelu FZ so vstupnými hodnotami podľa (Frank a kol., 1982) a so vstupnými hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce. Priebeh týchto kriviek vychádzal z prenosovej funkcie päty odvodenej z výsledkov presiometrických skúšok a to konkrétne z FZ modelu a jeho vzťahov (Frank a kol., 1982). Tvar tejto prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 2.3 ako trilineárna krivka. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na posune v päte je stanovená podľa vzťahov 7.17 (Frank a kol., 1982). Vstupné parametre s hodnotami podľa (Frank a kol., 1982) a s hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce sú uvedené v tabuľke 7.18. Hodnota mobilizovaného napätia v päte σ_b pre jednotlivé posuny bola vypočítaná dosadením príslušnej hodnoty posunu do vzťahov pre zmenu tuhosti. Hodnota presiometrického modulu je jednotná pre obe krivky a dopočítaná pre hĺbku päty 22.65 m s ostatnými parametrami získanými v inverznej analýze práce ($k_1 = 0$, $m = 1$) podľa vzťahu 4.1 na hodnotu 29 495 kPa z referenčnej hodnoty $E_{M,REF} = 10\,959$ kPa pre skupinu zemín F5 – F8.

$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma_b}{ds_b} &= k_b = \frac{\alpha_b * E_M}{d_b} & \sigma_b &\leq \frac{\sigma_{b,ult}}{2} \\
 \frac{d\sigma_b}{ds_b} &= \frac{k_b}{5} & \frac{\sigma_{b,ult}}{2} &< \sigma_b \leq \sigma_{b,ult} \\
 \frac{d\sigma_b}{ds_b} &= 0 & \sigma_b &= \sigma_{b,ult}
 \end{aligned}
 \tag{7.13}$$

Tabuľka 7.14 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre prenosovú funkciu päty odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ

Parameter	Hodnota podľa (Frank a kol., 1982)	Hodnota podľa inverznej analýzy práce
Medzné napätie v päte $\sigma_{b,ult}$	3000 kPa (odporúčaná podľa (Hulla a kol., 2004))	
α_b	11	3.5
E_M	29 495 kPa	29 495 kPa
d_b	900 mm	900 mm
Posun v päte s_b	Premenný od 0 mm	

- **Krivky modelu AB1 so vstupnými hodnotami podľa (Abchir a kol., 2016) a so vstupnými hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce.** Pribeh týchto kriviek vychádzal taktiež z prenosovej funkcie päty odvodenej z výsledkov presiometrických skúšok a to konkrétne z nelineárneho elastického AB1 modelu a jeho vzťahov (Abchir a kol., 2016). Tvar tejto prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 2.5. Zmena tuhosti, resp. smernice prenosovej funkcie v závislosti na posune v päte je stanovená podľa vzťahov 7.18 (Abchir a kol., 2016). Vstupné parametre s hodnotami podľa (Abchir a kol., 2016) a s hodnotami podľa inverznej analýzy tejto práce sú uvedené v tabuľke 7.19. Hodnota presiometrického modulu je jednotná pre obe krivky a dopočítaná pre hĺbku päty 22.65 m s ostatnými parametrami získanými v inverznej analýze práce ($k_1 = 0$, $m = 1$) podľa vzťahu 4.1 na hodnotu 29 495 kPa z referenčnej hodnoty $E_{M,REF} = 10\,959$ kPa pre skupinu zemín F5 – F8.

$$\frac{d\sigma_b}{ds_b} = \frac{\sigma_{b,ult} - \sigma_b}{\lambda_b}$$

$$\lambda_b = \frac{\sigma_{b,ult} * d_b}{\alpha_b * E_M} \quad (7.14)$$

$$\sigma_b(s_b) = \sigma_{b,ult} * (1 - e^{-s_b/\lambda_b})$$

Tabuľka 7.15 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre prenosovú funkciu päty odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu AB1

Parameter	Hodnota podľa (Frank a kol., 1982)	Hodnota podľa inverznej analýzy práce
Medzné napätie v päte $\sigma_{b,ult}$	3000 kPa (odporúčaná podľa (Hulla a kol., 2004))	
α_b	11	3.1
E_M	29 495 kPa	29 495 kPa
d_b	900 mm	900 mm
Posun v päte s_b	Premenný od 0 mm	

Všetky uvedené krivky sú zobrazené v grafe 7.3 ako zdôvodnenie približne trojnásobne nižších získaných hodnôt parametra α_b inverznými analýzami v tejto práci podľa tabuľky 7.11.

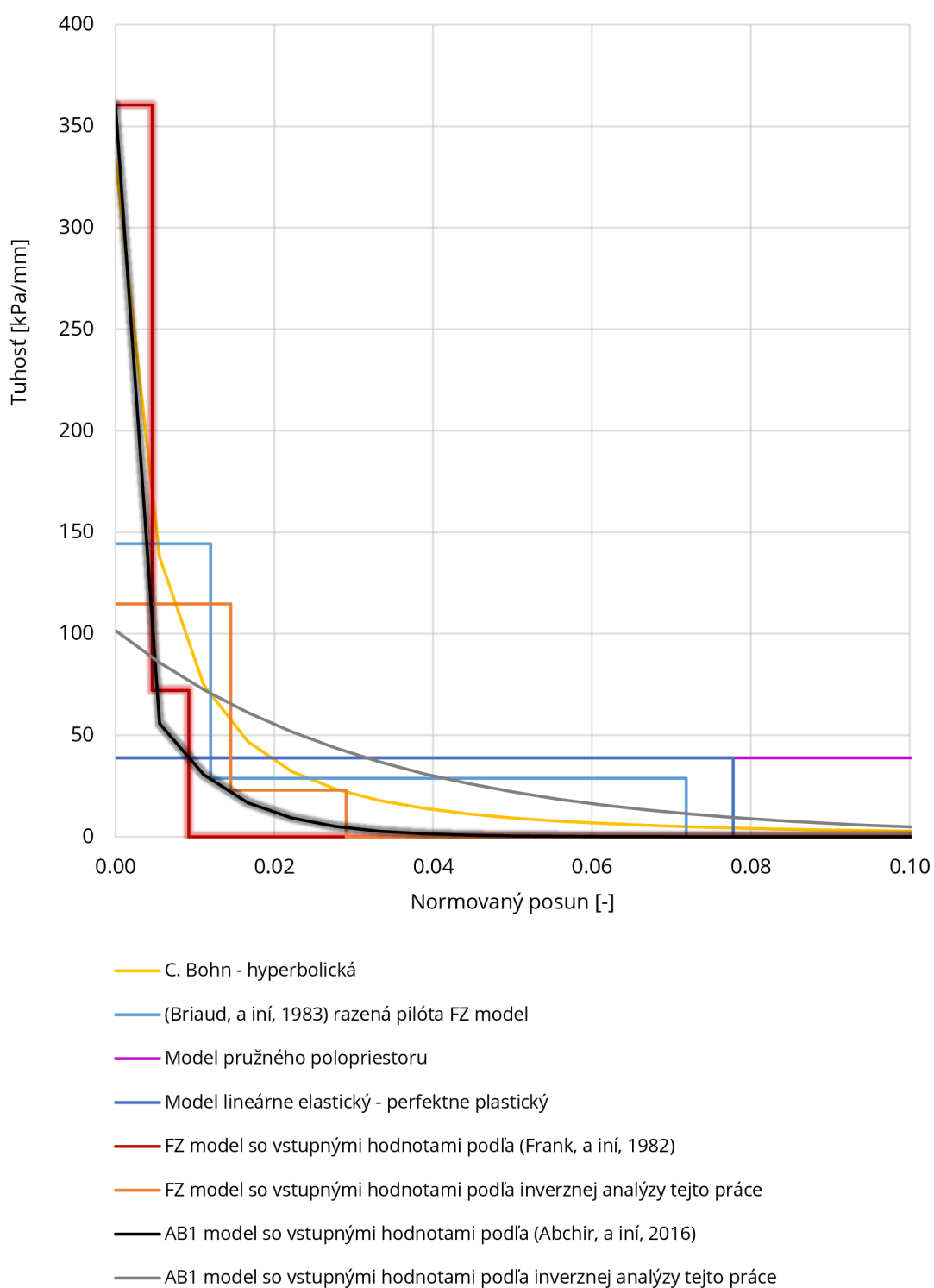
Pre prenosovú funkciu FZ modelu je z grafu 7.3 evidentné, že so vstupnou hodnotou parametra podľa (Frank a kol., 1982), kde $\alpha_b = 11$ v porovnaní s prenosovou funkciou so vstupnou hodnotou parametra získanou z inverzných analýz tejto práce, kde $\alpha_b = 3.5$ a ostatnými prenosovými funkciami vedie k vysokej počiatkovej tuhosti na úrovni približne 360 kPa/mm. Porovnateľne vysokú hodnotu počiatkovej tuhosti vykazuje krivka vychádzajúca z hyperbolickej prenosovej funkcie. Tu však vstupuje do výpočtu empirický parameter počiatkovej tuhosti M_b , ktorý je zdrojom najväčšej neistoty určenia počiatkovej tuhosti. Hodnota počiatkovej tuhosti s použitím parametra α_b získaného v inverzných analýzach je bližšia zvyšným prenosovým funkciám, medzi ktoré patria: (Briaud a kol., 1983) pre razenú pilótu, model pružného polopriestoru a model lineárne elastický – perfektne plastický.

V prípade prenosovej funkcie AB1 modelu so vstupnou hodnotou parametra podľa (Abchir a kol., 2016), kde $\alpha_b = 11$ v porovnaní s prenosovou funkciou so vstupnou hodnotou parametra získanou z inverzných analýz tejto práce, kde $\alpha_b = 3.1$ a ostatnými prenosovými funkciami vedie taktiež k rovnako vysokej počiatkovej tuhosti na úrovni približne 360 kPa/mm. Porovnateľne vysokú hodnotu počiatkovej tuhosti vykazuje krivka vychádzajúca z hyperbolickej prenosovej funkcie, ale s uvedenou neistotou určenia empirického parametra počiatkovej tuhosti M_b .

Hodnota počiatkovej tuhosti s použitím parametra α_b získaného v inverzných analýzach je taktiež bližšia zvyšným prenosovým funkciám, medzi ktoré patria: (Briaud a kol., 1983) pre razenú pilótu, model pružného polopriestoru a model lineárne elastický – perfektne plastický.

Aj v tomto prípade je možné predpokladať, že nižšia hodnota parametra α_b pre oba modely bola získaná z dôvodu zavedenia závislosti tuhosti na geostatickom napätí v hodnote E_M v kombinácii s reálnym tvarom prenosovej funkcie. Závislosť bola zavedená v rámci tejto práce. Zo závislosti vyplýva, že tuhosť prenosovej funkcie päty závisí na reálnej hĺbke päty a to spôsobuje zníženie empirického parametra α_b . Hodnota empirického parametra α_b sa znížila približne trojnásobne a priblížila hodnote 1. To naznačuje, že zohľadnenie závislosti tuhosti prenosovej funkcie päty na reálnej hĺbke päty vedie k eliminácii potreby použitia empirického parametra. Z tohto vyplýva, že hodnoty α_b získané inverznými analýzami zaťažovacích skúšok v tejto práci a z nich vychádzajúce tvary prenosových funkcií modelov FZ a AB1 pre päty sú opodstatnené. Získané hodnoty α_b z inverzných analýz tejto práce platia teda podľa tabuľky 7.11.

PRIEBEH TUHOSTI S NORMOVANÝM POSUNOM K PRIEMERU PILÓTY PRE PÄTU A JEDNOTLIVÉ PRENOSOVÉ FUNKCIE



Graf 7.3 Priebeh tuhosti s normovaným posunom k priemeru pilóty pre pätu a jednotlivé prenosové funkcie

8. ZÁVER

Prvým cieľom práce bolo stanovenie Ménardových presiometrických modulov a ich závislosť na hĺbke pre jednotlivé skupiny tried podložia. Ďalším cieľom bolo inverzne analyzovať zaťažovacie skúšky vrтанých pilót a na základe analýzy stanoviť hodnoty vstupných parametrov riadiacich tvar prenosových funkcií modelu FZ a AB1 zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok.

V úvode práce boli predstavené jednotlivé použité prenosové funkcie a spôsob stanovenia plášťového trenia v β metóde. Prenosové funkcie použité k inverznej analýze boli: hyperbolická prenosová funkcia podľa (Bohn a kol., 2016), prenosová funkcia FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982) a prenosová funkcia modelu AB1 podľa (Abchir a kol., 2016). Prenosové funkcie FZ a AB1 modelu sú zostavené na základe výsledkov presiometrických skúšok, čo znamená, že medzi ich vstupné parametre vstupuje presiometrický modul E_M ako výsledok presiometrickej skúšky.

V nasledujúcej časti boli na základe dát z presiometrických skúšok stanovené referenčné hodnoty Ménardovho presiometrického modulu pre rôzne skupiny tried podložia. Konkrétne išlo o skupiny tried F1 – F4, F5 – F8 a R4 – R6. Ich hodnoty sú uvedené v tabuľke 4.3. Referenčné hodnoty Ménardových presiometrických modulov boli stanovené regresnou analýzou, ktorá zabezpečovala ich čo najreálnejšie vyčíslenie. Z hľadiska inverzných analýz bola podstatná hodnota presiometrického modulu skupiny tried podložia F5 – F8, keďže v tomto type podložia sa nachádzali všetky inverzne analyzované pilóty. Pre túto skupinu bol stanovený referenčný presiometrický modul $E_{M,REF} = 10.9587$ MPa s ostatnými vstupnými hodnotami podľa vzťahu 4.1, $m = 1$ a $k_1 = 0$. S týmito hodnotami vstupných parametrov sa počítalo aj v inverznej analýze šiestich dostupných zaťažovacích skúšok vrтанých pilót.

Pri inverznej analýze zaťažovacích skúšok vrтанých pilót boli sledované medzné zaťažovacie krivky (MZK). Hlavnou snahou bolo dosiahnuť čo najväčšiu zhodu predikovaných MZK s nameranými MZK v zaťažovacích skúškach. Predikcia MZK bola uskutočnená prostredníctvom troch prenosových funkcií.

Po dosiahnutí najväčšej možnej zhody boli hodnoty empirických parametrov prenosových funkcií modelu FZ a AB1 porovnané s odporúčanými hodnotami. Konkrétne išlo o parametre α_b a α_s . Tieto parametre priamo ovplyvňujú tuhosť a jej priebeh s posunom pre oba modely. Tuhosť predstavuje smernicu prenosovej funkcie plášťa a udáva nám hodnotu mobilizovaného plášťového trenia na každý milimeter relatívneho posunu pilóta – zemina. Toto platí pre plášť, v prípade päty pilóty nám udáva smernica prenosovej funkcie päty hodnotu mobilizovaného napätia v päte na každý milimeter posunu v päte.

Hodnoty parametra α_s pre model AB1 sa významne nelíšili, odporúčaná hodnota je na úrovni 1 (Abchir a kol., 2016) a hodnota získaná inverznými analýzami na úrovni 0.92. Rozdiel medzi hodnotami je možné vyhodnotiť ako minimálny a pravdepodobne spôsobený jeho subjektívnou voľbou v inverzných analýzach pre dosiahnutie najväčšej zhody MZK. Pre model FZ bol rozdiel približne dvojnásobný, odporúčaná hodnota je na úrovni 2 (Frank a kol., 1982) a získaná hodnota na úrovni 0.94. Zohľadnením závislosti tuhosti na geostatickom napätí, tzn. tuhosť prenosovej funkcie je závislá na hĺbke, v hodnote presiometrického modulu E_M v kombinácii s reálnym tvarom prenosových funkcií je možné čiastočne eliminovať empirický parameter α_s . Závislosť vzniká definovaním a zavedením vzťahu presiometrického modulu E_M a hĺbky v tejto práci. Navyše sa získaná hodnota empirického parametra priblížila hodnote 1, čo naznačuje, že zavedená závislosť vedie k eliminácii potreby použitia empirického parametra. Vzhľadom na počet vstupných parametrov prenosových funkcií odvodených z výsledkov presiometrických skúšok je táto možnosť čiastočnej eliminácie pozitívnym výsledkom.

Hodnoty parametra α_b získané inverznými analýzami sa líšili od odporúčaných hodnôt výraznejšie v prípade oboch modelov. Odporúčaná hodnota je na úrovni 11 pre oba modely podľa (Frank a kol., 1982) a (Abchir a kol., 2016). Inverznými analýzami bola získaná hodnota α_b pre FZ model 3.5 a pre AB1 model 3.1. Rozdiel s odporúčanou hodnotou je v oboch prípadoch približne trojnásobný.

Aj tu spôsobuje zohľadnenie tuhosti na geostatickom napätí v hodnote presiometrického modulu E_M v kombinácii s reálnym tvarom prenosových funkcií čiastočnú elimináciu empirického parametra α_b . Zo závislosti vyplýva, že tuhosť prenosovej funkcie päty závisí na reálnej hĺbke päty a to spôsobuje zníženie empirického parametra α_b . Získaná hodnota empirického parametra α_b sa taktiež priblížila hodnote 1. To naznačuje, že zohľadnenie závislosti tuhosti prenosovej funkcie päty na reálnej hĺbke päty vedie k eliminácii potreby použitia empirického parametra. A teda vzhľadom na počet vstupných parametrov prenosových funkcií odvodených z výsledkov presiometrických skúšok je aj táto možnosť čiastočnej eliminácie pozitívnym výsledkom.

Všetky získané hodnoty α_b a α_s vychádzajúce z tejto práce sú odôvodnené zohľadnením závislosti tuhosti na geostatickom napätí v hodnote presiometrického modulu E_M pri použití reálnych tvarov prenosových funkcií. Toto konštatovanie je potvrdené analýzou priebehu tuhosti v závislosti na posune pre rôzne prenosové funkcie, kde je evidentné, že pri hodnotách α_b a α_s odporúčaných podľa (Frank a kol., 1982) a (Abchir a kol., 2016) vedú počiatočné tuhosti k vysokým hodnotám v porovnaní s ostatnými prenosovými funkciami. Porovnanie hodnôt empirických parametrov α_s a α_b ako vstupov do tvarov prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok sú uvedené v nasledujúcej tabuľke 8.1.

Tabuľka 8.1 Porovnanie hodnôt empirických parametrov α_s a α_b ako vstupov do tvarov prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok

	Prenosová funkcia FZ modelu		Prenosová funkcia AB1 modelu	
	Získaná hodnota inverznými analýzami v tejto práci	Odporúčaná hodnota podľa (Frank a kol., 1982)	Získaná hodnota inverznými analýzami v tejto práci	Odporúčaná hodnota podľa (Abchir a kol., 2016)
α_s	0.94	2	0.92	1
α_b	3.5	11	3.1	11

9. POUŽITÉ ZDROJE

- Abchir, Z., Burlon, S., Frank, R., Habert, J., Legrand, S.** t-z curves for piles from pressuremeter test results. *Géotechnique*, 2016, Zv. 66, 2.
- Bohn, C., Lopes dos Santos, A a Frank, R.** Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests. *J Geotech Geoenviron Eng ASCE*, 2016, Zv. 143, 1.
- Briaud, Jean-Louis a Anderson, Joe.** Pressuremeter Design of Vertically Loaded Piles. *Texas Transportation Institute*, jún 1983. Stránky 35-41, 51-77.
- Brown, Dan A., Turner, John P. a Castelli, R. J.** Drilled shafts: construction procedures and LRFD design methods. *U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration*, 2010. FHWA-NHI-10-016.
- Budhu, M.** Soil mechanics and foundations. *John Wiley & Sons, Inc.*, 2011.
- Burland, John Boscawen.** Shaft friction of piles in clay - a simple fundamental approach. *Ground Engineering*, 1973, Zv. 6.
- ČSN 73 1001 (731001)** - Československá státní norma ČSN 73 1001 Zakládání staveb, Základová půda pod plošnými základy. *Český normalizační institut 31060, Praha*, 8. jún 1987.
- ČSN EN ISO 22476-4** - Česká technická norma ČSN EN ISO 22476-4 Geotechnický průzkum a zkoušení - Terénní zkoušky - Část 4: Zkouška presiometrem Ménard. *Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, Praha*, 2013. Stránka 6.
- DS Holding a.s.** Zatěžovací zkouška pilóty 1300 mm u mostního objektu D202 v km 146.602 - závěrečná zpráva. *Brno: Vývojové pracoviště DS Holding a.s.*, 2000.
- Masopust, J.** Vrtané piloty. *Praha: Čeněk a Ježek*, 1994.
- Fleming, W. G. K.** A new method for single pile settlement prediction and analysis. *Géotechnique*, 1992, Zv. 42, 3.
- Frank, R. a Zhao, S. R.** Estimation par les 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.
- GEOSTAR, spol. s r.o.** Výsledky presiometrických zkoušek v lokalite: D35 Džbánov_Litomyšl. *Brno: GEOSTAR, spol. s r.o.*, 2020.
- GEOSTAR, spol. s r.o.** Podrobný geotechnický průzkum v úseku km 3,800 - 5,700 - presiometrické zkoušky. *Brno: GEOSTAR, spol. s r.o.*, 2008.
- GEOSTAR, spol. s r.o.** Výsledky presiometrických zkoušek v lokalite: V1, Arboretum, Brno. *Brno: GEOSTAR, spol. s r.o.*, 2012.
- GEOSTAR, spol. s.r.o.** Presiometrické zkoušky (dle ČSN ISO 22476-4). [Online] *GEOSTAR, spol. s.r.o.*, október 2021. <http://www.geostar.cz/sluzby/geotechnicke-vypocty-a-projektovani/presiometricke-zkousky/>.
- Geotest, a.s., Brno.** Podrobný geotechnický průzkum pro mostní objekt s objektem pilóty D 4704 SO 225. *Geotest, a.s., Brno*, 2001.
- Hirayama, H.** Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer curves. *Soils and Foundations*, 1990, Zv. 30, 1. Stránky 55-64.

- Hudek, J.** Zkušenosti Pudis a.s., s presiometrickými zkouškami. *Český tunelářský komitét a Slovenská tunelářská asociácia ITA/AITES, Časopis Tunel*, 2007, 16. ročník - č. 3.
- Hulla, J., Turček, P.** Zakladanie stavieb. *Jaga Group*, 2004. 350 s. ISBN 978-8-0807-6023-6.
- Chalmovský, J., Miča, L., Zdražil, K.** Využití metody přenosových funkcí pro predikci chování hlubinných základů v ČR - Souhrnná výzkumná zpráva TJ02000140. *Brno: VUT v Brně a Technologická agentura ČR*, január 2021.
- INGEO a.s. Žilina.** Výsledky terénnych skúšok - presiometrické. D1 Lietavská Lúčka - Višňové. *INGEO a.s. Žilina, GEOFOS s.r.o.*, 1999.
- Kulhawy, F. H. a Mayne, P. W.** Manual on estimating soil properties for foundation design. *Palo Alto, California: Electric Power Research Institute*, 1990.
- Look, Burt G.** Handbook of Geotechnical Investigation and Design Tables. *Taylor & Francis/Balkema*, 2007. Stránka 62. ISBN 13: 978-0-203-94660-2.
- Mapy.cz.** [Online] *Seznam.cz*, 2021. <https://mapy.cz>.
- Matys, M., Cuninka, M., Ťavoda, O.** Poľné skúšky zemín. *Bratislava: Alfa*, 1990. 303 s. ISBN 80-05-00647-0.
- Meyerhof, George Geoffrey.** Bearing capacity and settlement of pile foundations. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*. 1976, Zv. 102, 3.
- Poulos, H. G.** Pile behaviour - theory and application. *Géotechnique*, 1989, Zv. 39, 3. Stránky 365-415.
- Randolph, M.F. a Wroth, C.P.** Analysis of deformation of vertically loaded piles. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 1978, Zv. 104, GT12.
- SG-Geotechnika a.s.** Výsledky presiometrických skúšok Brno I/42, VMO Dobrovského A, průzkumné štoly. *SG-Geotechnika a.s.*, 2002.
- Schanz, T., Vermeer, P. A., Bonnier, P. G.** The hardening soil model: Formulation and verification. *Beyond 2000 in Computational Geotechnics - 10 Years of PLAXIS*, *Balkema*. 1999. Stránky 281-296. ISBN 90 5809 040 X.
- SKANSKA.** Předběžná zpráva - zatěžovací zkouška piloty průměru 900 mm, most při plynárně v Olomouci. *Brno: Středisko speciálních prací SKANSKA*, jún 2006.
- SKANSKA.** Zatěžovací zkouška piloty SO 210 - závěrečná zpráva. *Brno: SKANSKA*, február 2005.
- SKANSKA.** Zatěžovací zkouška piloty SO 225 - závěrečná zpráva. *Brno: SKANSKA*, máj 2006.
- Pardoe, L.** Applied Regression Modeling, 2nd Edition. *Hoboken, NJ: Wiley*, júl 2012. 346 s. ISBN 978-1-118-09728-1.
- Varaksin Serge.** THE MENARD PRESSUREMETER: history, equipment, new developments, installation procedures, *Guimarães*, október 2015.
- Vardanega, Paul J., Kolody, E., Pennington, Stuart H., Morrison, Paul R. J., Simpson, B.** Bored pile design in stiff clay I: codes of practice. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Geotechnical Engineering*, 2012, Zv. 165, 4.
- Zhang, Q.Q. a Zhang, Z.M.** A simplified nonlinear approach for single pile settlement analysis. *Canadian Geotechnical Journal*. 2012, Zv. 49, 11. Stránky 1256-1266.

10. ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

HPV	hladina podzemnej vody
MZK	medzná zaťažovacia krivka
OCR	stupeň prekonsolidácie
ZS	zaťažovací stav
a, b, e, f	regresné súčinitele
A_p	prierezová plocha pilóty
c	súdržnosť
c_{ef}	efektívna hodnota súdržnosti
d_b	priemer pilóty v päte
d_s	priemer pilóty
e'	stredná hodnota rezídua e_i
e_i	rezíduum, rozdiel vypočítaného E_{Mi}' a nameraného E_{Mi} zo skúšky
E_c	Youngov modul pružnosti betónu
E_{def}	modul pretvorenia zeminy
E_M	Ménardov presiometrický modul zeminy
$E_{M,b}$	Ménardov presiometrický modul zeminy v oblasti päty pilóty
E_{Mi}^{av}	priemerná hodnota Ménardovho presiometrického modulu
E_{Mi}'	vypočítaný presiometrický modul regresného modelu
E_{Mi}^{rav}	priemerná hodnota presiometrického modulu regresného modelu
E_{oed}	edometrický modul
$E_{M,REF}$	referenčná hodnota presiometrického modulu
E_s	sečnicový modul deformácie
h_i	vzdialenosť od stredu hodnôt
I_c	stupeň konzistencie
k	počet neznámych
k_1	teoretická ťahová pevnosť
K	koeficient sondy
k_b	parameter definujúci tuhosť v päte
k_s	parameter definujúci tuhosť na plášti
K_0	súčiniteľ zemného tlaku v pokoji
K_0^{oc}	súčiniteľ zemného tlaku v pokoji prekonsolidovanej zeminy
K_s	súčiniteľ bočného tlaku

L	dĺžka pilóty
L_n	dĺžka segmentu pilóty n
m	parameter ovplyvňujúci linearitu závislosti E_M a σ'_{or}
M_b	parameter počiatkovej tuhosti v päte
M_s	parameter počiatkovej tuhosti na plášti
MS_E	stredná kvadratická odchýlka
n	počet skúmaných presiometrických skúšok
p_a	atmosférický tlak
p_o	tlak na začiatku pseudoelastickej fázy, to je radiálne napätie, pri ktorom dochádza k opätovnému uzavieraniu pórov alebo deliacich plôch roztvorených po uvoľnení v dôsledku odvrátenia.
p_f	tlak medzi pseudoelastickou a plastickou fázou pretvorenia, resp. koniec lineárneho štádia pretvárneho diagramu
p_{LM}	limitný tlak na medzi únosnosti prostredia
p_n	tlak v sústave presiometrického prístroja v stupni n
p_{REF}	referenčný tlak pre presiometrické skúšky
P^n	priemerná osová sila v segmente pilóty n
P_b^n	sila v päte segmentu n
P_t^n	sila v hlave segmentu pilóty n
POP	rozdiel medzi maximálnym napätím v minulosti a efektívnym geostatickým napätím
q_c	odpor na hrote statickej penetračnej skúšky
r	parameter pre výpočet plášťového trenia podľa (Briaud a kol., 1983)
r_i	normované rezídium
R_o	polomer prierezu pilóty
R^2	koeficient determinácie
s_b	posun v päte
s_s	posun na plášti
s_c^n	elastická deformácia segmentu pilóty n
SS_E	súčet druhých mocnín odchýlok e_i od ich strednej hodnoty e'
SS_X	súčet druhých mocnín odchýlok σ'_{ori} od σ''_{or}
SS_Y	celkový súčet druhých mocnín rozdielu nameraného presiometrického modulu E_{Mi} a jeho priemernej hodnoty E_M^{av}
SS_Y'	celkový súčet druhých mocnín rozdielu náhradného presiometrického modulu regresného modelu a jeho priemernej hodnoty z regresného modelu
T	celková sila prenesená mobilizovaným plášťovým trením na jednotlivých segmentoch
T_n	celková sila prenesená segmentom pilóty n
$V_{30/60}$	rozdiel objemu bunky v 30., resp. 60. sekunde

V_0	objem sondy presiometrického prístroja
V_m	priemerný objem bunky vo vrte medzi tlakmi p_n a p_{n+1}
V_n	objem bunky presiometrického prístroja meraný vo vrte v stupni n
w_b^n	vertikálny posun v päte segmentu pilóty n
w_c^n	vertikálny posun v strede segmentu pilóty n
w_t^n	vertikálny posun v hlave segmentu pilóty n
z	hĺbka
u	hydrostatický pórový tlak
α_b	empirický parameter tuhosti pre pätu
α_s	empirický parameter tuhosti pre plášť
β	parameter plášťového trenia
β_{av}	priemerný parameter plášťového trenia
δ	trecí uhol na rozhraní pilóta – zemina
η	redukčný súčiniteľ zohľadňujúci vplyv hĺbky päty pilóty
φ_{cv}	uhol vnútorného trenia v kritickom stave
φ_{ef}	efektívny uhol vnútorného trenia
γ_c	objemová tiaž betónu
γ	objemová tiaž zeminy
γ_s	objemová tiaž saturovanej zeminy
λ_b	parameter závislý na medznom napätí v päte
λ_s	parameter závislý na medznom plášťovom trení
ν	Poissonovo číslo
σ_b	mobilizované napätie v päte
$\sigma_{b,ult}$	medzné napätie v päte
σ_p	maximálne napätie v minulosti
$\Delta\sigma'_{hc}$	zmena radiálneho napätia v dôsledku zhotovenia pilóty
$\Delta\sigma'_{hl}$	zmena radiálneho napätia v dôsledku zaťažovania
σ'_{or}	efektívne geostatické napätie
$\sigma'_{or}{}^{REF}$	referenčná hodnota geostatického napätia
σ''_{or}	priemerné efektívne geostatické napätie
τ_s	mobilizované plášťové trenie
$\tau_{s,ult}$	medzné plášťové trenie
τ_s^n	mobilizované plášťové trenie na segmente pilóty n

11. ZOZNAM OBRÁZKOV, TABULIEK A GRAFOV

Obrázky:

Obrázok 2.1 Priradenie funkcií segmentom plášťa a päte pilóty (Chalmovský a kol., 2021).....	17
Obrázok 2.2 Vývojový diagram metódy prenosových funkcií.....	18
Obrázok 2.3 Vývojový diagram metódy prenosových funkcií, pokračovanie.....	19
Obrázok 2.4 Závislosť medzného plášťového trenia na hĺbke (Burland, 1973) (Chalmovský a kol., 2021)	25
Obrázok 3.1 Schéma výstupu presiometrickej skúšky s jednotlivými fázami (Hudek, 2007) (SG- Geotechnika a.s., 2002).....	30
Obrázok 3.2 Schéma presiometrickeho prístroja (INGEO a.s. Žilina, 1999).....	32
Obrázok 4.1 Mapa s lokalitami presiometrických skúšok (Mapy.cz, 2021).....	34
Obrázok 4.2 Vysvetlenie parametra k_1	36
Obrázok 6.1 Vzťah pomeru q_c/p_a a σ_p/p_a podľa (Kulhawya a kol., 1990).....	68
Obrázok 6.2 Vzťah pomeru q_c/p_a a σ_p/p_a podľa (Kulhawya a kol., 1990).....	82

Tabuľky:

Tabuľka 2.1 Rovnice hyperbolických prenosových funkcií podľa (Bohn a kol., 2016) (Chalmovský a kol., 2021).....	21
Tabuľka 2.2 Odporúčané hodnoty empirických parametrov α_s a α_b podľa (Frank a kol., 1982).....	21
Tabuľka 2.3 Rovnice prenosových funkcií FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982).....	21
Tabuľka 2.4 Odporúčané hodnoty empirických parametrov α_s a α_b podľa (Abchir a kol., 2016).....	23
Tabuľka 2.5 Rovnice prenosových funkcií AB1 modelu podľa (Abchir a kol., 2016).....	23
Tabuľka 2.6 Prehľad prenosových funkcií a ich vstupných hodnôt.....	28
Tabuľka 2.7 Odporúčané hodnoty empirických vstupných parametrov jednotlivých prenosových funkcií	28
Tabuľka 4.1 Zoznam lokalít presiometrických skúšok.....	34
Tabuľka 4.2 Početné zastúpenie presiometrických skúšok v jednotlivých geológiách.....	35
Tabuľka 4.3 Výsledky regresnej analýzy.....	43
Tabuľka 5.1 Nemenné vlastnosti pilóty a zeminy v parametrickej štúdií.....	45
Tabuľka 5.2 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného $E_{M,REF}$	46
Tabuľka 5.3 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného m	49
Tabuľka 5.4 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného α_s	52
Tabuľka 5.5 Hodnoty skúmaných parametrov pre štúdiu premenného β_{av}	55

Tabuľka 6.1 Vstupné parametre do inverznej analýzy pre jednotlivé modely	62
Tabuľka 6.2 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty D 4707 SO 210	63
Tabuľka 6.3 Geologický profil objektu pilóty D 4707 SO 210.....	65
Tabuľka 6.4 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty D 4707 SO 210.....	69
Tabuľka 6.5 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty D 4707 SO 210.....	70
Tabuľka 6.6 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty D 4704 SO 225	72
Tabuľka 6.7 Geologický profil objektu pilóty D 4704 SO 225.....	74
Tabuľka 6.8 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty D 4704 SO 225.....	77
Tabuľka 6.9 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty D 4704 SO 225.....	78
Tabuľka 6.10 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty TP1	80
Tabuľka 6.11 Geologický profil objektu pilóty TP1.....	81
Tabuľka 6.12 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty TP1.....	83
Tabuľka 6.13 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty TP1	84
Tabuľka 6.14 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty TP2.....	86
Tabuľka 6.15 Geologický profil objektu pilóty TP2.....	87
Tabuľka 6.16 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty TP2.....	89
Tabuľka 6.17 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty TP2.....	90
Tabuľka 6.18 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty priemeru 900 mm.....	92
Tabuľka 6.19 Geologický profil objektu pilóty priemeru 900 mm	94
Tabuľka 6.20 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty priemeru 900 mm	95
Tabuľka 6.21 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty priemeru 900 mm	96
Tabuľka 6.22 Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu pilóty priemeru 1300 mm	98
Tabuľka 6.23 Geologický profil objektu pilóty priemeru 1300 mm	99
Tabuľka 6.24 Vstupné parametre postupu podľa (Masopust, 1994) objektu pilóty priemeru 1300 mm	101
Tabuľka 6.25 Vstupné parametre metódy prenosových funkcií objektu pilóty priemeru 1300 mm ..	102
Tabuľka 7.1 Hodnoty vstupných parametrov tvarov prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok vychádzajúce z inverzných analýz tejto práce.....	104
Tabuľka 7.2 Hodnoty parametra α_s získaného inverznou analýzou a odporúčaného pre plášť	107

Tabuľka 7.3 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre hyperbolickú prenosovú funkciu plášťa	108
Tabuľka 7.4 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre plášť razenej pilóty podľa vysvetleného príkladu s použitím prenosovej funkcie modelu FZ odvodené z výsledkov presiometrických skúšok.....	109
Tabuľka 7.5 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre model pružného polopriestoru (plášť).....	110
Tabuľka 7.6 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre model lineárne elastický – perfektne plastický (plášť)	111
Tabuľka 7.7 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre prenosovú funkciu plášťa odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ.....	112
Tabuľka 7.8 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune pre prenosovú funkciu plášťa odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu AB1	113
Tabuľka 7.9 Hodnoty parametra α_b získaného inverznou analýzou a odporúčaného pre päťu	115
Tabuľka 7.10 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre hyperbolickú prenosovú funkciu päty.....	116
Tabuľka 7.11 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte razenej pilóty podľa vysvetleného príkladu s použitím prenosovej funkcie modelu FZ odvodené z výsledkov presiometrických skúšok pre päťu.....	117
Tabuľka 7.12 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre model pružného polopriestoru.....	118
Tabuľka 7.13 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na relatívnom posune v päte pre model lineárne elastický – perfektne plastický	119
Tabuľka 7.14 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre prenosovú funkciu päty odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu FZ	120
Tabuľka 7.15 Vstupné parametre krivky závislosti tuhosti na posune v päte pre prenosovú funkciu päty odvodenú z výsledkov presiometrických skúšok modelu AB1.....	121
Tabuľka 8.1 Porovnanie hodnôt empirických parametrov α_s a α_b ako vstupov do tvarov prenosových funkcií zostavených na základe výsledkov presiometrických skúšok.....	126

Grafy:

Graf 2.1 Hyperbolická prenosová funkcia podľa (Bohn a kol., 2016)	20
Graf 2.2 Zmena tuhosti vzhľadom k posunu pre hyperbolickú prenosovú funkciu.....	20
Graf 2.3 Prenosová funkcia FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982)	22

Graf 2.4 Zmena tuhosti vzhľadom k posunu pre FZ model.....	22
Graf 2.5 Prenosová funkcia AB1 modelu podľa (Abchir a kol., 2016).....	23
Graf 2.6 Zmena tuhosti vzhľadom k posunu pre AB1 model.....	23
Graf 4.1 Zobrazenie vplyvu parametra m na linearitu závislosti E_M a σ_{or}	36
Graf 4.2 Príklad zobrazenia závislosti E_M a σ_{or} pre skupinu F5 - F8 a odľahlých bodov.....	38
Graf 4.3 Príklad eliminácie odľahlých bodov v prvej iterácii.....	40
Graf 4.4 Vývoj koeficientu determinácie v jednotlivých iteráciách.....	41
Graf 4.5 Výsledok eliminácie odľahlých bodov v 5. iterácii skupiny zemného prostredia F5 - F8.....	42
Graf 5.1 MZK FZ modelu a premenného $E_{M,REF}$	47
Graf 5.2 MZK AB1 modelu a premenného $E_{M,REF}$	48
Graf 5.3 MZK FZ modelu a premenného m	50
Graf 5.4 MZK AB1 modelu a premenného m	51
Graf 5.5 MZK FZ modelu a premenného α_s	53
Graf 5.6 MZK AB1 modelu a premenného α_s	54
Graf 5.7 MZK FZ modelu a premenného β_{av}	56
Graf 5.8 MZK AB1 modelu a premenného β_{av}	57
Graf 5.9 Prenosová funkcia FZ modelu podľa (Frank a kol., 1982).....	56
Graf 5.10 Prenosová funkcia AB1 modelu podľa (Abchir a kol., 2016).....	57
Graf 5.11 Porovnanie modelov prenosových funkcií pri premennej hodnote $E_{M,REF}$	59
Graf 5.12 MZK skúmaných parametrov s hodnotami vyššími o 25%.....	60
Graf 5.13 MZK skúmaných parametrov s hodnotami nižšími o 25%.....	61
Graf 6.1 MZK objektu pilóty D 4707 SO 210.....	64
Graf 6.2 Prenos sily v jednotlivých zaťažovacích stavoch po dĺžke objektu pilóty D 4707 SO 210.....	66
Graf 6.3 Porovnanie MZK pre objekt pilóty D 4707 SO 210.....	71
Graf 6.4 MZK objektu pilóty D 4704 SO 225.....	73
Graf 6.5 Prenos sily v jednotlivých zaťažovacích stavoch po dĺžke objektu pilóty D 4704 SO 225.....	75
Graf 6.6 Porovnanie MZK pre objekt pilóty D 4704 SO 225.....	79
Graf 6.7 MZK objektu pilóty TP1.....	81
Graf 6.8 Porovnanie MZK pre objekt pilóty TP1.....	85
Graf 6.9 MZK objektu pilóty TP2.....	87
Graf 6.10 Porovnanie MZK pre objekt pilóty TP2.....	91
Graf 6.11 MZK objektu pilóty priemeru 900 mm.....	93
Graf 6.12 Porovnanie MZK pre objekt pilóty priemeru 900 mm.....	97
Graf 6.13 MZK objektu pilóty priemeru 1300 mm.....	99

Graf 6.14 Porovnanie MZK pre objekt pilóty priemeru 1300 mm	103
Graf 7.1 MZK pre objekt D 4707 SO 210 s upravenou HPV a hodnotou α_s pre zdôvodnenie pôvodnej odchýlenej hodnoty α_s od ostatných analyzovaných objektov pilót.....	106
Graf 7.2 Priebeh tuhosti s normovaným posunom k priemeru pilóty pre plášť a jednotlivé prenosové funkcie.....	114
Graf 7.3 Priebeh tuhosti s normovaným posunom k priemeru pilóty pre päťu a jednotlivé prenosové funkcie.....	123