



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

## ÚSTAV GEOTECHNIKY

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

# ZPĚTNÁ ANALÝZA ZATĚŽOVACÍ ZKOUŠKY VELKOPRŮMĚROVÉ VRTANÉ PILOTY S VYUŽITÍM METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

BACK-ANALYSIS OF INSTRUMENTED LOAD TEST OF LARGE-DIAMETER BORED PILE USING  
LOAD-TRANSFER METHOD

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Matej Bírošík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2020



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Matej Bírošík
Název	Zpětná analýza zatěžovací zkoušky velkopřůměrové vrtané piloty s využitím metody přenosových funkcí
Vedoucí práce	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

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

---

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

## **PODKLADY A LITERATURA**

- HULLA, J.; TURČEK, P. Zakladanie stavieb. 2004.
- MASOPUST, J. Vrtané piloty. Čeněk a Ježek. 1994.
- REDDY, E. S. B., O' REILLY, M., CHAPMAN, D. A software to predict behavior of tension piles. Computers & Structures, 1997, vol. 62, no. 4, p. 653-658.
- HIDEKI HIRAYMA. Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions. Soils and foundations, 1990, vol. 30, no. 1, p. 55-64.
- PARKER, F., REESE, L. C. Experimental and analytical studies of behavior of single piles in sand under lateral and axial loading. 1970.
- KARSLRUD, K. Prediction of load-displacement behavior and capacity of axially loaded piles in clay based on analyses and interpretation of pile load test results. NTNU, 2012.
- BOHN, C., LOPES DOS SANTOS, A., FRANK, R. Development of axial pile load transfer curves based on instrumented load tests. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2016, vol. 143, no. 1.

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

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Cílem bakalářské práce je provedení zpětného výpočtu zatěžovací zkoušky vrtané velkopřůměrové piloty s využitím metody přenosových funkcí (mobilizačních křivek). V první části práce bude tato metoda popsána teoreticky. V druhé části bude provedena geotechnická interpretace výsledků vybrané zatěžovací zkoušky. V třetí části bude proveden zpětný výpočet. Získané tvary (hodnoty vstupních parametrů) mobilizačních křivek budou porovnány s literaturou.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Práca je rozdelená na štyri časti. Prvá časť je teoretická a skladá sa z popisu princípu fungovania metódy prenosových funkcií podľa (Reddy a ďalší, 1998), kde je popísaný algoritmus, podľa ktorého sa počíta a predikuje správanie vrтанých pilót zaťažených určitým zaťažením.

V druhej časti sú zhrnuté informácie o zaťažovacích skúškach vrátane nameraných hodnôt, ktoré sú interpretované pomocou tabuliek a grafov. Zobrazené sú medzné zaťažovacie krivky, prenosy síl v jednotlivých rezoch a priebehy plášťových trení po dĺžke pilót. Súčasťou tejto časti je aj analýza vplyvu neistoty osovej tuhosti pilóty.

Tretia časť sa zaoberá parametrickou štúdiou. Táto štúdia slúži na ukážku vplyvu rôznych parametrov na predikciu správania pilóty počas zaťažovania prostredníctvom medzných zaťažovacích kriviek a prenosov síl v jednotlivých rezoch po dĺžke pilóty získaných z programu vyvíjanom na Ústave geotechniky, Fakulty stavebnej VUT v Brne, pre predikciu správania vrтанých veľkopriemerových pilót.

V štvrtej časti je vyhodnotená a opísaná spätná analýza dvoch zaťažovacích skúšok pomocou už spomínaného programu, v ktorej bolo cieľom dosiahnuť rovnaké parametre pre medzné zaťažovacie krivky a prenosy síl v jednotlivých rezoch po dĺžke pilót nastávaním parametrov zeminy v okolí pilót.

## **KLÚČOVÉ SLOVÁ**

Geotechnika, metóda prenosových funkcií, veľkopriemerové vrтанé pilóty, medzná zaťažovacia krivka, plášťové trenie, počiatočná tuhosť, únosnosť v päte, spätná analýza.

## **ABSTRACT**

The thesis is divided into four parts. The first part is theoretical and consists of description of load-transfer method and its principal defined by (Reddy a další, 1998), where is explained calculating algorithm for predicting behaviour of loaded large-diameter bored piles.

In the second part are all information about analysed instrumented load tests including measured values, which are interpreted by tables and graphs of load-transfer curves, load transfers in individual sections and shear friction values along the pile. This part also includes analyses of the influence of the pile axial stiffness uncertainty.

The third part consists of parametric study. This study displays effects of different parameters on pile behaviour prediction during loading through load-transfer curves and load transfers in individual sections along the pile obtained from the programme developing at the Institute of Geotechnics, Faculty of Civil Engineering BUT in Brno, for large-diameter bored piles behaviour prediction.

In the fourth part is evaluation and description of back-analysis of two instrumented load tests by already mentioned programme. The goal in the back-analysis was to reach the same parameters of load-transfer curves and load transfers in individual sections along the pile by surrounding soil parameters adjusting.

## **KEYWORDS**

Geotechnics, load transfer method, large-diameter bored piles, load transfer curve, shear friction, initial stiffness, base resistance, back-analyses.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Matej Bírošík *Zpětná analýza zatěžovací zkoušky velkopřůměrové vrtané piloty s využitím metody přenosových funkcí*. Brno, 2020. 71 s., Bakalářská 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 bakalářské práce s názvem *Zpětná analýza zatěžovací zkoušky velkopřůměrové vrtané piloty s využitím metody přenosových funkcí* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 2. 6. 2020

---

Matej Bírošík  
autor práce

## PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Zpětná analýza zatěžovací zkoušky velkopřůměrové vrtané piloty s využitím metody přenosových funkcí* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 2. 6. 2020

---

Matej Bírošík  
autor práce

## **POĎAKOVANIE**

Chcel by som sa poďakovať vedúcemu práce pánovi Ing. Jurajovi Chalmovskému, Ph.D. za pomoc s výberom zaujímavej témy, za rady počas vypracovania práce a trpezlivosť. Taktiež by som chcel poďakovať mojej rodine a priateľom za podporu a motiváciu počas môjho štúdia.



## OBSAH

<b>1 ÚVOD .....</b>	<b>10</b>
<b>2 METÓDA PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ – PRINCÍP FUNGOVANIA.....</b>	<b>11</b>
<b>3 GEOTECHNICKÁ INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK .....</b>	<b>17</b>
a) Zaťažovacia skúška 1 – objekt D 4707 SO 210.....	17
i) Inžiniersko-geologické podmienky .....	18
ii) Charakteristika pilóty a vykonanej zaťažovacej skúšky .....	19
iii) Vyhodnotenie zaťažovacej skúšky .....	21
b) Zaťažovacia skúška 2 – objekt D 4704 SO 225.....	27
i) Inžiniersko-geologické podmienky .....	27
ii) Charakteristiky pilóty a vykonanej zaťažovacej skúšky.....	28
iii) Vyhodnotenie zaťažovacej skúšky .....	30
c) Analýza vplyvu neistoty osovej tuhosti pilóty na objekte SO 210.....	39
i) Premenný modul pružnosti betónu .....	39
ii) Premenný priemer pilóty .....	42
<b>4 PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA .....</b>	<b>45</b>
a) Pilóta s jednou vrstvou podložia .....	46
i) Ťahaná pilóta s priemerom 1,2 m. ....	46
ii) Tlačená pilóta s priemerom 1,2 m.....	49
iii) porovnanie ťahanej a tlačenej pilóty.....	51
b) Pilóta s dvoma vrstvami podložia.....	52
i) Ťahaná pilóta.....	52
ii) Tlačená pilóta .....	54
iii) porovnanie ťahanej a tlačenej pilóty.....	57
<b>5 SPÄTNÁ ANALÝZA.....</b>	<b>58</b>
a) Spätná analýza – D 4707 SO 210 .....	59
b) Spätná analýza – D 4704 SO 225 .....	62
<b>6 ZÁVER.....</b>	<b>65</b>
<b>7 POUŽITÉ ZDROJE .....</b>	<b>67</b>
<b>8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV.....</b>	<b>68</b>
<b>9 ZOZNAM OBRÁZKOV, TABULIEK A GRAFOV .....</b>	<b>69</b>

# 1 ÚVOD

Zaťažovacie skúšky veľkopriemerových vrтанých pilót patria v súčasnej dobe k vzácnym úlohám v stavebnom skúšobníctve. Tento trend je spôsobený hlavne finančnou a časovou náročnosťou zaťažovacích skúšok. Zaťažovacie skúšky je možné doplniť o tenzometre rozmiestnené rovnomerne po dĺžke pilóty. Z nameraných hodnôt tenzometrami je primárne možné zmerať pomerné pretvorenie v danom mieste pilóty. S rozvojom technológií sa v súčasnej dobe pri zaťažovacích skúškach používajú optické vlákna, ktoré umožňujú získanie týchto hodnôt po celej dĺžke pilóty v intervaloch pohybujúcich sa aj v desatinách milimetra. (Soga a ďalší, 2015)

Cieľom práce bolo spätne analyzovať už uskutočnené zaťažovacie skúšky na veľkopriemerových vrтанých pilótach, a to konkrétne na stavebných objektoch diaľnice D 47 SO 210 a SO 225. Postup práce bol nasledovný:

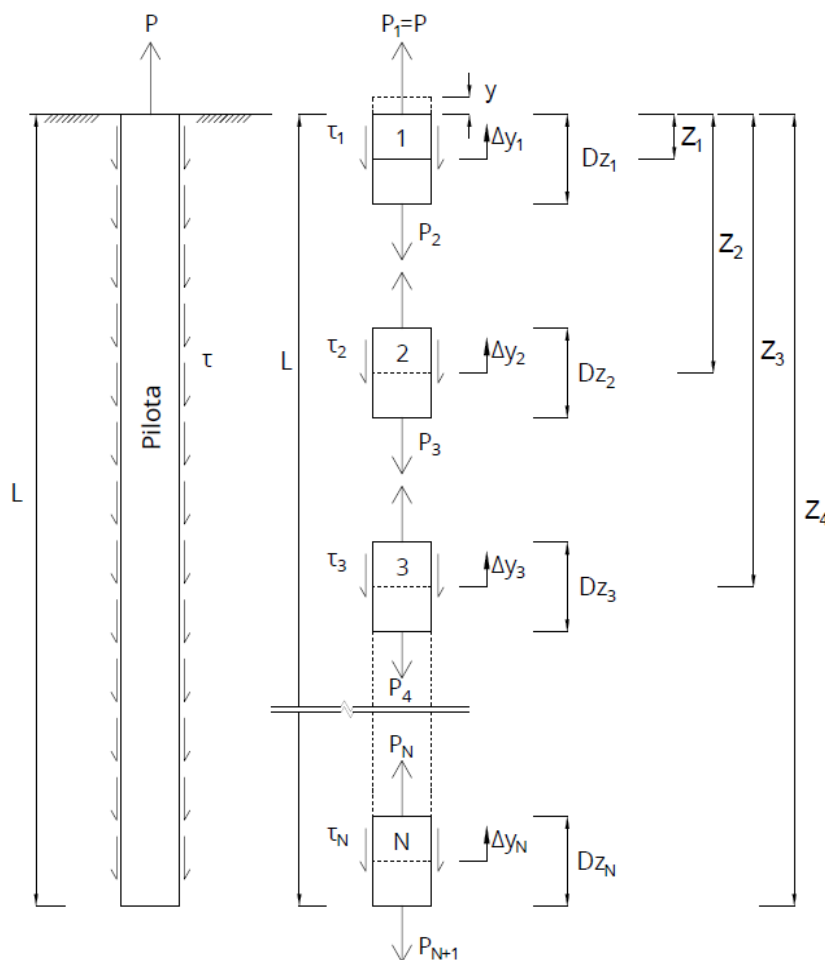
1. Vyhodnotil som zaťažovacie skúšky z dvoch lokalít. Zaťažované pilóty boli osadené snímačmi pomernej deformácie, čo umožnilo zostavenie rozdielov plášťového trenia po dĺžke pilóty.
2. Urobil som parametrickú štúdiu, ktorej cieľom bolo overiť funkčnosť predikcie programu pracujúceho na princípe metódy prenosových funkcií.
3. Ako posledné som urobil spätnú analýzu dvoch spomínaných zaťažovacích skúšok, pri ktorej som sa snažil nájsť vstupné a výstupné parametre, ktoré najviac odpovedali skutočne nameraným hodnotám.

## 2 METÓDA PRENOSOVÝCH FUNKCIÍ – PRINCÍP FUNGOVANIA

Informácie o princípe fungovania metódy prenosových funkcií v kapitole 2 boli čerpané z materiálu s názvom „Modified  $\tau - s$  model – a software for tension piles”. (Reddy a ďalší, 1998)

Algoritmus výpočtu metódou prenosových funkcií:

1. krok: rozdelenie pilóty na  $N$  – segmentov, ako je zobrazené v obrázku 2.1 a výpočet radiálneho napätia  $\sigma_{ri}$  v strede každého segmentu.



Obrázok 2.1 – výpočet zataženia a posunutia po dĺžke pilóty. Upravený na základe materiálu s názvom „Modified  $\tau - s$  model – a software for tension piles”. (Reddy a ďalší, 1998)

2. krok: obdržanie kriviek  $\tau - s$  s vykonaním miniatúrnych testov pilóty pre rozhranie medzi pilótou a zeminou pri medzných tlakoch rovnajúcich sa rôznym predpokladaným hodnotám radiálneho napätia  $\sigma_r$  v 1. kroku, ako je ukázané v obrázku 2.2.
3. krok: predpoklad ťahového zaťaženia  $P$  na hlavu pilóty a odhad posunu v hlave pilóty  $y$ . Z toho vyplýva, že zaťaženie na hornú hranu segmentu 1 ( $P_1$ ) =  $P$  a posun na hornej hrane segmentu 1 ( $y_1$ ) =  $y$ .
4. krok: s ohľadom na priemerné ťahové zaťaženie pôsobiace na segment 1 ako  $P_1$ , vzniká predpoklad na počiatočnú elastickú deformáciu segmentu 1 ( $e_1$ ) podľa rovnice 2.1,

$$e_1 = \frac{P_1 * \Delta z_1}{A * E_c} \quad (2.1)$$

kde  $A$  = prierezová plocha pilóty,  $E_c$  = Youngov modul pružnosti betónu pilóty a  $\Delta z_1$  = dĺžka segmentu 1.

5. krok: výpočet posunutia v strede segmentu 1 ( $\Delta y_1$ ) podľa rovnice 2.2.

$$\Delta y_1 = y_1 - \frac{e_1}{2} \quad (2.2)$$

6. krok: podľa krivky  $\tau - s$  a zodpovedajúcemu  $\sigma_{r1}$  (radiálne napätie na stred segmentu 1), obdržíme hodnoty  $\tau_1/\sigma_{r1}$  a odtiaľ  $\tau_1$  zodpovedajúce posunutiu  $\Delta y_1$ .
7. krok: výpočet zaťaženia preneseného segmentom 1 ( $S_1$ ) podľa rovnice 2.3,

$$S_1 = \tau_1 * (2 * \pi * R_0) * \Delta z_1 \quad (2.3)$$

kde  $R_0$  = polomer pilóty.

8. krok: výpočet priemerného zaťaženia pôsobiaceho na segment 1 podľa rovnice 2.4.

$$P_1' = P_1 - \frac{S_1}{2} \quad (2.4)$$

Pre toto priemerné zaťaženie je možné vypočítať hodnotu upravenej elastickej deformácie segmentu 1 ( $e_1$ ) podľa rovnice 2.5.

$$e_1 = \frac{\left(P_1 - \frac{S_1}{2}\right) * \Delta Z_1}{A * E_c} \quad (2.5)$$

9. krok: ak rozdiel medzi počiatočnou hodnotou elastickej deformácie ( $e_1$ ) (vypočítanej v 4. kroku v prvej iterácii) a upravenou hodnotou obdržanou v 8. kroku je väčší ako prípustný limit, opakuje sa 5. – 8. krok s hodnotu  $e_1$  vypočítanou v 8. kroku ako upravenou počiatočnou hodnotou.

10. krok: v momente, kedy je dosiahnutá zhoda hodnoty  $e_1$ , pokračuje sa na ďalší segment (segment 2). Zaťaženie na hornú hranu segmentu 2 sa vypočíta podľa rovnice 2.6 a posunutie na hornej hrane segmentu 2 podľa rovnice 2.7.

$$(P_2) = P_1 - S_1 \quad (2.6)$$

$$(y_2) = y_1 - e_1. \quad (2.7)$$

11. krok: predpoklad elastickej deformácie segmentu 2 ( $e_2$ ) za predpokladu  $P_2$  ako priemerného ťahového zaťaženia pôsobiaceho na segment 2. Výpočet posunutia v strede segmentu 2 ( $\Delta y_2$ ) podľa rovnice 2.8.

$$\Delta y_2 = y_2 - \frac{e_2}{2} \quad (2.8)$$

Potom nasleduje výpočet podľa 6. – 9. kroku pre segment 2.

12. krok: opakovanie 6. – 11. kroku pre segmenty 3, 4, 5, atď., až kým sa splní jedna z týchto podmienok:
- i) zaťaženie v úrovni hornej hrany segmentu bude 0,
  - ii) posunutie v úrovni hornej hrany segmentu bude 0,
  - iii) dosiahne sa päta pilóty.
13. krok: ak bude zaťaženie v úrovni hornej hrany stredového segmentu 0, treba skontrolovať posunutie v tomto mieste. Ak je posunutie v tomto mieste 0, pokračuje sa v 14. kroku, v opačnom prípade sa musí upraviť predpokladané posunutie v hlave pilóty ( $y$ ) a opakovať 4. – 12. krok. Ak je niektorá z podmienok (ii) alebo (iii) splnená, pokračuje sa v 14. kroku.
14. krok: výpočet súčtu zaťažení prenesených jednotlivými segmentami ( $P_S$ ) podľa rovnice 2.9.

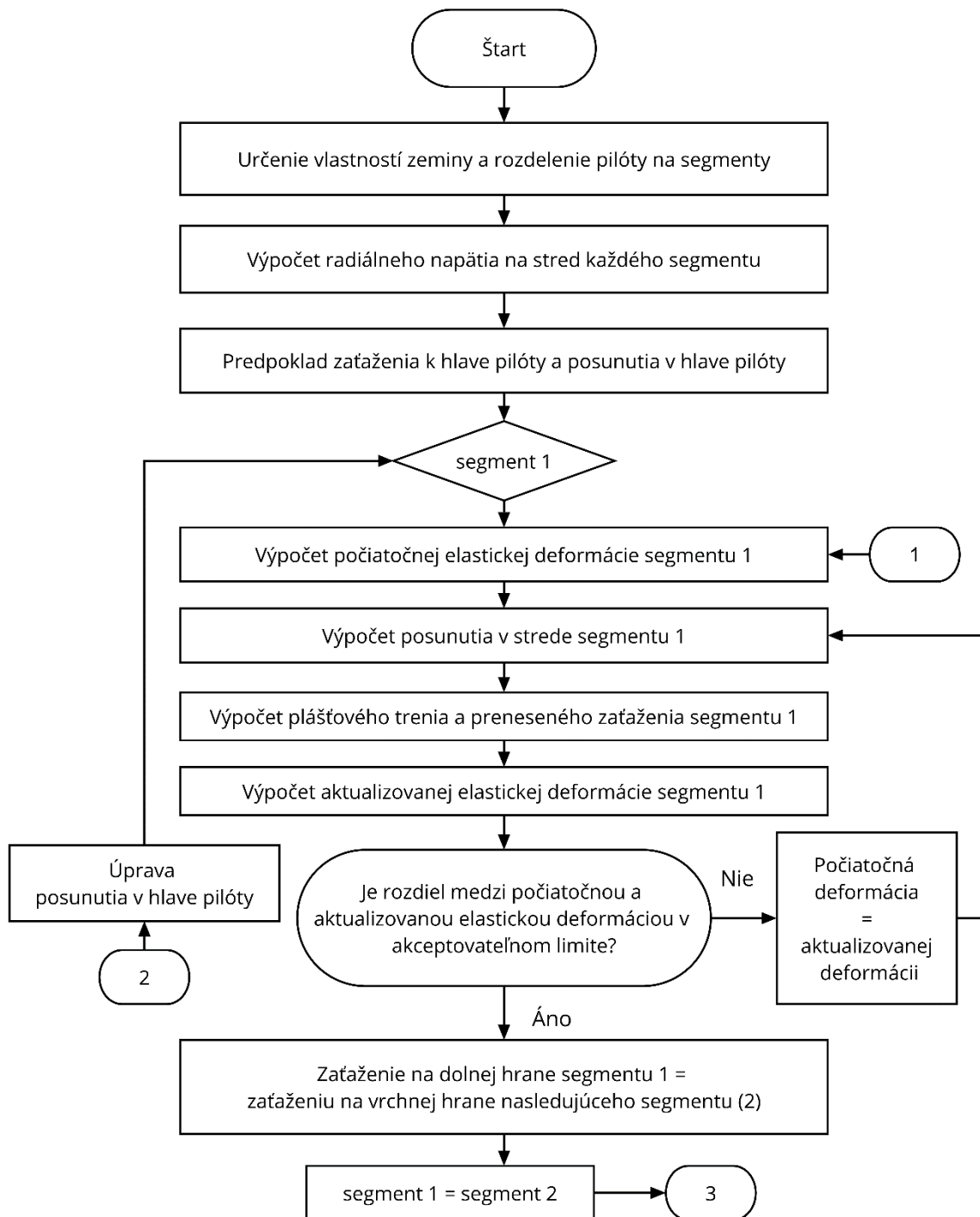
$$P_S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + \dots + S_N. \quad (2.9)$$

Ak je rozdiel medzi predpokladaným zaťažením ( $P$ ) a vypočítaným zaťažením ( $P_S$ ) väčší ako prípustný limit, opakujú sa 4. – 13. krok s upravenou hodnotou posunutia v hlave pilóty ( $y$ ).

15. krok: zhoda medzi  $P$  a  $P_S$  poskytne zaťaženie ( $P_S$ ) a zodpovedajúce posunutie v hlave pilóty ( $y$ ).
16. krok: opakovaním 3. – 15. kroku pre rôzne zaťaženia obdržíme zodpovedajúce posunutie v hlave pilóty, ktoré nám poskytne dáta pre medznú zaťažovaciu krivku pilóty.

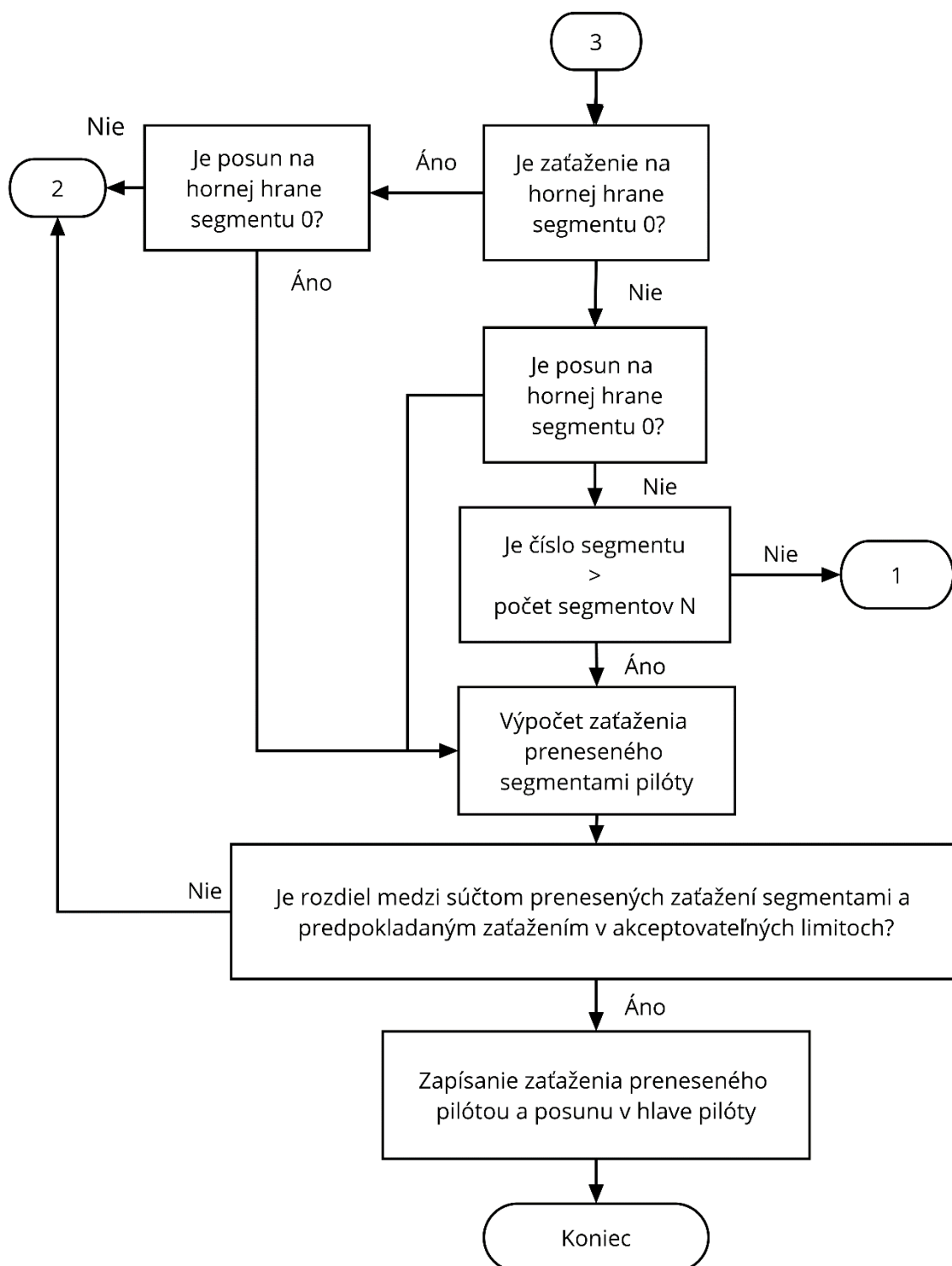
Postup k algoritmu výpočtu metódou prenosových funkcií uvedeného postupu je zobrazený aj v obrázkoch 2.2 a 2.3. Tento algoritmus je aplikovateľný aj na tlačnú pilótu, kde dochádza navyše k priradeniu prenosovej funkcie k päte pilóty. Prenosová funkcia môže mať tvar hyperboly bez alebo so zmäkčením. Predikcia použitá v práci pracuje s hyperbolickým tvarom bez zmäkčenia (Graf 4.5).

Metóda prenosových funkcií, 1. časť



Obrázok 2.2 – diagram metódy prenosových funkcií, 1. časť.

### Metóda prenosových funkcií, 2. časť



Obrázok 2.3 – diagram metódy prenosových funkcií, 2. časť.



### 3 GEOTECHNICKÁ INTERPRETÁCIA VÝSLEDKOV ZAŤAŽOVACÍCH SKÚŠOK

#### a) Zaťažovacia skúška 1 – objekt D 4707 SO 210

Všetky údaje o zaťažovacej skúške na objekte D 4707 SO 210 v odseku a) sú čerpané zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky. (SKANSKA, 2005)

Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vrtanej pilóte s priemerom 1200 mm. Pilóta je ako hlbinný základ pre most na diaľnici D47 cez cestu I/47. Stavebný objekt pilóty je značený ako SO 210. Dátum uskutočnenia zaťažovacej skúšky je 1. – 2.2.2005.

i) Inžiniersko-geologické podmienky

Popis zemín je v zmysle ČSN 721001, 721002, 731001. Geologický profil bol popísaný pri vŕtaní pilóty 14.12.2005. Stanovený bol nasledovne (Tabuľka 3.1):

Hĺbka [m]	Vrstva
0,0 – 2,0	Íl stredne plastický, šedohnedý, mäkkej až tuhej konzistencie.
2,0 – 3,5	Íl piesčitý, hrdzavohnedý, piesok veľmi jemnozrnný, mäkkej konzistencie.
3,5 – 4,5	Íl stredne plastický, hrdzavošedý, mäkkej až tuhej konzistencie.
4,5 – 5,0	Íl stredne plastický, tmavošedý, tuhej až pevnej konzistencie.
5,0 – 5,5	Íl vysoko plastický, šedý, tuhej konzistencie.
5,5 – 7,0	Íl vysoko plastický, šedý, tuhej konzistencie.
7,0 – 9,0	Íl stredne plastický, šedý, tuhej konzistencie.
9,0 – 10,5	Íl vysoko plastický, šedo zelený, tuhej konzistencie, s čriepkami neogénneho ílu s tenkými vrstvami jemnozrnného piesku.
10,5 – 11,5	Íl vysoko plastický, šedo zelený, tuhej konzistencie, s tenkými vrstvami jemnozrnného piesku. Prechod do neogénneho ílu.
11,5 – 13,0	Íl vysoko plastický, šedo zelený, pevnej konzistencie, neogén.
13,0 – 16,0	Íl vysoko plastický, šedo zelený, pevnej až tvrdej konzistencie, prechod do spevnených ílovcov.

*Tabuľka 3.1 – geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4707 SO 210.*

Podzemná voda nebola narazená. V hĺbke 8,5 m bol priesak vody na dne a pod okrajom pažnice.

Pre výpočet bol geologický profil zjednodušený a zjednotený. (Tabuľka 3.2)

Hĺbka [m]	Vrstva
0,0 - 4,5	1 - Íl stredne plastický šedohnedý, mäkkej až tuhej konzistencie.
4,5 - 9,0	2 - Íl vysoko plastický, šedý, tuhej konzistencie.
9,0 - 11,5	3 - Íl vysoko plastický, šedozelený, tuhej konzistencie s tenkými vrstvami jemnozrnného piesku. Prechod do neogénneho ílu.
11,5 - 16,0	4 - Íl vysoko plastický, šedozelený, pevnej konzistencie, neogénny, prechod do spevnených ílovcov.

Tabuľka 3.2 – zjednotený geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4707 SO 210.

ii) Charakteristika pilóty a vykonanej zaťažovacej skúšky

Predpokladané zvislé zaťaženie pilóty bolo uvažované približne 6500 kN. Pilóta bola vrтанá s dvojplášťovým oceľovým pažením a použitý bol betón C30/37 a odolnosťou v agresívnom prostredí XA3, S4.

Pre stanovenie pomerného pretvorenia 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 merací lis pre stanovenie prenosu sily (všetky hĺbky sú uvedené od úrovne terénu). Zaťažovacia sila bola počas zaťažovacej skúšky vyvedená štyrmi hydraulickými lisami. Každý z lisov mohol vyvodiť silu 2500 kN. Reakcia bola prenesená pomocou ôsmich zemných šesťlanových kotiev dĺžky 24 m s dĺžkou koreňa 9 m v ideálnom sklone od zvislice 25°.

Pri vykonávaní zaťažovacej skúšky boli volené nižšie hodnoty zaťažovacích stupňov (približne 60 %), z dôvodu očakávania nadmernej deformácie už pri nižších silách ako boli projektom predpokladané.

Meranie sily bolo uskutočnené primárne pomocou:

- tlaku v hydraulickej sústave,
- dynamometrov pod lismi,
- nepriamym meraním pomocou predĺženia zväzkov zemných kotiev.

Primárne merané deformácie:

- posunutie v hlave pilóty – 4 ks indukčných metrov.

Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov (ZS) sú popísané v tabuľke 3.3.

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

*Tabuľka 3.3 – hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu D 4707 SO 210.*

Zaťažovacia skúška bola ukončená po šiestom zaťažovacom stave pri sile 3985 kN a neustálenom posunutí pilóty približne 30 mm. Po odľahčení bolo stále posunutie v hlave 24,40 mm, pri zvyškovej sile 21 kN.

iii) Vyhodnotenie zaťažovacej skúšky

- Maximálna dosiahnutá sila 3958 kN
- Maximálne neustálené posunutie v hlave 29,93 mm
  
- Maximálna dosiahnutá ustálená sila 3484 kN
- Maximálne ustálené posunutie v hlave 19,56 mm

Na základe nameraných hodnôt a z priebehu zaťažovacej krivky je možné určiť smernú únosnosť  $U_{con} \leq 3750$  kN, pri zvislom pretvorení pilóty 25 mm. Statickým výpočtom bola stanovená únosnosť zodpovedajúca tomuto posunutiu v hlave pilóty na  $U_{pu} = 3900$  kN.

Zo zaťažovacej skúšky je možné určiť aj smernú únosnosť  $U_{con} \div 2707$  kN, pri zvislom prípustnom pretvorení pilóty 10 mm. Potom by bola zvislá výpočtová únosnosť osamelej pilóty podľa ČSN 73 1002  $U_{vd} \div 2460$  kN.

Namerané hodnoty síl dynamometrami pre jednotlivé zaťažovacie stavy sú uvedené v tabuľke 3.4.

Dynamometer 1 [kN]	Dynamometer 2 [kN]	Dynamometer 3 [kN]	Dynamometer 4 [kN]	ZS
165	176	125	176	I
321	341	274	342	II
489	520	442	518	III
678	708	616	705	IV
848	952	793	891	V
969	1092	912	1012	VI
Po odľahčení a ustálení				
17	-9	6	5	po II
14	-3	9	11	po IV
15	-5	13	-2	po VI

Tabuľka 3.4 – namerané hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch objektu D 4707 SO 210.

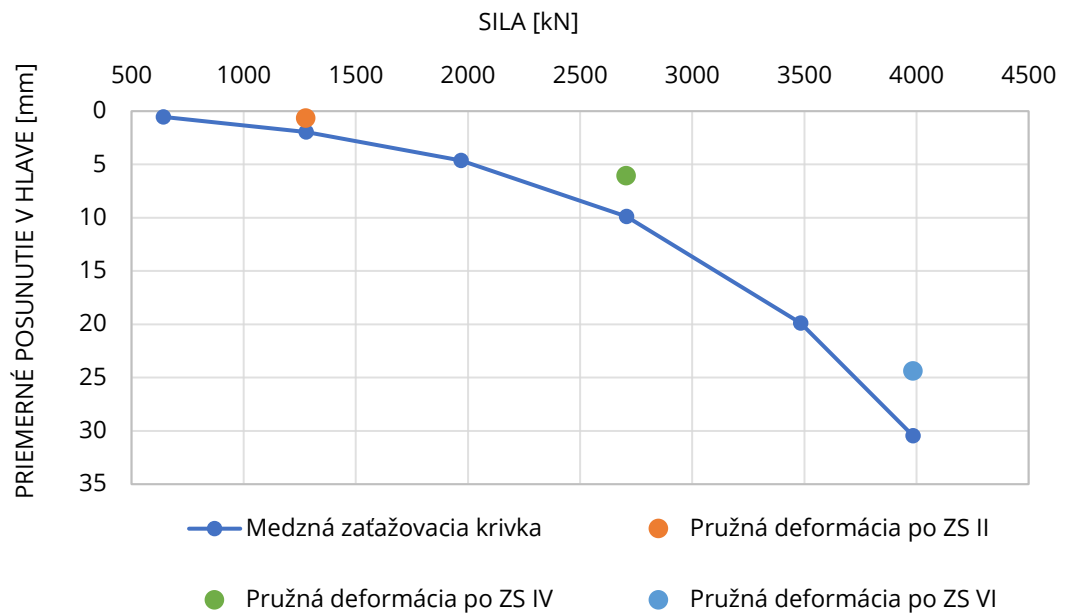
Namerané hodnoty posunutia v hlave pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy sú uvedené v tabuľke 3.5.

ZS	Celková sila [kN]	Posunutie A [mm]	Posunutie B [mm]	Posunutie C [mm]	Posunutie D [mm]	Priemerné posunutie [mm]
I	642	0,40	0,62	0,59	0,55	0,54
II	1278	1,76	2,06	2,06	1,97	1,96
III	1969	4,30	4,70	4,67	4,83	4,63
IV	2707	9,50	10,01	10,03	10,04	9,90
V	3484	19,01	19,56	21,16	19,81	19,89
VI	3985	29,59	29,77	32,06	30,44	30,47
<b>Po odľahčení a ustálení</b>						
po II	19	0,51	0,76	0,72	0,68	0,67
po IV	31	5,74	6,03	6,27	6,26	6,08
po VI	21	23,91	23,92	25,73	24,03	24,40

*Tabuľka 3.5 – namerané hodnoty posunutí v hlave pilóty v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.*

Z nameraných hodnôt bola stanovená krivka závislosti medzi priemerným posunutím v hlave pilóty a silami v daných zaťažovacích stavoch. Táto krivka sa nazýva medzná zaťažovacia krivka (Graf 3.1). Tri body predstavujú pružnú deformáciu a teda hodnotu priemerného posunutia v hlave, ktorú dosiahla pilóta po odľahčení. Po druhom zaťažovacom stave (ZS II) dosiahla pilóta pružnú deformáciu 1,30 mm, po štvrtom zaťažovacom stave (ZS IV) 3,82 mm a po šiestom zaťažovacom stave (ZS VI) 6,07 mm.

## MEDZNÁ ZAŤAŽOVACIA KRIVKA



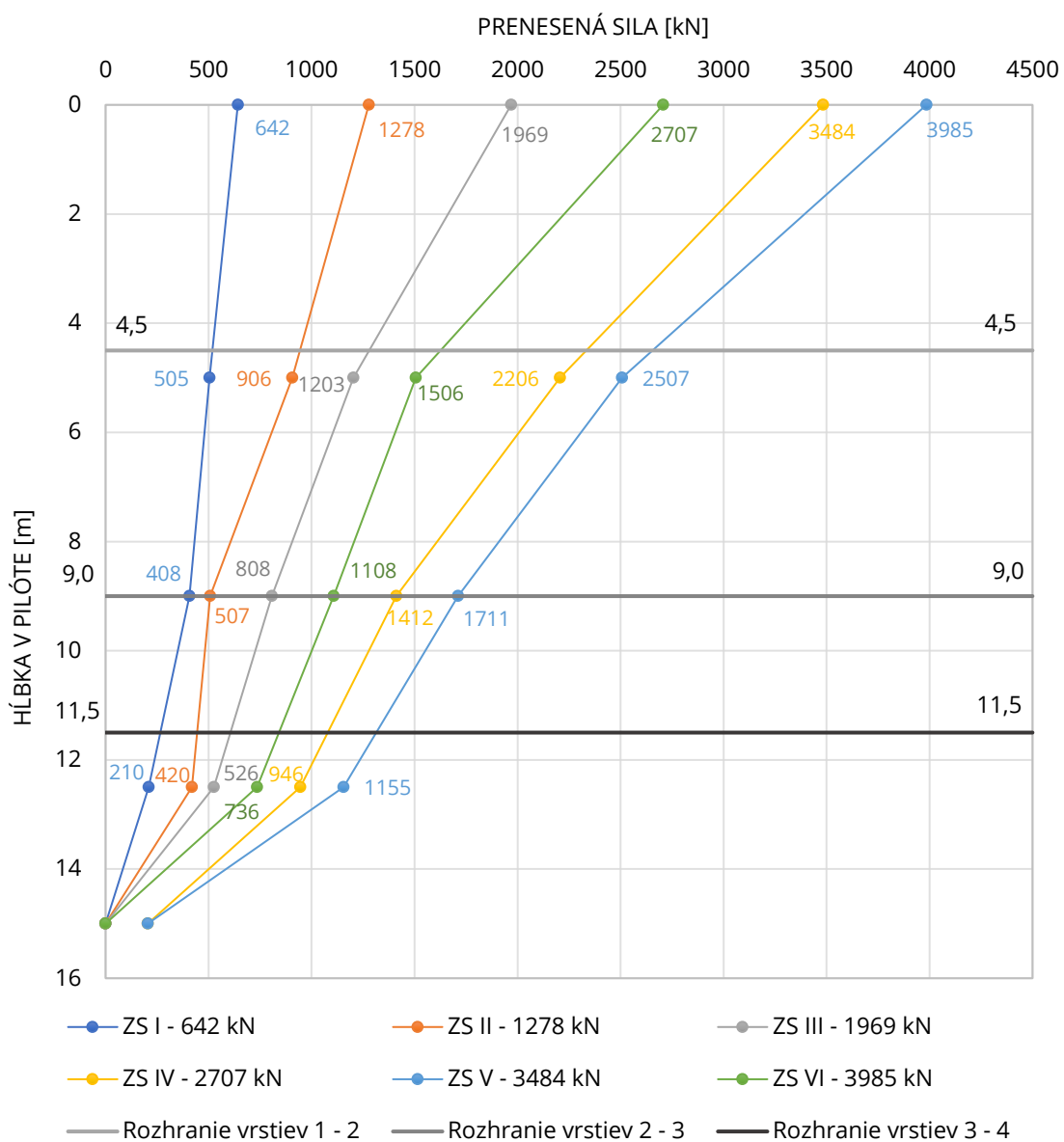
Graf 3.1 – medzná zaťažovacia krivka objektu D 4707 SO 210.

Ďalej boli po zaťažovacej skúške pomocou modulu pružnosti, plochy pilóty v priečnom reze a zmeraného pomerného pretvorenia vypočítané prenesené sily po dĺžke pilóty v hĺbkach umiestnených tenzometrov v jednotlivých zaťažovacích stavoch. Hodnoty prenesených síl po dĺžke pilóty sú uvedené v tabuľke 3.6 a graficky znázornené v grafe 3.2.

Hĺbka v pilóte [m]	ZS I [kN]	ZS II [kN]	ZS III [kN]	ZS IV [kN]	ZS V [kN]	ZS VI [kN]
0	642	1278	1969	2707	3484	3985
5	505	906	1203	1506	2206	2507
9	408	507	808	1108	1412	1711
12,5	210	420	526	736	946	1155
15	0	0	0	0	205	205

Tabuľka 3.6 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4707 SO 210.

## PRENOS SILY V JEDNOTLIVÝCH HÍBKACH A ZAŤAŽOVACÍCH STAVOCH



Graf 3.2 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4707 SO 210.

Pomocou zmeraných prenesených síl je možné určiť plášťové trenie na segmentoch pilóty. Segment pilóty je určený umiestnením tenzometrov po dĺžke pilóty. Prvý krok pozostáva z určenia hodnôt rozdielu prenesených síl medzi tenzometrami.



Sily prenesené jednotlivými segmentami sú značené ako  $\Delta F$  a sú uvedené v tabuľke 3.7. Dĺžky segmentov, na ktorých boli merané prenesené sily sú značené ako  $\Delta z$ .

		$\Delta F$ [kN]					
$\Delta z$ [m]	Rozmedzie hĺbky [m]	ZS I 642 kN	ZS II 1278 kN	ZS III 1969 kN	ZS IV 2707 kN	ZS V 3484 kN	ZS VI 3985 kN
5	0 - 5	137	372	766	1201	1278	1478
4	5 - 9	97	399	395	398	794	796
3,5	9 - 12,5	198	87	282	372	466	556
2,5	12,5 - 15	210	420	526	736	741	950

Tabuľka 3.7 – rozdiely síl na hornej a dolnej hrane segmentov v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.

Z rozdielov síl  $\Delta F$  a dĺžky segmentov  $\Delta z$  je možné určiť priebehy plášťových trení po dĺžke pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy podľa rovnice 3.1.

$$\tau_i = \frac{\Delta F_i}{\pi * d * \Delta z_i} \quad (3.1)$$

$\tau_i$  plášťové trenie na jednotlivých segmentoch,

$\Delta F_i$  prenesená sila daného segmentu,

$d$  priemer pilóty (1,2 m),

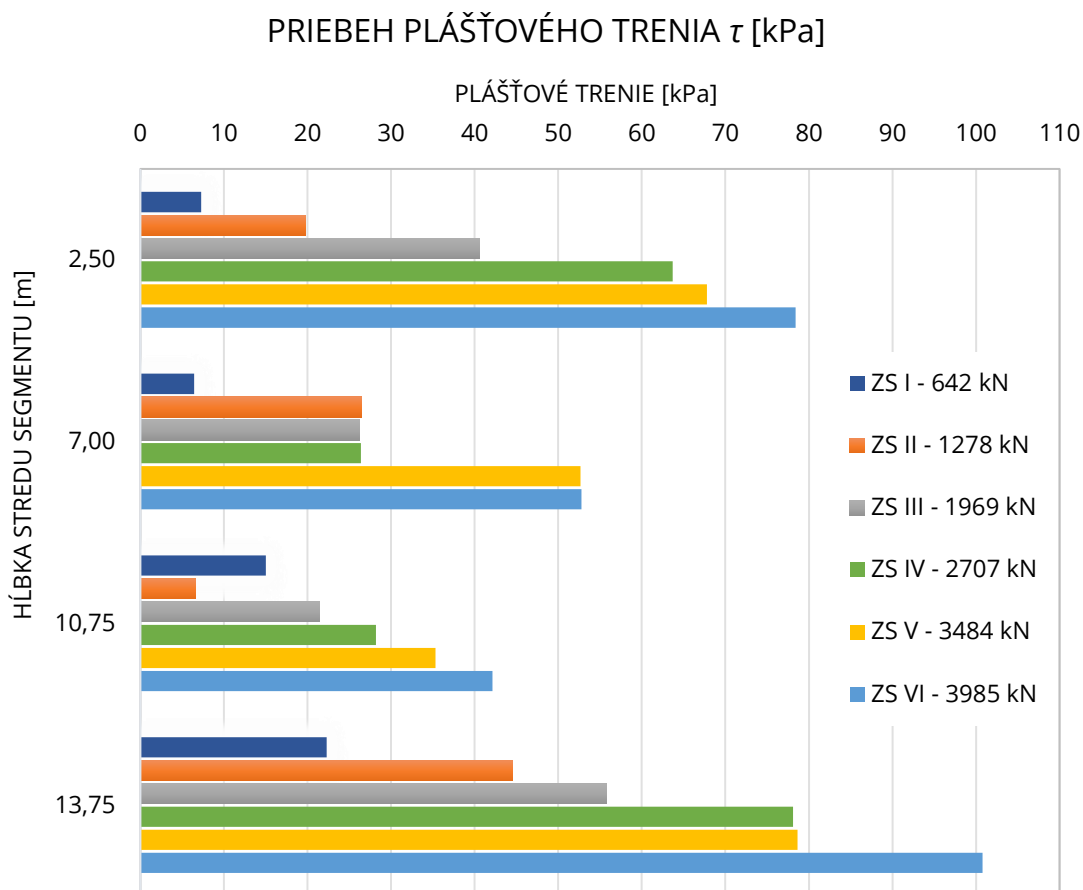
$\Delta z_i$  dĺžka jednotlivých segmentov.

Vypočítané hodnoty plášťových trení podľa rovnice (3.1) sú uvedené v tabuľke 3.8.

Plášťové trenie $\tau$ [kPa]						
Rozmedzie hĺbky [m]	ZS I 642 kN	ZS II 1278 kN	ZS III 1969 kN	ZS IV 2707 kN	ZS V 3484 kN	ZS VI 3985 kN
0 - 5	7,27	19,74	40,64	63,72	67,80	78,41
5 - 9	6,43	26,46	26,19	26,39	52,65	52,79
9 - 12,5	15,01	6,59	21,37	28,19	35,32	42,14
12,5 - 15	22,28	44,56	55,81	78,09	78,62	100,80

Tabuľka 3.8 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.

Grafické znázornenie priebehu plášťových trení je v grafe 3.3. Zobrazené sú hodnoty plášťových trení na jednotlivých segmentoch v jednotlivých zaťažovacích stavoch.



Graf 3.3 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.

## b) Zaťažovacia skúška 2 – objekt D 4704 SO 225

Všetky údaje o zaťažovacej skúške na objekte D 4707 SO 225 v odseku b) sú čerpané zo záverečnej správy zaťažovacej skúšky. (SKANSKA, 2006)

Zaťažovacia skúška bola uskutočnená na vrtanej pilóte s priemerom 940 mm. Pilóta je ako hlbinný základ pre most na diaľnici D47 km 1,452 cez trať Českých dráh. Stavebný objekt pilóty je značený ako SO 225. Dátum uskutočnenia zaťažovacej skúšky: 20. – 21.4.2006.

### i) Inžiniersko-geologické podmienky

Pre mostný objekt bol spracovaný podrobný geotechnický prieskum. (Geotest, a.s., Brno, 2001) Geotechnický profil z podrobného prieskumu sa zhodoval s profilom stanoveným pri vrtaní pilóty. Popis zemín je v zmysle ČSN 721001, 721002, 731001. Stanovený bol nasledovne (Tabuľka 3.9):

Hĺbka [m]	Vrstva
0,0 – 2,0	Hlina šedohnedá, tuhej konzistencie.
2,0 – 4,5	Íl tmavý, organický, tuhej až mäkkej konzistencie.
4,5 – 5,5	Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej až mäkkej konzistencie.
4,5 – 5,0	Íl stredne plastický, tmavošedý, tuhej až pevnej konzistencie.
5,5 – 13,0	Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej konzistencie.
13,0 – 15,0	Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej až pevnej konzistencie, s ojedinelou prímiesou úlomkov pieskovca.
15,0 – 19,2	Íl prachovito piesčitý, šedý, pevnej konzistencie.

Tabuľka 3.9 – geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225.

Podzemná voda bola narazená v hĺbke 3,5 m.

Pre výpočet bol geologický profil zjednodušený a zjednotený. (Tabuľka 3.10)

Hĺbka [m]	Vrstva
0,0 – 2,0	1 – Hlina šedohnedá, tuhej konzistencie.
2,0 – 4,5	2 - Íl tmavý, organický, tuhej až mäkkej konzistencie..
4,5 - 13,0	3 - Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej až mäkkej konzistencie.
13,0 – 19,2	4 - Íl prachovito piesčitý, šedý, tuhej až pevnej konzistencie, v rozmedzí 13,0 – 15,0 m s ojedinelou prímесou úlomkov pieskovca.

Tabuľka 3.10 – zjednotený geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225.

ii) Charakteristiky pilóty a vykonanej zaťažovacej skúšky

Predpokladané zvislé zaťaženie pilóty bolo uvažované približne 3600 kN. Podľa projektu sa uvažuje maximálne prevádzkové zaťaženie systémovej pilóty 3615 kN. Pilóta bola vrтанá s oceľovým pažením. Použitý bol betón C25/30 s odolnosťou v agresívnom prostredí XA1. Od hlavy pilóty do hĺbky 4,35 m bola pilóta opatrená separáciou od okolitého prostredia z dôvodu dosiahnutia skutočnej základovej škáry. V separácii mala pilóta priemer 0,7 m. Celková dĺžka pilóty je 19,35 m, účinná dĺžka pilóty je 15 m.

Pre stanovenie pomerného pretvorenia 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 merací lis pre stanovenie prenosu sily (všetky hĺbky sú uvedené od hlavy pilóty). Zaťažovacia sila bola počas zaťažovacej skúšky vyvodená štyrmi hydraulickými lismi. Každý z lisov mohol vyvodiť silu 2500 kN. Reakcia bola zachytená pomocou ôsmych zemných šesťlanových kotiev v ideálnom sklone od zvislice 25°.

Meranie sily bolo uskutočnené primárne pomocou:

- tlaku v hydraulickej sústave,
- dynamometrov pod lismi.

Primárne merané deformácie:

- posunutie v hlave pilóty – 4 ks indukčných metrov,

Hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov (ZS) sú popísané v tabuľke 3.11.

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

*Tabuľka 3.11 – hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225.*

iii) Vyhodnotenie zaťažovacej skúšky

• Maximálna dosiahnutá sila	5468 kN
• Maximálne neustálené posunutie v hlave	37,61 mm
• Po korekcii posunutia meracích základní	39,32 mm
• Maximálna dosiahnutá ustálená sila	4923 kN
• Maximálne ustálené posunutie v hlave	27,70 mm
• Po korekcii posunutia meracích základní	29,65 mm

Na základe nameraných hodnôt a z priebehu zaťažovacej krivky je možné určiť smernú únosnosť  $U_{con} \leq 4600$  kN.

Zvislá výpočtová únosnosť osamelej pilóty podľa ČSN 73 1002 je

$U_{vd} = 4182$  kN, čomu zodpovedá vyrovnané posunutie v hlave pilóty približne 18,5 mm.

Namerané hodnoty síl dynamometrami pre jednotlivé zaťažovacie stavy sú uvedené v tabuľke 3.12.

Dynamometer 1 [kN]	Dynamometer 2 [kN]	Dynamometer 3 [kN]	Dynamometer 4 [kN]	ZS
155	159	109	140	I
258	269	216	248	II
347	361	308	342	III
444	457	412	446	IV
539	560	503	552	V
644	665	605	665	VI
738	762	702	770	VII
827	854	788	872	VIII
932	968	887	980	IX
1036	1066	985	1088	X
1216	1263	1179	1265	XI
1349	1408	1307	1404	XII
<b>Po odľahčení a ustálení</b>				
15	7	-12	5	po III
13	6	-15	5	po V
12	3	-18	5	po VIII
8	3	-26	47	po X
0	0	0	0	po XII

*Tabuľka 3.12 – namerané hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch objektu D 4704 SO 225.*

Namerané hodnoty posunutia v hlave pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy sú uvedené v tabuľke 3.13.

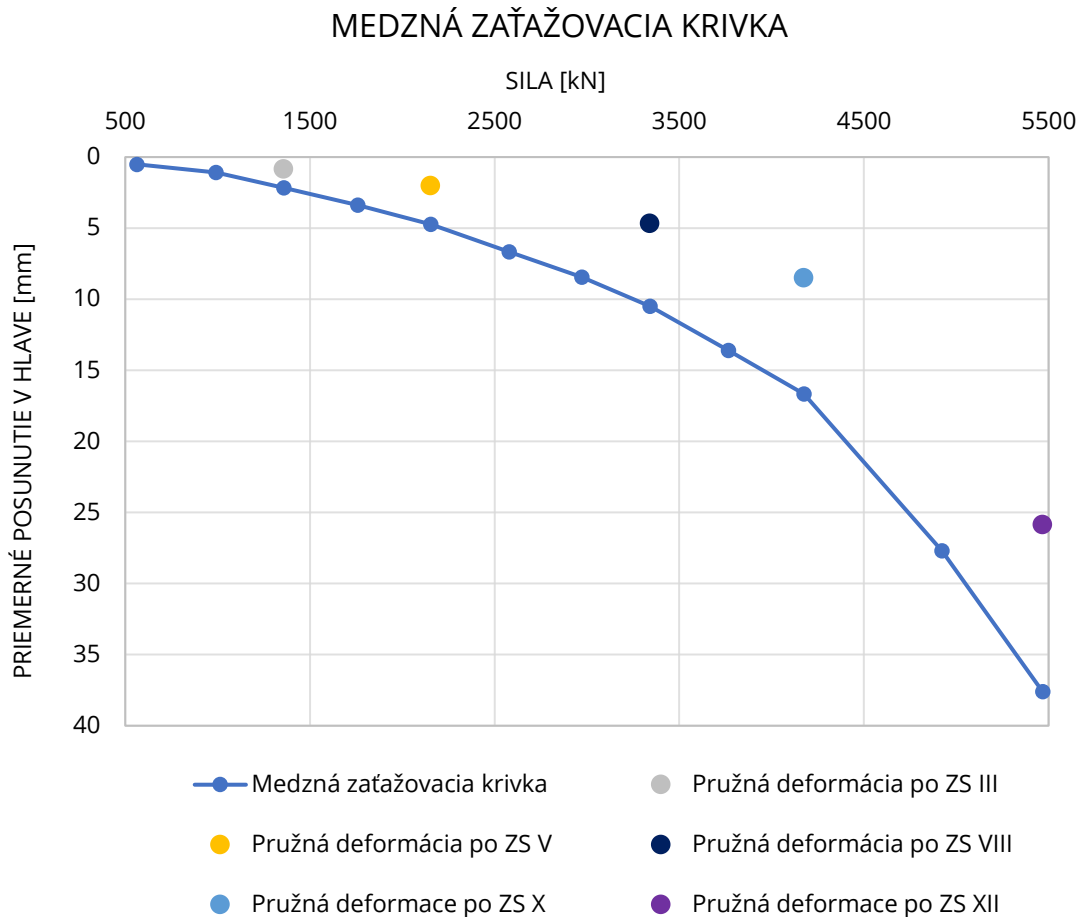
ZS	Celková sila [kN]	Posunutie A [mm]	Posunutie B [mm]	Posunutie C [mm]	Posunutie D [mm]	Priemerné posunutie [mm]
I	563	0,52	0,53	0,48	0,51	0,51
II	991	1,06	1,10	1,12	1,08	1,09
III	1358	2,11	2,16	2,25	2,14	2,17
IV	1759	3,28	3,39	3,51	3,34	3,38
V	2154	4,59	4,86	4,83	4,65	4,73
VI	2579	6,49	6,83	6,85	6,54	6,68
VII	2972	8,31	8,64	8,56	8,29	8,45
VIII	3341	10,40	10,62	10,61	10,38	10,50
IX	3767	13,41	13,73	13,80	13,45	13,60
X	4175	16,41	16,81	16,95	16,48	16,66
XI	4923	27,31	28,05	28,07	27,38	27,70
XII	5468	37,26	38,06	38,00	37,12	37,61
<b>Po odľahčení a ustálení</b>						
po III	15	0,89	0,85	0,84	0,79	0,84
po V	9	1,98	2,12	2,06	1,87	2,01
po VIII	2	4,77	4,82	4,65	4,49	4,68
po X	32	8,49	8,56	8,44	8,50	8,50
po XII	0	25,90	26,06	25,91	25,58	25,86

*Tabuľka 3.13 – namerané hodnoty posunutí v hlave pilóty v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225.*

Na základe nameraných hodnôt bola stanovená krivka závislosti medzi priemerným posunutím v hlave pilóty a silami v daných zaťažovacích stavoch (Graf 3.4). Päť bodov predstavuje pružnú deformáciu a teda hodnotu priemerného posunutia v hlave, ktorú dosiahla pilóta po odľahčení.



Po treťom zaťažovacom stave (ZS III) dosiahla pilóta pružnú deformáciu 1,33 mm, po piatom zaťažovacom stave (ZS V) 2,72 mm, po ôsmom zaťažovacom stave (ZS VIII) 5,82 mm, po desiatom zaťažovacom stave (ZS X) 8,16 mm a po dvanástom zaťažovacom stave (ZS XII) 11,75 mm.



*Graf 3.4 – medzná zaťažovacia krivka objektu D 4704 SO 225.*

Ďalej boli po zaťažovacej skúške pomocou modulu pružnosti, plochy pilóty v priečnom reze a zmeraného pomerného pretvorenia vypočítané prenesené sily v hĺbkach umiestnených tenzometrov v jednotlivých zaťažovacích stavoch. Hodnoty prenesených síl sú uvedené v tabuľkách 3.14 a 3.15, a graficky znázornené v grafe 3.5.

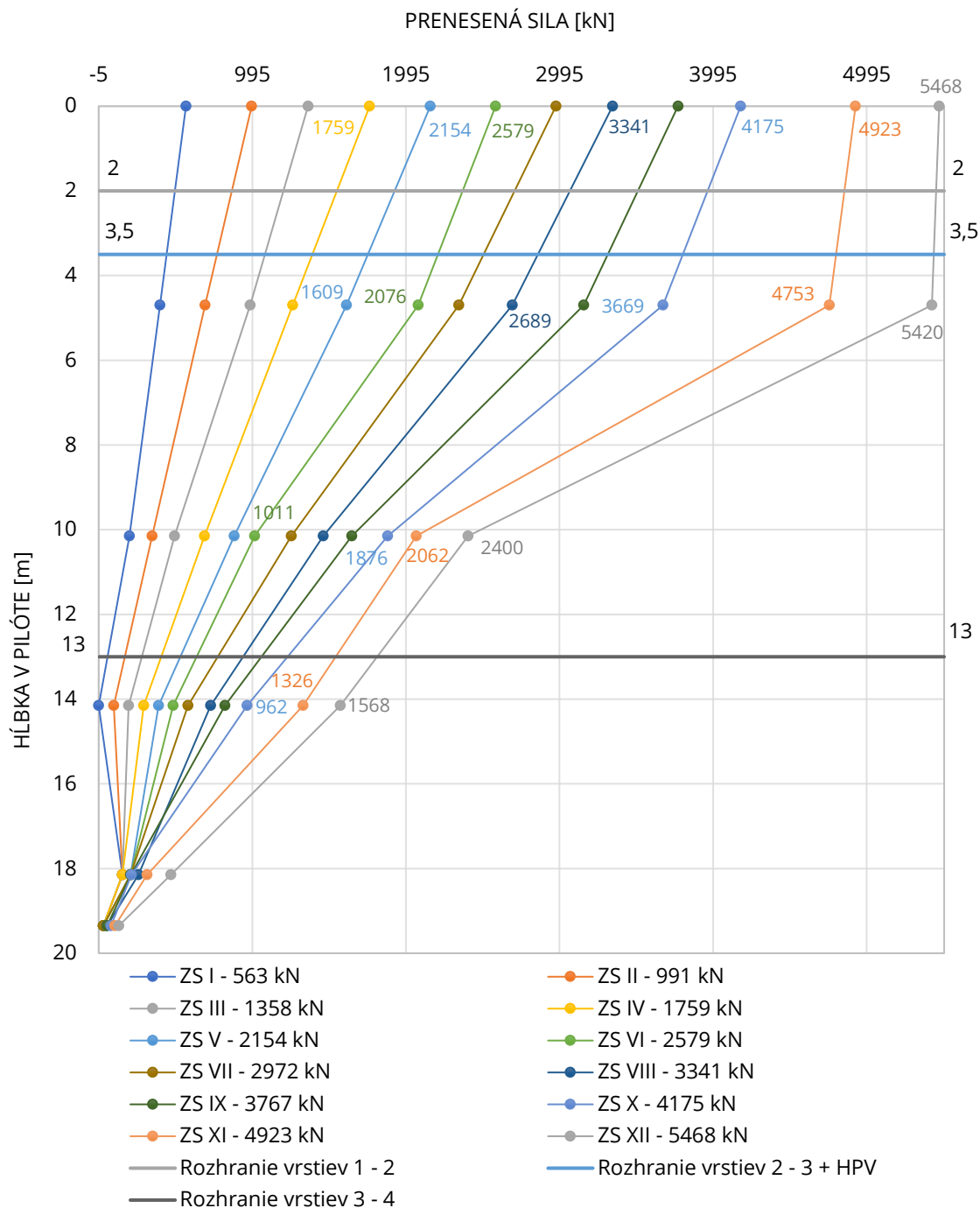
Hĺbka v pilóte [m]	ZS I [kN]	ZS II [kN]	ZS III [kN]	ZS IV [kN]	ZS V [kN]	ZS VI [kN]
0	563	991	1358	1759	2154	2579
4,7	394	688	981	1258	1609	2076
10,15	196	343	489	684	878	1011
14,15	-5	93	190	288	385	480
18,15	150	150	150	150	202	202
19,35	25	25	25	25	25	25

*Tabuľka 3.14 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4704 SO 225, časť 1.*

Hĺbka v pilóte [m]	ZS VII [kN]	ZS VIII [kN]	ZS IX [kN]	ZS X [kN]	ZS XI [kN]	ZS XII [kN]
0	2972	3341	3767	4175	4923	5468
4,7	2340	2689	3154	3669	4753	5420
10,15	1250	1458	1644	1876	2062	2400
14,15	577	724	818	962	1326	1568
18,15	202	254	205	208	311	466
19,35	25	50	50	75	101	126

*Tabuľka 3.15 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4704 SO 225, časť 2.*

## PRENOS SILY V JEDNOTLIVÝCH HĽBKACH A ZAŤAŽOVACÍCH STAVOCH



Graf 3.5 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4704 SO 225.

Účinnosť separácie od hlavy pilóty do hĺbky 4,35 m nebola dokonalá, ale únosnosť tým nebola výrazne ovplyvnená. Pomocou zmeraných prenesených síl je možné určiť plášťové trenie na segmentoch pilóty.

Segment pilóty je určený umiestnením tenzometrov po dĺžke pilóty. Prvý krok pozostáva z určenia hodnôt rozdielu prenesených síl medzi tenzometrami. Sily prenesené jednotlivými segmentami sú značené ako  $\Delta F$  a sú uvedené v tabuľkách 3.16 a 3.17. Dĺžky segmentov, na ktorých boli merané prenesené sily sú značené ako  $\Delta z$ .

$\Delta F$ [kN]							
$\Delta z$ [m]	Rozmedzie hĺbky [m]	ZS I 563 kN	ZS II 991 kN	ZS III 1358 kN	ZS IV 1759 kN	ZS V 2154 kN	ZS VI 2579 kN
4,7	0 – 4,7	169	303	377	501	545	503
5,5	4,7 – 10,15	198	345	492	574	731	1065
4,0	10,15 – 14,15	201	250	299	396	493	531
4,0	14,15 – 18,15	-155	-57	40	138	183	278
1,2	18,15 – 19,35	125	125	125	125	177	177

Tabuľka 3.16<sup>1</sup> – rozdiely síl na hornej a dolnej hrane segmentov v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 1.

$\Delta F$ [kN]							
$\Delta z$ [m]	Rozmedzie hĺbky [m]	ZS VII 2972 kN	ZS VIII 3341 kN	ZS IX 3767 kN	ZS X 4175 kN	ZS XI 4923 kN	ZS XII 5468 kN
4,7	0 – 4,7	632	652	613	506	170	48
5,5	4,7 – 10,15	1090	1231	1510	1793	2691	3020
4,0	10,15 – 14,15	673	734	826	914	736	832
4,0	14,15 – 18,15	375	470	613	754	1015	1102
1,2	18,15 – 19,35	177	204	155	133	210	340

Tabuľka 3.17 – rozdiely síl na hornej a dolnej hrane segmentov v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 2.

<sup>1</sup> Záporné hodnoty  $\Delta F$  sa neuvažujú. Plášťové trenie v týchto prípadoch je uvažované 0 kPa.

Z rozdielov síl  $\Delta F$  a dĺžky segmentov  $\Delta z$  je možné určiť priebehy plášťových trení po dĺžke pilóty pre jednotlivé zaťažovacie stavy podľa rovnice 3.1 na strane 38.

$$\tau_i = \frac{\Delta F_i}{\pi * d * \Delta z_i} \quad (3.1)$$

$\tau_i$  plášťové trenie na jednotlivých segmentoch

$\Delta F_i$  prenesená sila daného segmentu

$d$  priemer pilóty (0,94 m)

$\Delta z_i$  dĺžka jednotlivých segmentov

Vypočítané hodnoty plášťových trení podľa rovnice (3.1) sú uvedené v tabuľkách 3.18 a 3.19.

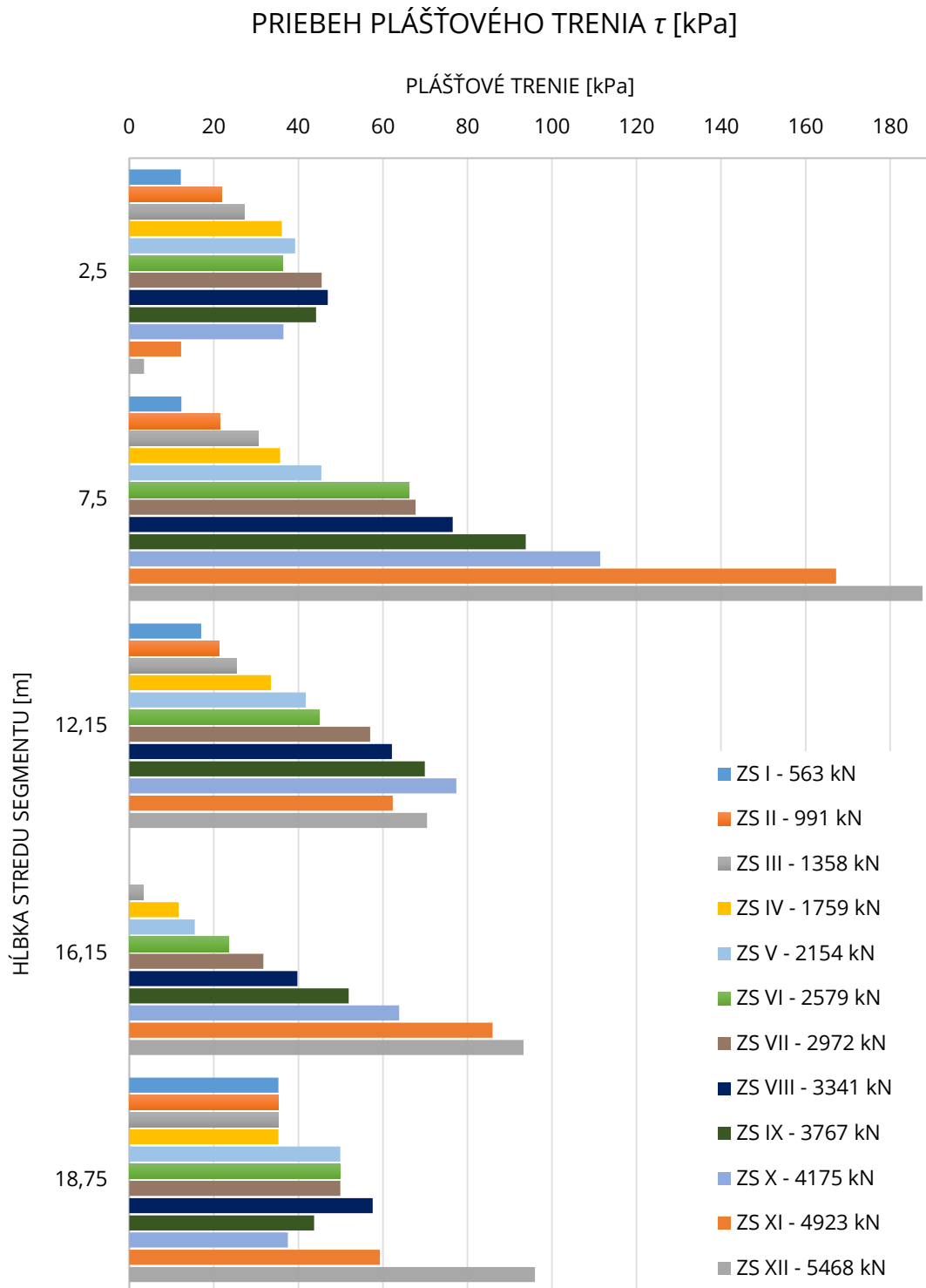
Plášťové trenie $\tau$ [kPa]						
Rozmedzie hĺbky [m]	ZS I 563 kN	ZS II 991 kN	ZS III 1358 kN	ZS IV 1759 kN	ZS V 2154 kN	ZS VI 2579 kN
0 - 4,7	12,18	21,83	27,16	36,10	39,27	36,24
4,7- 10,15	12,30	21,44	30,57	35,66	45,42	66,17
10,15 - 14,15	17,02	21,16	25,31	33,52	41,74	44,95
14,15 - 18,15	0,00	0,00	3,39	11,68	15,49	23,53
18,15 - 19,35	35,27	35,27	35,27	35,27	49,95	49,95

Tabuľka 3.18 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 1.

Plášťové trenie $\tau$ [kPa]						
Rozmedzie hĺbky [m]	ZS VII 2972 kN	ZS VIII 3341 kN	ZS IX 3767 kN	ZS X 4175 kN	ZS XI 4923 kN	ZS XII 5468 kN
0 - 4,7	45,53	46,98	44,17	36,46	12,25	3,46
4,7- 10,15	67,73	76,49	93,82	111,41	167,20	187,64
10,15 - 14,15	56,97	62,14	69,93	77,38	62,31	70,43
14,15 - 18,15	31,75	39,79	51,89	63,83	85,93	93,29
18,15 - 19,35	49,95	57,57	43,74	37,53	59,26	95,94

Tabuľka 3.19 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 2.

Grafické znázornenie priebehu plášťového trenia je v grafe 3.6. Zobrazené sú hodnoty plášťových trení na jednotlivých segmentoch v jednotlivých zaťažovacích stavoch.



Graf 3.6 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225.

### c) Analýza vplyvu neistoty osovej tuhosti pilóty na objekte SO 210

V tejto časti je prezentovaný vplyv neistoty tuhosti pilóty na plášťové trenia. Tuhosť pilóty je daná modulom pružnosti betónu a plochou jej prierezu. V oboch zaťažovacích skúškach sú použité k meraniu pomerného pretvorenia len strunové tenzometre a veľkosti prenesených síl po dĺžke pilóty sú získané prevodom pomocou modulu pružnosti a plochy prierezu pilóty podľa Hookovho zákona (rovnica 3.2). Takže prepočítavané hodnoty sú priamo ovplyvňované zvolenou tuhosťou, preto je potrebné poukázať na možnosť vzniku neistoty výpočtu prenesených síl. Modul pružnosti je v zaťažovacej skúške stanovený na 27 GPa a plocha je počítaná z priemeru 1,2 m.  $\varepsilon$

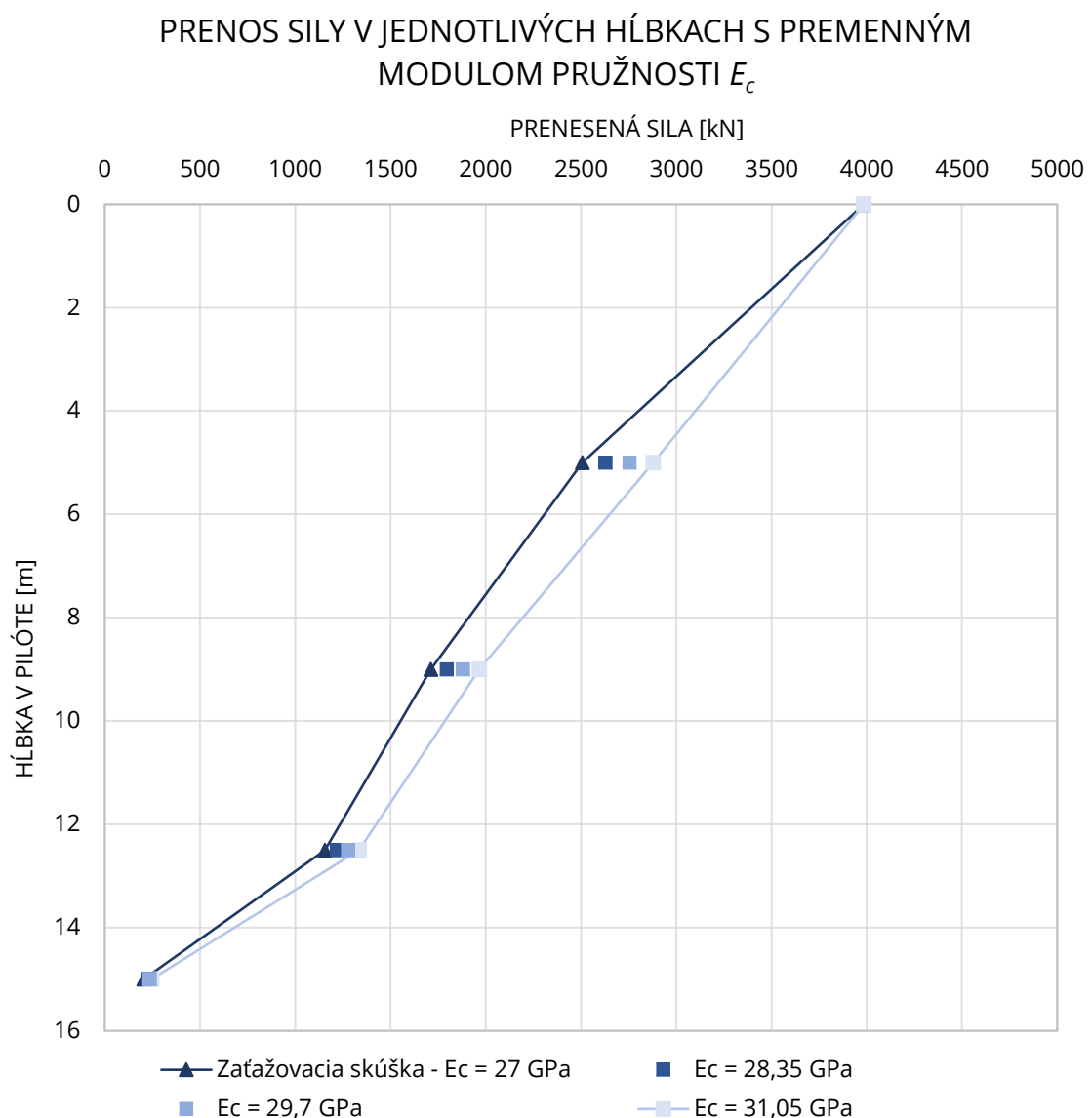
$$\Delta F_i = \varepsilon * E_c * A \quad (3.2)$$

$\Delta F_i$	prenesená sila
$\varepsilon$	pomerné pretvorenie
$E_c$	Youngov modul pružnosti betónu
$A$	plocha prierezu pilóty

#### i) Premenný modul pružnosti betónu

Keďže modul pružnosti je premenný vzhľadom na napätie v betóne, nie je možné uvažovať rovnakú hodnotu modulu pružnosti po celej dĺžke pilóty (Bamforth a ďalší, 2008) Voľba modulu pružnosti betónu  $E_c$  na konkrétnom príklade je viac popísaná v časti 5 a) Spätná analýza – D 4707 SO 210. Z tohto dôvodu by mala byť hodnota  $E_c$  volená na základe skutočného napätia v danom reze pilóty, čo nebolo v danej zaťažovacej skúške možné, keďže pilóta bola osadená len tenzometrami, ktoré sú schopné merať len pomerné pretvorenie v danom mieste. Pre interpretáciu vplyvu premenného modulu pružnosti betónu boli použité hodnoty o 5% (28,35 GPa), 10% (29,7 GPa) a 15% (31,05 GPa) vyššie ako bola hodnota stanovená v zaťažovacej skúške. V grafe 3.7 je zobrazený vplyv na dopočítavané prenesené sily v hĺbkach osadených tenzometrov v šiestom zaťažovacom stave.

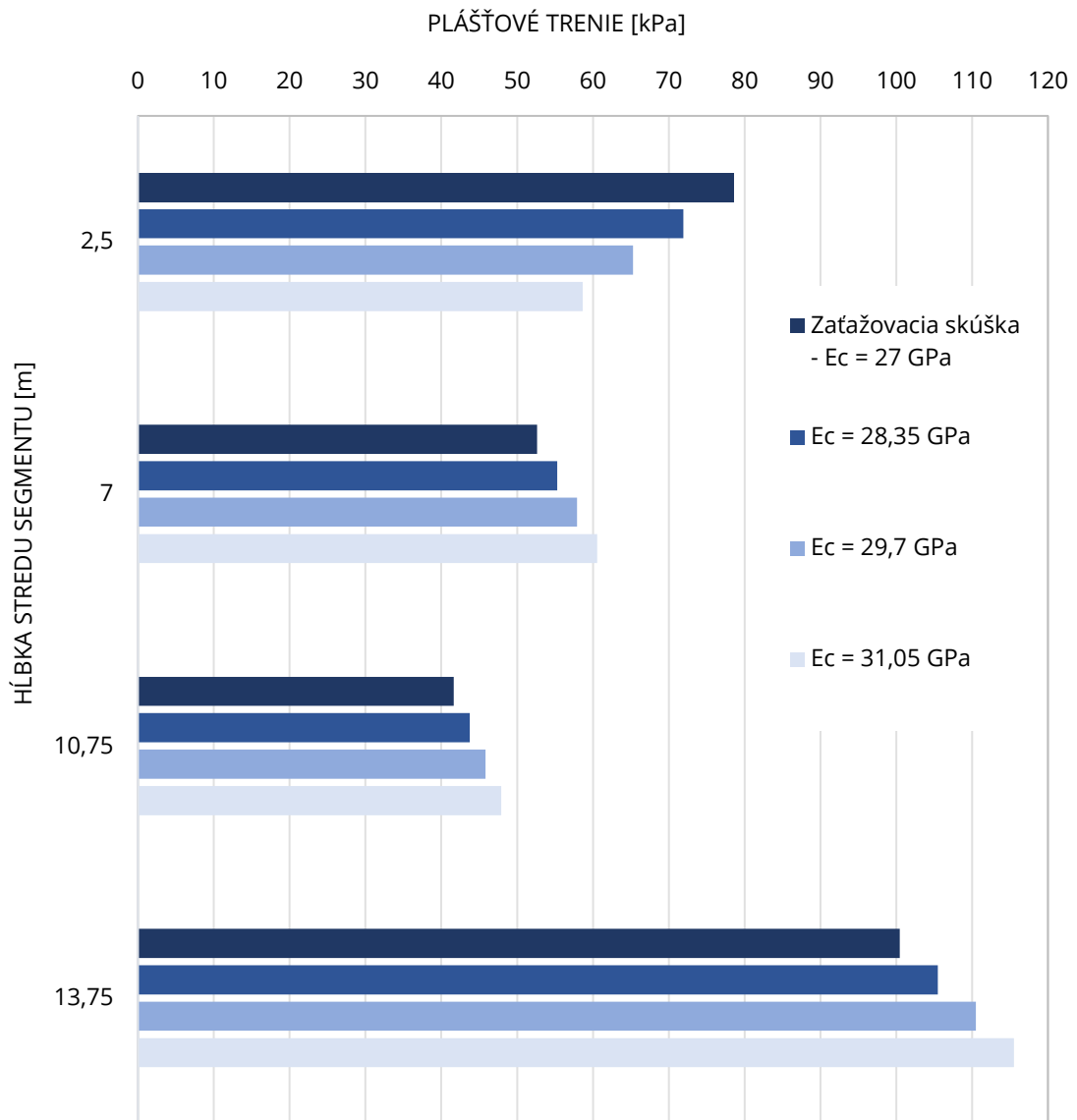
Hodnota sily v hlave pilóty bola ponechaná, pretože bola meraná priamo z tlaku v hydraulickej sústave. Medzi krivkami je zobrazená oblasť neistoty, ktorá vznikne možným rozptylom  $E_c$ . So stúpajúcou hodnotou  $E_c$  stúpa tuhosť a tým pádom priamoúmerne aj hodnoty prenesených síl. Ďalej vplyvom zvyšujúceho sa  $E_c$  klesá plášťové trenie na hornom segmente pilóty a stúpa v dolných troch segmentoch. Hodnoty plášťových trení jednotlivých segmentov boli počítané podľa rovnice 3.1. Priebeh plášťových trení na jednotlivých segmentoch pilóty je zobrazený v grafe 3.8.



Graf 3.7 – prenos síl po dĺžke pilóty s premenným modulom pružnosti betónu.



PRIEBEH PLÁŠŤOVÉHO TREANIA  $\tau$  [kPa] S PREMENNÝM  
MODULOM PRUŽNOSTI  $E_c$

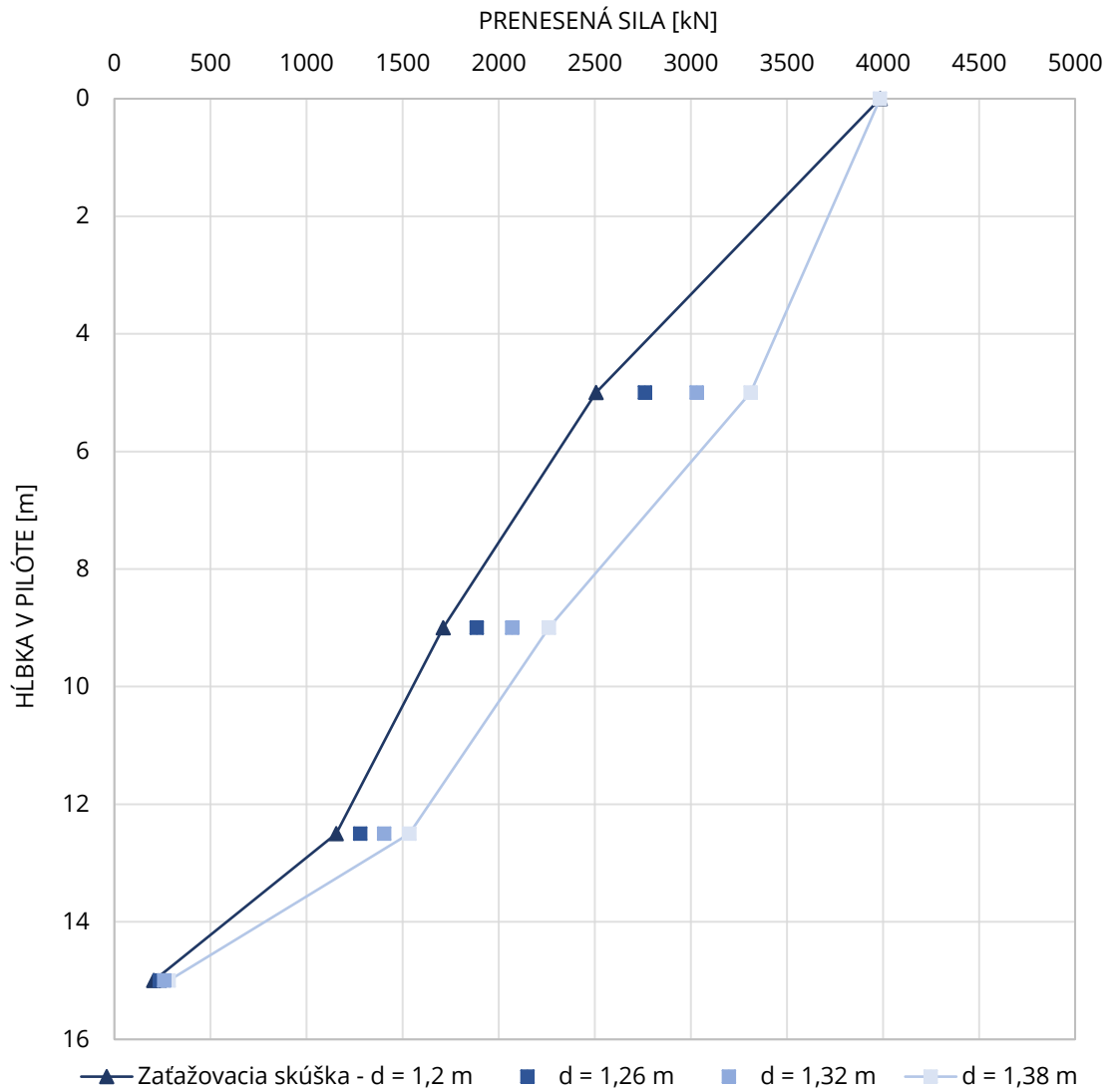


Graf 3.8 – plášťové trenie na segmentoch s premenným modulom pružnosti betónu.

## ii) Premenný priemer pilóty

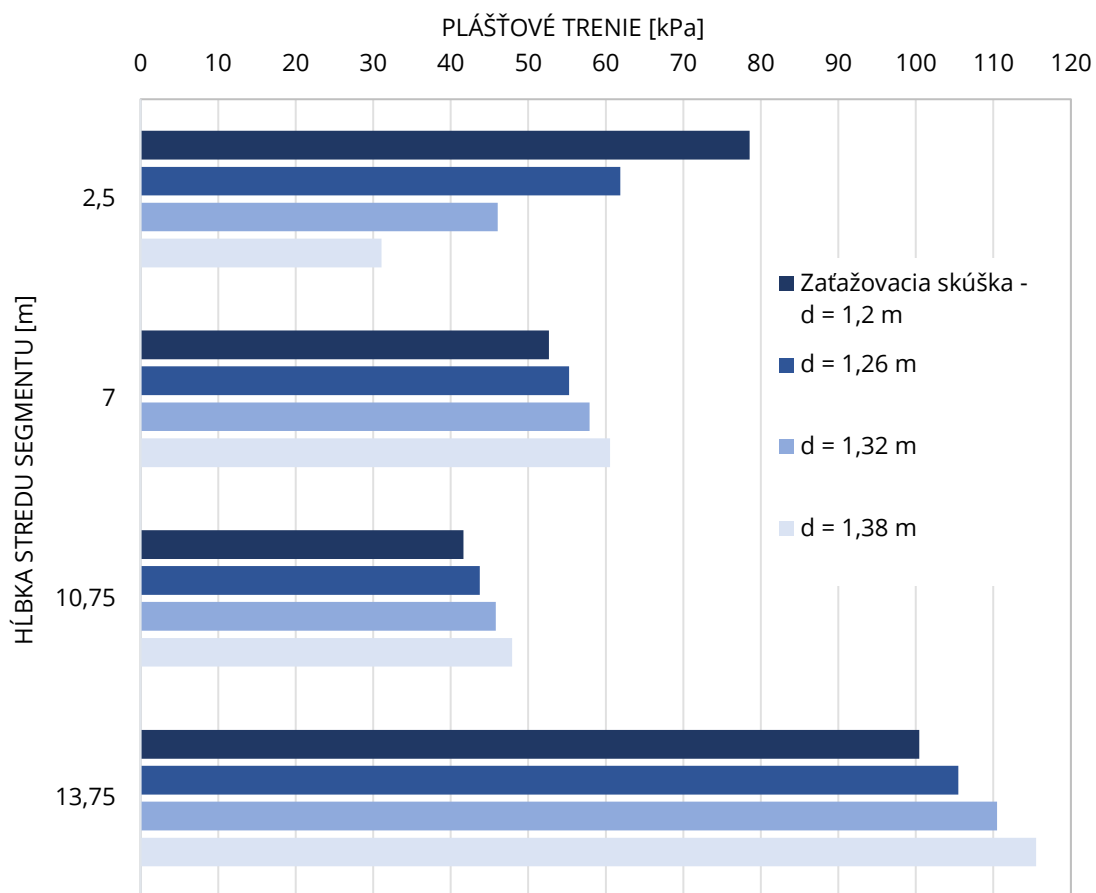
Druhým vstupom do výpočtu prenesených síl z pomerných pretvorení je už spomínaná plocha prierezu pilóty. Plocha je závislá od priemeru  $d$ . Priemer môže byť po dĺžke pilóty premenný, ako vysvetľuje aj článok s názvom „Integrity Testing of Pile Cover Using Distributed Fibre Optic Sensing“. V tomto článku autori uvádzajú meranie priemeru po dĺžke pilóty pomocou optického vlákna a hydratačného tepla. Priemerný priemer pilóty bol stanovený na 0,735 m. Merania ukázali, že maximálna hodnota priemeru po dĺžke pilóty bola 0,78 m a minimálna 0,68 m. Z toho vyplýva, že priemer môže byť premenný až o niekoľko percent. (Rui a ďalší, 2017) So zvyšujúcim sa  $d$  stúpa tuhosť a tým pádom klesá pomerné pretvorenie, ktoré je tenzometer schopný zmerať. Pre interpretáciu vplyvu premenného  $d$  pilóty boli použité hodnoty o 5% (1,26 m), 10% (1,32 m) a 15% (1,38 m) vyššie ako bola hodnota stanovená v zaťažovacej skúške podľa (Rui a ďalší, 2017). V grafe 3.9 je opäť zobrazený vplyv na dopočítavané prenesené sily v hĺbkach osadených tenzometrov v šiestom zaťažovacom stave. Medzi krivkami je zobrazená oblasť neistoty, ktorá vznikne možným rozptylom  $d$ . Premenný priemer má väčší vplyv na dopočítavané prenesené sily, pretože je vo výpočte plochy umocnený na druhú. So stúpajúcou hodnotou  $d$  taktiež stúpa tuhosť a tým pádom aj hodnoty prenesených síl. Ďalej vplyvom zvyšujúceho sa  $d$  výraznejšie klesá plášťové trenie na hornom segmente pilóty a stúpa v dolných troch segmentoch. Hodnoty plášťových trení jednotlivých segmentov boli počítané podľa rovnice 3.1. Priebeh plášťových trení na jednotlivých segmentoch pilóty je zobrazený v grafe 3.10.

## PRENOS SILY V JEDNOTLIVÝCH HĹBKACH S PREMENNÝM PRIEMEROM PILÓTY $d$



Graf 3.9 – prenos síl po dĺžke pilóty s premenným priemerom pilóty.

## PRIEBEH PLÁŠŤOVÉHO TRENIA $\tau$ [kPa] S PREMENNÝM PRIEMEROM PILÓTY $d$



Graf 3.10 – plášťové trenie na segmentoch s premenným priemerom pilóty.

Z tejto časti plynie, že pri používaní strunových tenzometrov pri meraní pomerných pretvorení počas zaťažovacích skúšok je nutné prihliadať aj na tieto faktory, ktoré výrazne ovplyvňujú výstupné informácie zo zaťažovacích skúšok. Predovšetkým sú ovplyvnené hodnoty plášťového trenia. Riešením tohto problému môže byť použitie optických vlákien merajúcich pomerné pretvorenie kontinuálne po dĺžke pilóty a separácie od hlavy pilóty do hĺbky napríklad 1 m. Vďaka separácii a zameranému pomernému pretvoreniu v separácii sme schopní určiť presnejšiu hodnotu modulu pružnosti podľa Hookovho zákona. Optické vlákno nám vďaka meraniu geometrie pomocou hydratačného tepla určí priebeh priemeru pilóty po jej dĺžke. (Rui a ďalší, 2017) Pri použití tohto modulu pružnosti a reálneho priemeru pilóty dosahujú dopyčované prenesené sily a plášťové trenia korektnejšie výsledky.

## 4 PARAMETRICKÁ ŠTÚDIA

Kapitola s názvom „parametrická štúdia“ sa zaoberá vplyvom vstupných parametrov na hodnoty výstupov z programu vyvíjanom na Ústave geotechniky, Fakulty stavebnej VUT v Brne, fungujúcom na princípe metódy prenosových funkcií.

Medzi hlavné vstupné parametre patria  $\tau_{max}$ ,  $M_s$ ,  $\sigma_{max}$ ,  $d$  a  $M_b$ .  $\tau_{max}$  predstavuje maximálne plášťové trenie pre jednotlivé vrstvy.  $M_s$  je parameter počiatkovej tuhosti zeminy, ktorý ovplyvňuje najmä sklon medznej zaťažovacej krivky na počiatku zaťažovania a  $\sigma_{max}$  je hodnota únosnosti v oblasti päty pilóty. Parameter  $M_b$  vyjadruje počiatkovú tuhosť zeminy v päte pilóty a priemer pilóty je značený ako  $d$ .

Plášťové trenie v programe vychádza z prenosových funkcií jednotlivých segmentov. Prenosové funkcie segmentov uvažované programom v predikcii majú tvar hyperboly podľa rovnice 4.1. (Bohn a ďalší, 2016)

$$\tau = \frac{\tau_{max} * s}{M_s * d + s} \quad (4.1)$$

$\tau_{max}$	maximálne plášťové trenie
$s$	posunutie v hlave pilóty
$M_s$	parameter počiatkovej tuhosti zeminy
$d$	priemer pilóty

Prenosové funkcie päty pilóty uvažované v predikcii majú taktiež tvar hyperboly podľa rovnice 4.2. (Bohn a ďalší, 2016)

$$\sigma = \frac{\sigma_{max} * s}{M_b * d + s} \quad (4.2)$$

$\sigma_{max}$	maximálna únosnosť zeminy v oblasti päty
$s$	posunutie v päte pilóty
$M_b$	parameter počiatkovej tuhosti zeminy v päte pilóty
$d$	priemer pilóty

Parameter  $M_b$  bol v oboch prípadoch usporiadania vrstiev uvažovaný do výpočtu s hodnotou 0,01.

V parametrickej štúdii sú uvažované rôzne kombinácie vrstiev a ich parametrov. Výpočet bol realizovaný na ťahanej aj tlačenej pilóte. Vstupné parametre, ktoré boli konštantné sú:

- dĺžka pilóty,  $L = 12$  m,
- Youngov modul pružnosti oceli,  $E_s = 200$  GPa,
- Youngov modul pružnosti betónu,  $E_c = 28,85$  GPa,
- počet segmentov, na ktoré bola pilóta rozdelená,  $N = 12$ .

Vstupné parametre únosnosti v päte pilóty boli nastavené podľa hodnoty maximálneho plášťového trenia vrstvy pri päte pilóty. (Hulla a ďalší, 2004)

$\tau_{max}$ [kPa]	$\sigma_{max}$ [kPa]	$l_c$ a $l_D$	zemina
50	1500	0,6 - 1,0 ( $l_c$ )	F1 – F8
100	3000	> 1,0 ( $l_c$ )	F1 – F8
200	5000	> 0,67 ( $l_D$ )	G1 – G5

Tabuľka 4.1 – hodnoty únosnosti v päte podľa (Hulla a ďalší, 2004).

Výstupmi z predikcie sú body medznej zaťažovacej krivky a prenosy síl po dĺžke pilóty. Výsledky parametrickej štúdie:

#### a) Pilóta s jednou vrstvou podložia

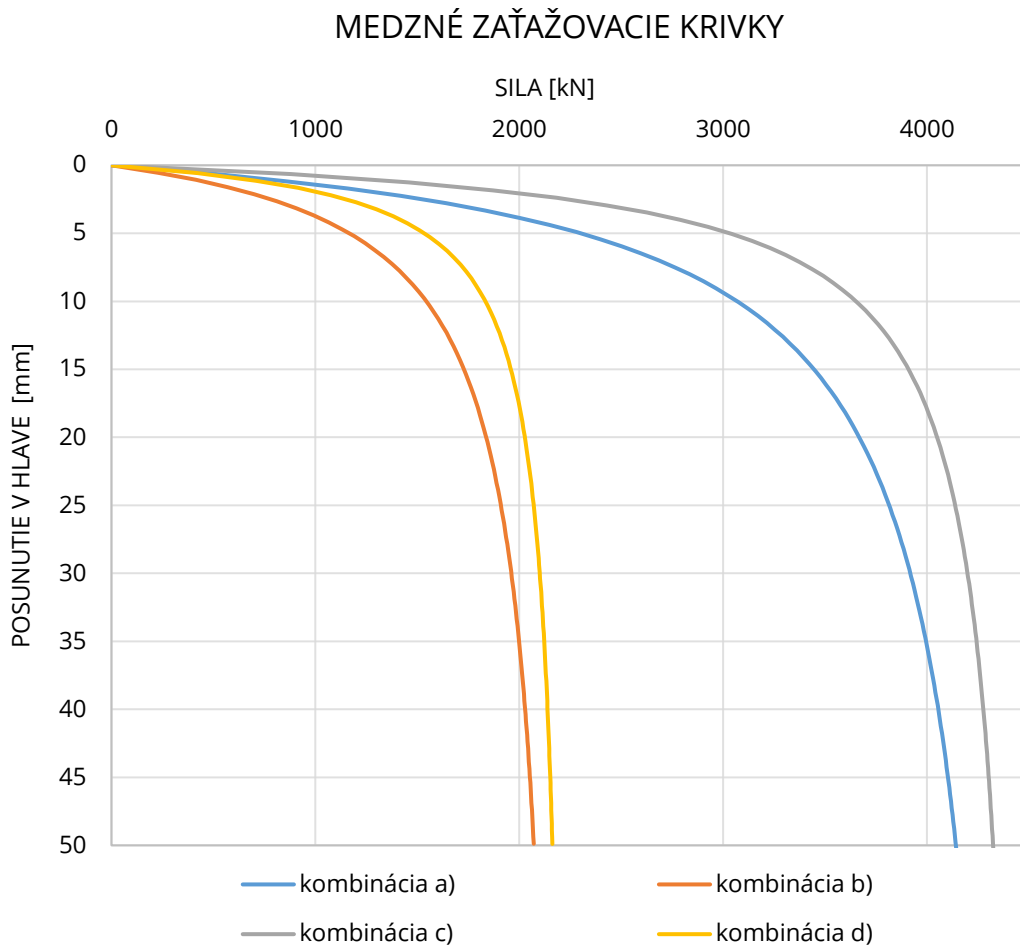
- Ťahaná pilóta s priemerom 1,2 m.

Vstupy:

		$\tau_{max}$ [kPa]	$M_s$ [-]
1 vrstva	Kombinácia a)	100	0,0038
	Kombinácia b)	50	0,0038
	Kombinácia c)	100	0,0019
	Kombinácia d)	50	0,0019

Tabuľka 4.2 – vstupy do predikcie, ťahaná pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer pilóty 1,2 m.

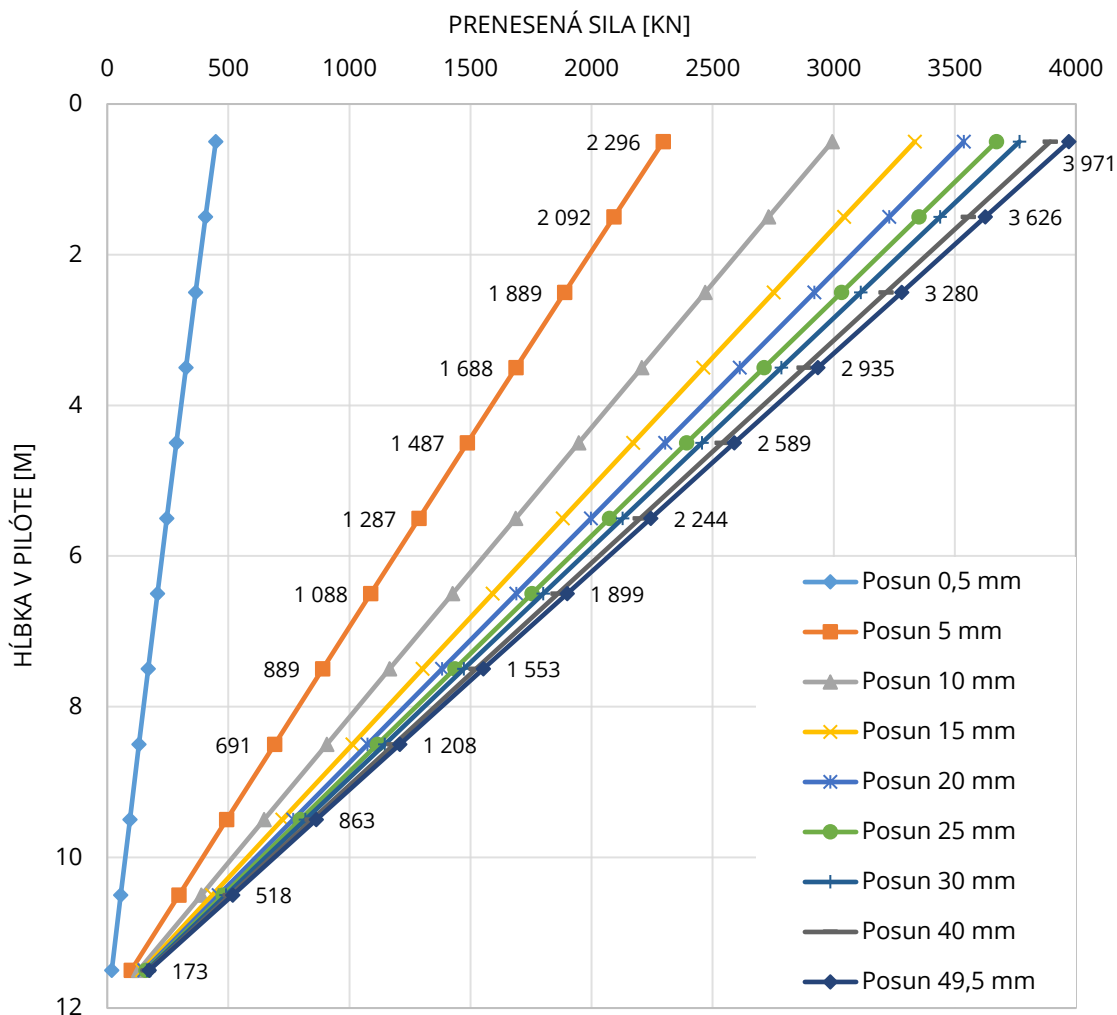
Výstupy:



*Graf 4.1 – medzné zaťažovacie krivky, ťahaná pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer pilóty 1,2 m.*

Rozdiely v medzných zaťažovacích krivkách sú spôsobené hlavne maximálnym plášťovým trením. Pri hodnote  $\tau_{max} = 100$  kPa v kombinácii a) a c) je únosnosť pri posunutí v hlave pilóty napríklad 50 mm výrazne vyššia ako pri hodnote  $\tau_{max} = 50$  kPa. Ďalej ovplyvňuje tvar krivky parameter počiatocnej tuhosti zeminy  $M_s$ , ktorý pri rovnakej hodnote  $\tau_{max}$  spôsobuje rôzne sklony kriviek. Čím je parameter počiatocnej tuhosti menší, tým je počiatocná tuhosť zeminy vyššia a tým pádom dochádza k menšiemu posunutiu v hlave pilóty a teda aj k jemne vyššej celkovej únosnosti pri posunutí v hlave pilóty napríklad o 50 mm. Ako príklad prenosu sily po dĺžke pilóty je použité zobrazenie kombinácie a) v grafe 4.2.

## PRENOS SILY V JEDNOTLIVÝCH HĹBKACH A POSUNOCH HLAVY PILÓTY



Graf 4.2 – prenos sily po dĺžke pilóty pri jednotlivých posunutiach v hlave pilóty, kombinácia a).

Prenos sily po dĺžke pilóty je lineárny z dôvodu homogénneho zemného profilu. Grafy prenosu sily po dĺžke pilóty pre všetky kombinácie v odseku a) sú lineárne, preto je použitý len jeden príklad zobrazenia a to konkrétne kombinácia a) pre ťahanú pilótu. Krivky nie sú rozdelené podľa zaťažovacích stavov, ale program ich rozdeľuje podľa posunutia v hlave pilóty a k nemu zodpovedajúcu hodnotu zaťaženia.



ii) Tlačená pilóta s priemerom 1,2 m.

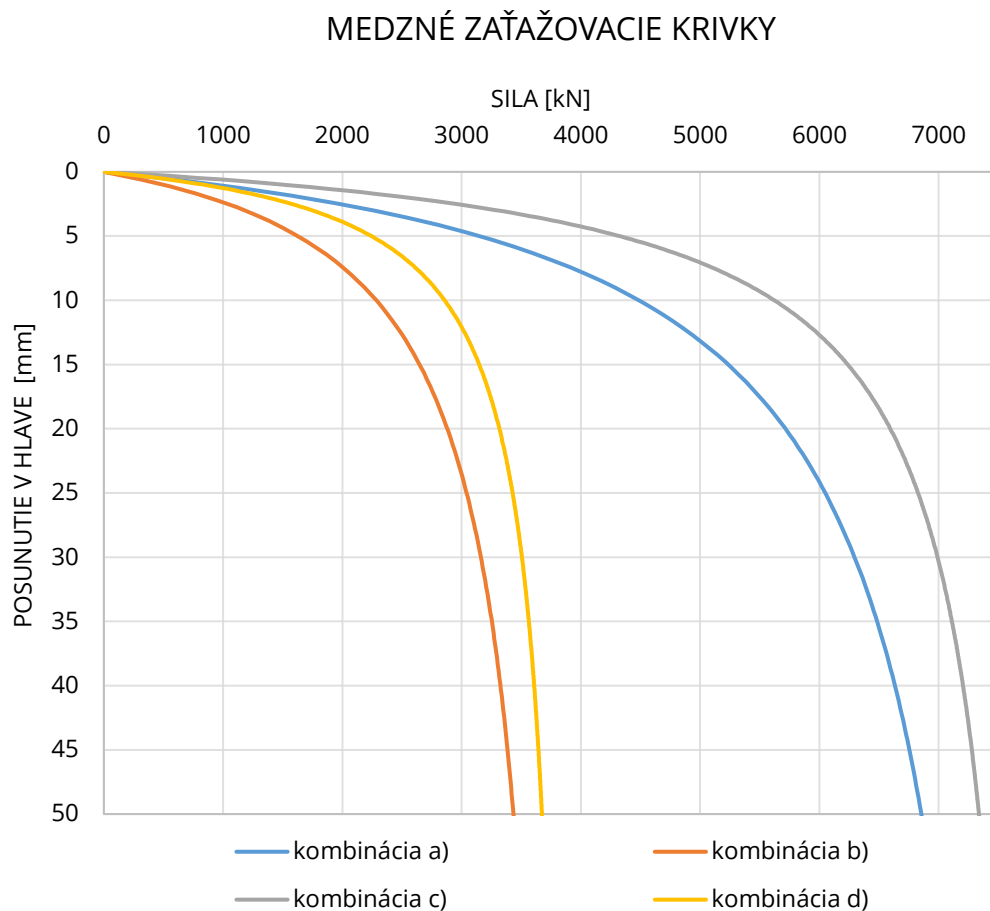
Do celkovej únosnosti vstupuje už aj únosnosť v päte pilóty  $\sigma_{max}$  a parameter počiatocnej tuhosti zeminy v päte pilóty  $M_b$ .

Vstupy:

		$\tau_{max}$ [kPa]	$M_s$ [-]	$M_b$ [-]	$\sigma_{max}$ [kPa]
1 vrstva	Kombinácia a)	100	0,0038	0,01	3000
	Kombinácia b)	50	0,0038	0,01	1500
	Kombinácia c)	100	0,0019	0,005	3000
	Kombinácia d)	50	0,0019	0,005	1500

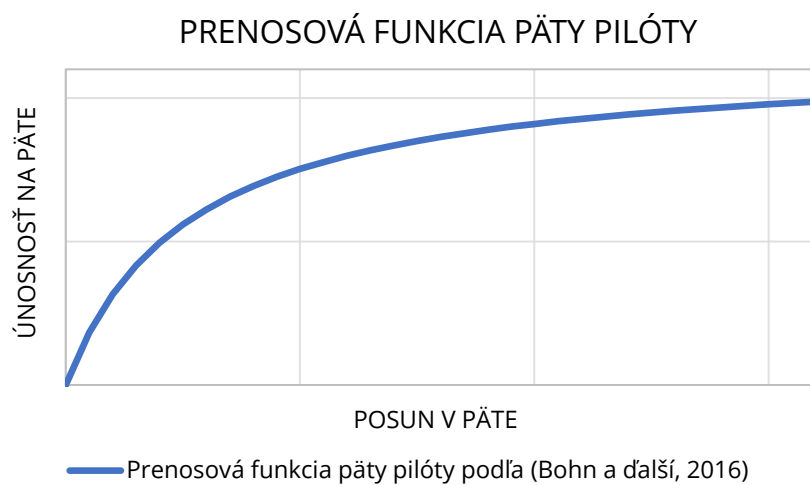
Tabuľka 4.3 – vstupy do predické, tlačená pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer pilóty 1,2 m.

Výstupy:

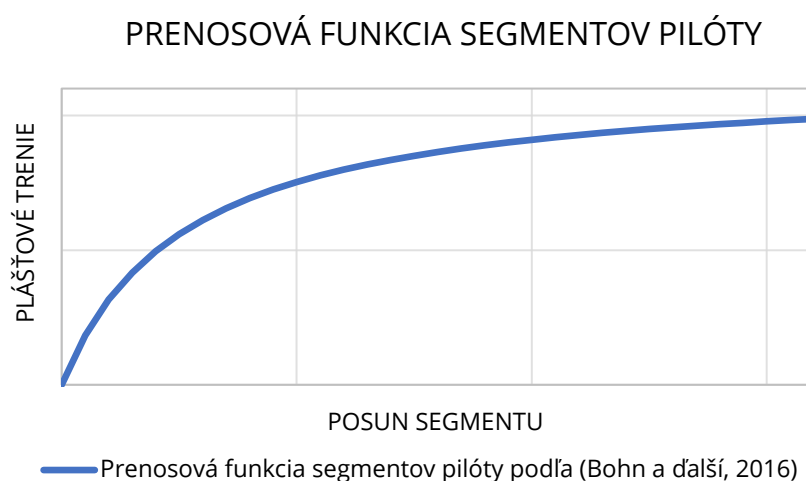


Graf 4.3 – medzné zaťažovacie krivky, tlačená pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer 1,2 m.

Prenosová funkcia päty pilóty má tvar hyperboly podľa (Bohn a ďalší, 2016). Tvar prenosovej funkcie je zobrazený v grafe 4.4. Podobne ako päte priraduje program na predikciu prenosovú funkciu v tvare hyperboly aj jednotlivým segmentom pilóty (graf 4.5). (Bohn a ďalší, 2016) Z grafov prenosových funkcií plynie, že pri stúpajúcom posunutí stúpa aj únosnosť v päte a mobilizuje sa vyššie plášťové trenie. Preto pri posunutí hlavy pilóty a teda aj celej pilóty vrátane päty, má pilóta napríklad pri posunutí 50 mm omnoho vyššiu únosnosť ako pri ťahanej pilóte, kde päta vôbec neprispieva k únosnosti.



*Graf 4.4 – prenosová funkcia päty pilóty. (Bohn a ďalší, 2016)*

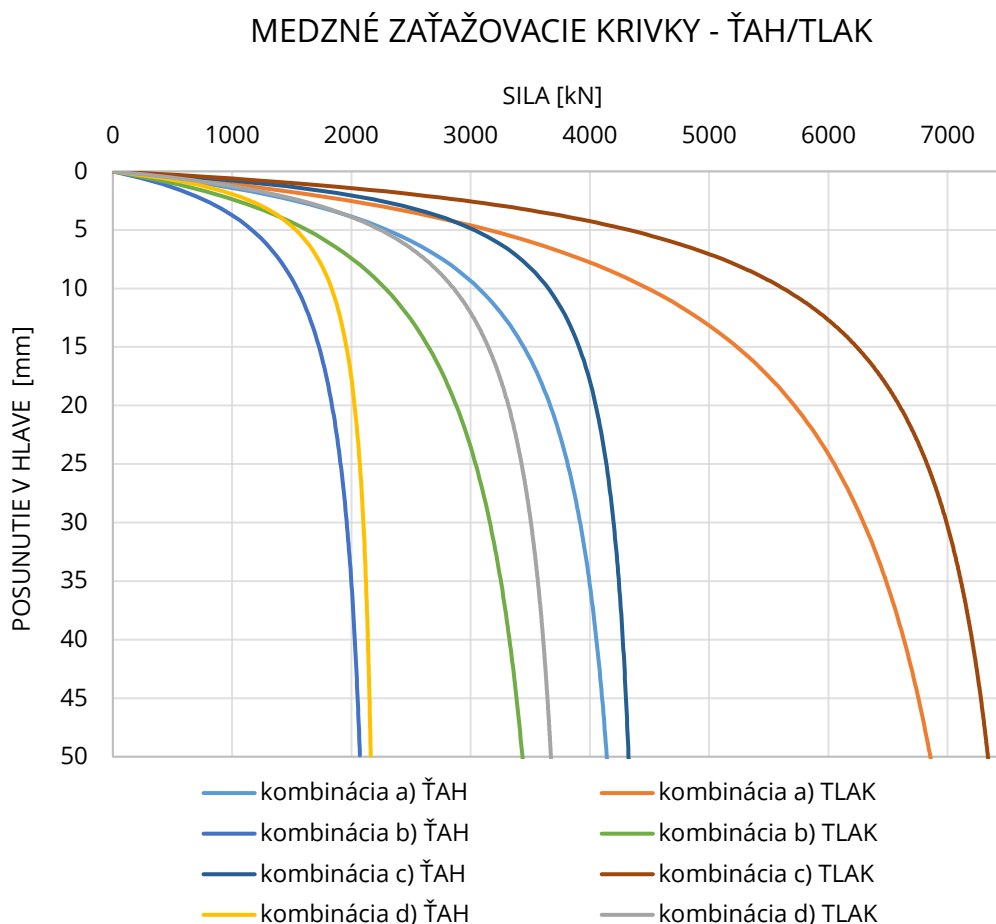


*Graf 4.5 – prenosová funkcia segmentov pilóty. (Bohn a ďalší, 2016)*

iii) porovnanie ťahanej a tlačenej pilóty

Jediný rozdiel v týchto dvoch variantoch bol ten, že jedna pilóta bola zadaná ako ťahaná a druhá ako tlačaná. Vo variante s ťahanou pilótou nie je uvažovaná únosnosť v päte. Pri rovnakých geologických podmienkach sú spravidla viac únosné tlačené pilóty z dôvodu pôsobenia únosnosti v päte pilóty. Únosnosti v týchto variantoch sú ovplyvnené najmä maximálnym plášťovým trením vo vrstve  $\tau_{max}$ . Parameter počiatočnej tuhosti  $M_s$  má vplyv najmä na sklon medznej zaťažovacej krivky v počiatku zaťažovania a teda, čím je tento parameter vyšší, tým je počiatočná tuhosť nižšia. Výsledné porovnanie medzných zaťažovacích kriviek je zobrazené v grafe 4.6.

Výstupy:



Graf 4.6 – medzné zaťažovacie krivky, ťahaná a tlačaná pilóta.

## b) Pilóta s dvoma vrstvami podložia

### i) Ťahaná pilóta

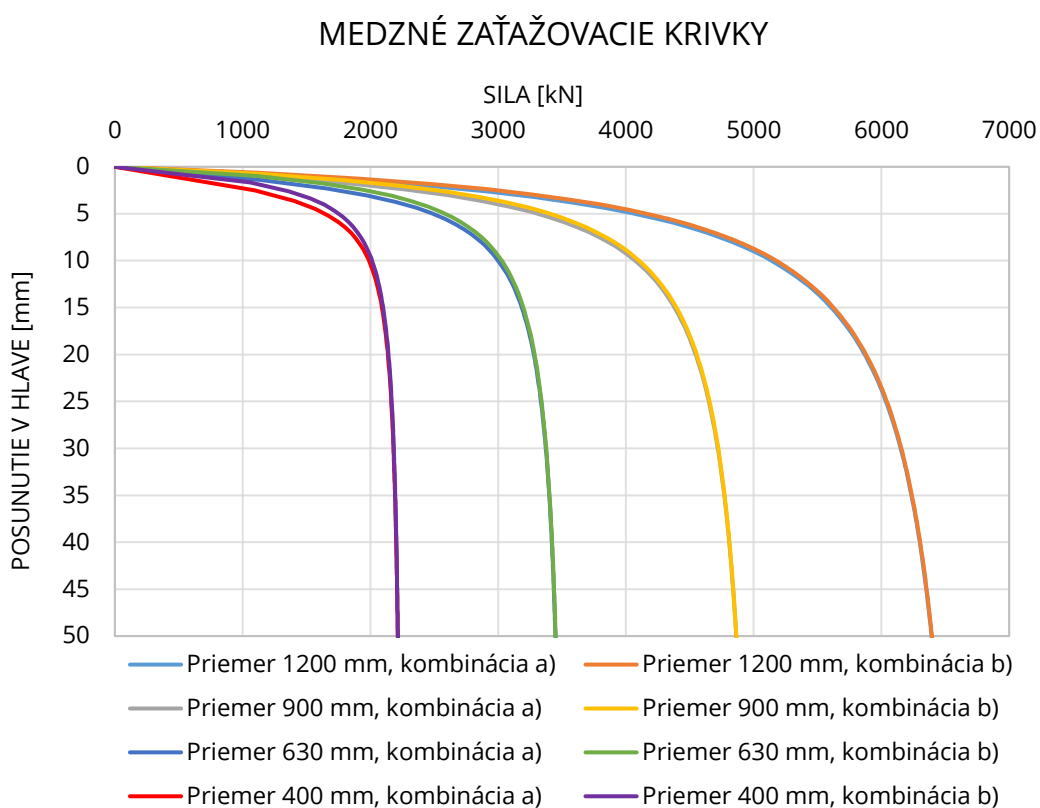
Pri variante s dvoma vrstvami podložia boli vytvorené dve kombinácie parametrov a) a b), uvedené sú v tabuľke 4.4. Kombinácie boli aplikované na pilóty priemerov 1,2 m, 0,9 m, 0,63 m a 0,4 m.

Vstupy:

		$\tau_{max}$ [kPa]	$M_s$ [-]	
2 vrstvy	Kombinácia a)	100	0,0038	1. vrstva
		200	0,0019	2. vrstva
	Kombinácia b)	200	0,0019	1. vrstva
		100	0,0038	2. vrstva

Tabuľka 4.4 – vstupy do predikcie, ťahaná pilóta s dvoma vrstvami podložia.

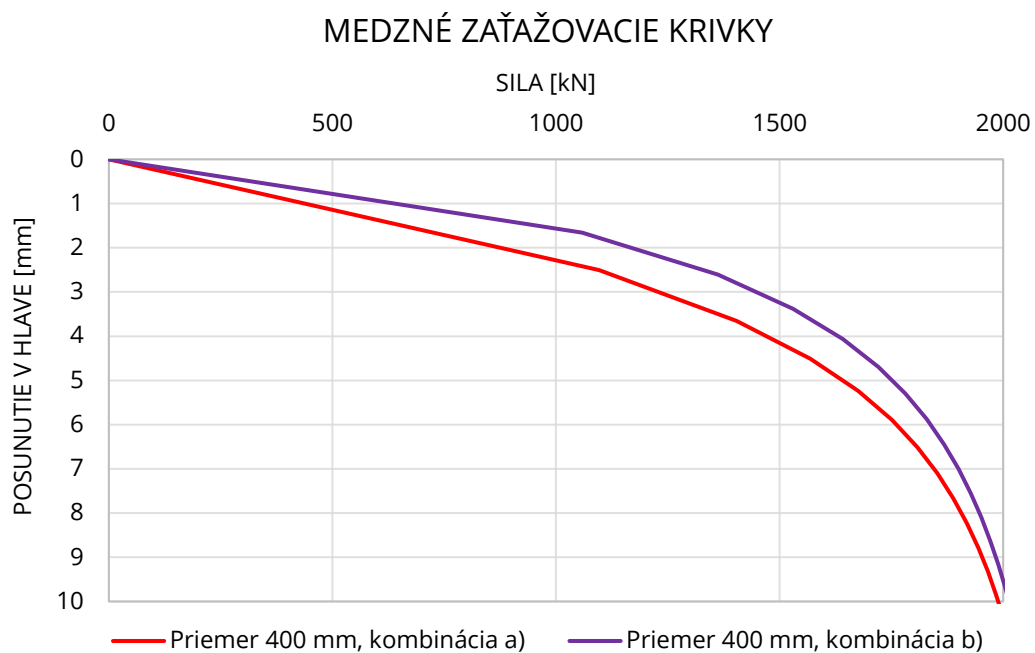
Výstupy:



Graf 4.7 – medzné zaťažovacie krivky, ťahaná pilóta s dvoma vrstvami podložia.

Z medzných zaťažovacích kriviek (graf 4.7) vyplýva, že pri ťahanej pilóte je maximálna únosnosť závislá len na priemere pilóty a teda jej plochy plášťa. Pri menších priemeroch a teda aj tuhostiach pilóty vzniká rozdiel v posunutí v hlave pilóty pri rovnakom zaťažení vplyvom usporiadania vrstiev.

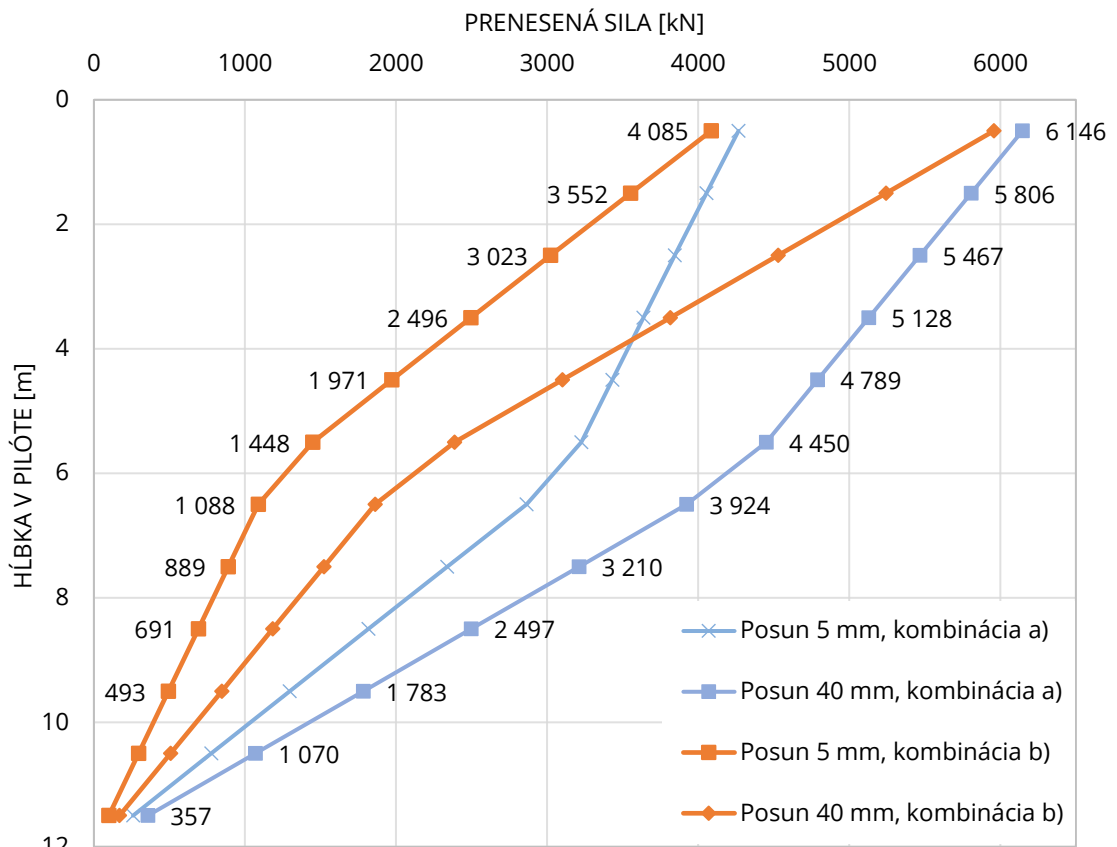
Napríklad pilóta s priemerom 400 mm v kombinácii a), v ktorej je menej únosná vrstva nad viac únosnou vrstvou dosahuje pri zaťažení 1400 kN o 30 % väčšie posunutie v hlave pilóty ako v kombinácii b). Toto správanie pilóty je zobrazené v grafe 4.8. Je spôsobené vyšším zmobilizovaným plášťovým trením v únosnejšej vrchnej vrstve, ktorá má aj vyššiu počiatočnú tuhosť. Preto je hodnota sily pri posunutí hlavy pilóty napríklad o 2 mm značne vyššia pri kombinácii b), kde je únosnejšia vrstva v hornej časti pilóty.



*Graf 4.8 – detail rozdielu posunutia v hlave pilóty pre rôzne usporiadanie vrstiev.*

V grafe 4.9 je zobrazený prenos sily po dĺžke pilóty pri dvoch rôznych kombináciách usporiadania vrstiev pre pilótu s priemerom 1,2 m. Z grafu vyplýva, že pilóta prenáša väčšie zaťaženie vo viac únosnej vrstve vplyvom väčšieho zmobilizovaného plášťového trenia.

## PRENOS SILY V JEDNOTLIVÝCH HĹBKACH A POSUNOCH HLAVY PILÓTY



Graf 4.9 – prenos sily po dĺžke pilóty pri jednotlivých posunutiach v hlave pilóty.

### ii) Tlačená pilóta

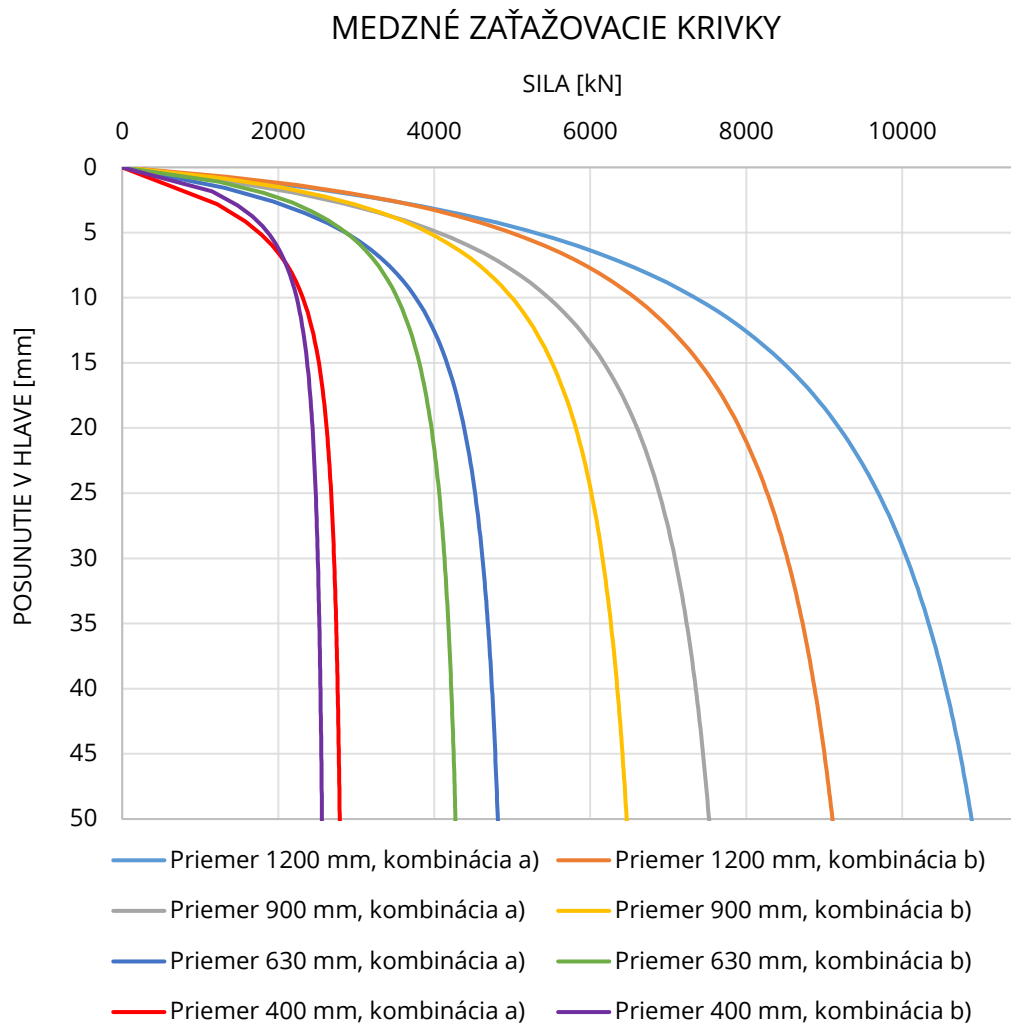
Aplikované kombinácie boli rovnaké ako v ťahanej pilóte. Pri tlačenej pilóte vstupuje do celkovej únosnosti už aj únosnosť v päte pilóty  $\sigma_{max}$  a parameter počiatocnej tuhosti zeminy v päte pilóty  $M_b$ .

Vstupy:

		$\tau_{max}$ [kPa]	$M_s$ [-]	$\sigma_{max}$ [kPa]	$M_b$ [-]	
2 vrstvy	Kombinácia a)	100	0,0038	-	-	1. vrstva
		200	0,0019	5000	0,01	2. vrstva
	Kombinácia b)	200	0,0019	-	-	1. vrstva
		100	0,0038	3000	0,01	2. vrstva

Tabuľka 4.5 – vstupy do predikcie, tlačená pilóta s dvoma vrstvami podložia.

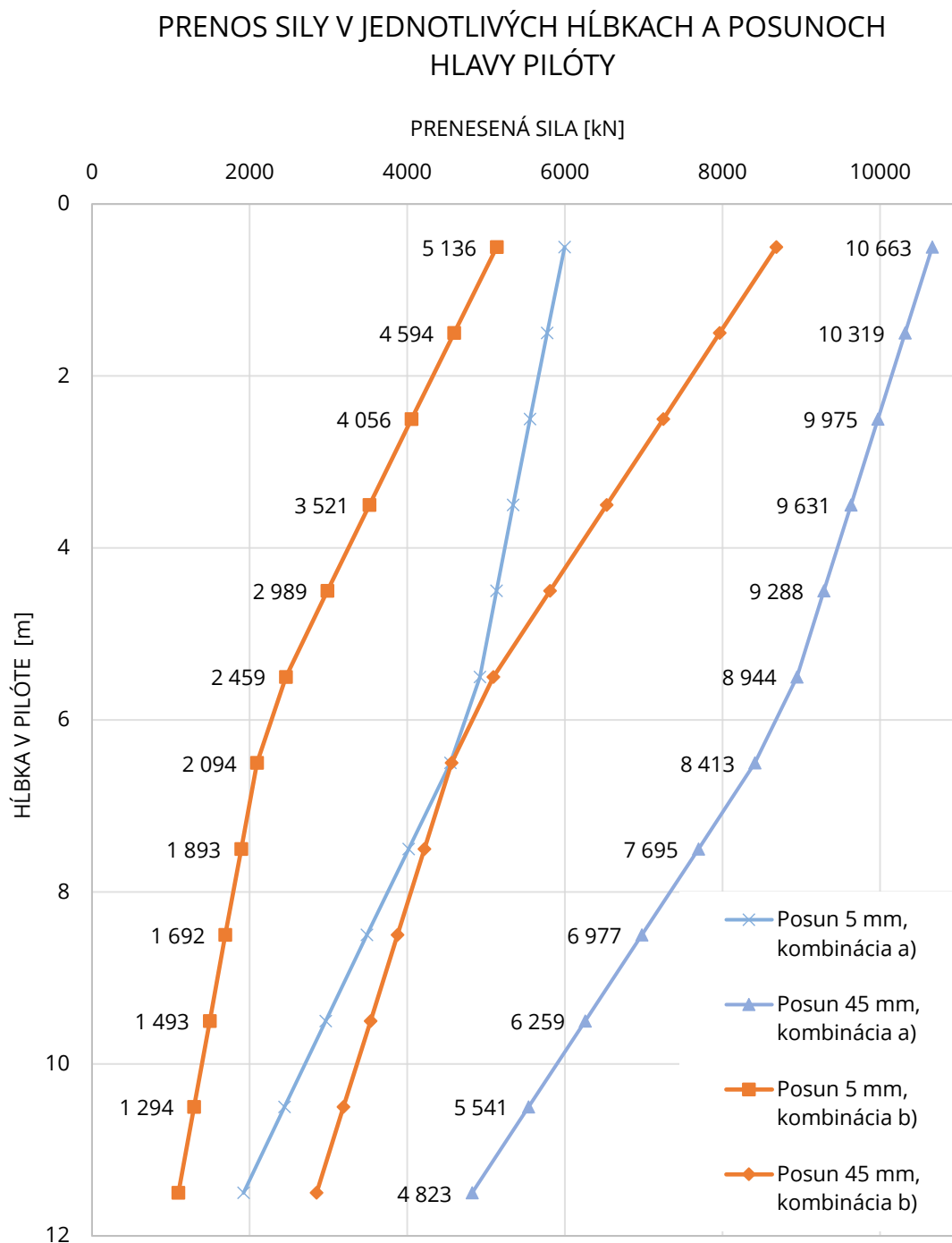
Výstupy:



*Graf 4.10 – medzné zaťažovacie krivky, tlačaná pilóta s dvoma vrstvami podložia.*

Únosnosť pilóty pri posunutí v hlave pilóty napríklad 50 mm je ovplyvnená únosnosťou v päte. To spôsobuje rozdiel v celkovej únosnosti pre pilóty s rovnakým priemerom, ale iným usporiadaním vrstiev. Ak je únosnejšia vrstva v okolí päty pilóty ( $\sigma_{max} = 5000$  kPa), tak je automaticky únosnosť v päte vyššia a tým pádom aj únosnosť pri rovnakom posunutí v hlave, napríklad 50 mm. Pretnutie kriviek je spôsobené rozdielnym parametrom počiatočnej tuhosti zeminu  $M_s$  v hornej vrstve a taktiež únosnosťou v päte pilóty podľa prenosovej funkcie päty pilóty (graf 4.4), z ktorého vyplýva, že pri vyššom posunutí stúpa únosnosť v päte.

V grafe 4.11 je zobrazený prenos sily po dĺžke pilóty pri kombináciách usporiadania vrstiev a) a b), ktorých jednotlivé parametre sú uvedené v tabuľke 4.5 pre pilótu s priemerom 1,2 m. Taktiež z tohto grafu vyplýva, že pilóta prenáša väčší podiel zaťaženia vo viac únosnej vrstve vplyvom väčšieho zmobilizovaného plášťového trenia.

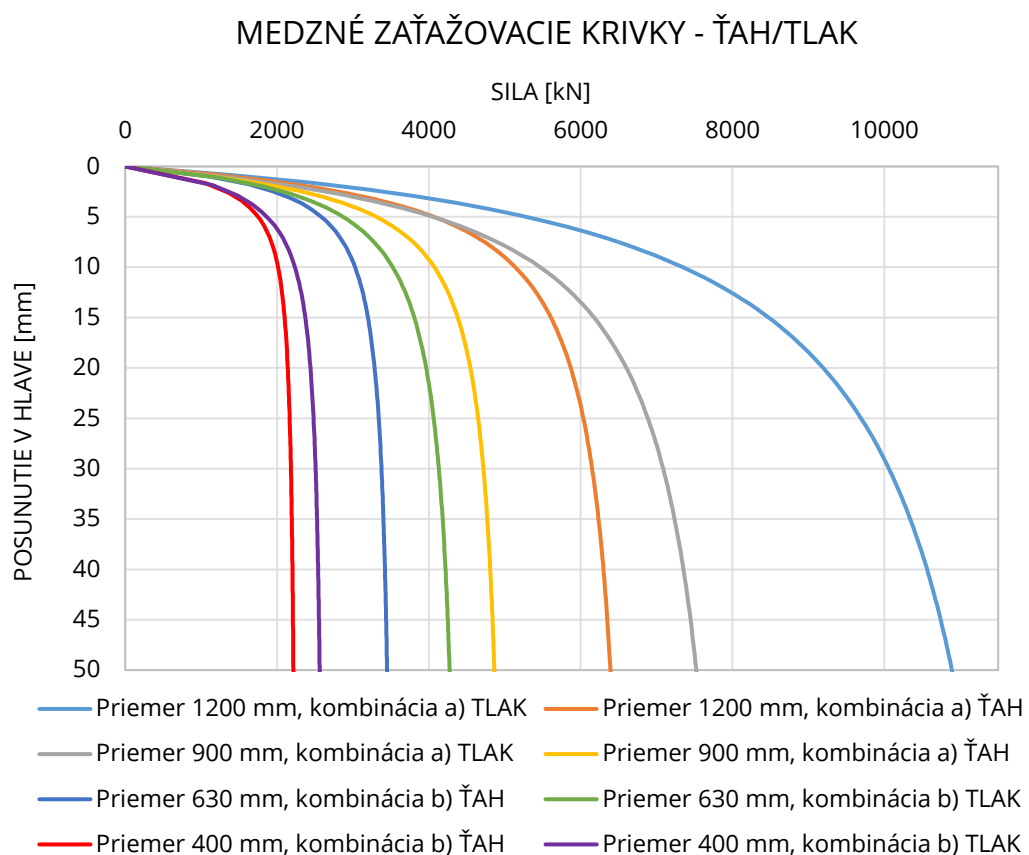


Graf 4.11 – prenos sily po dĺžke pilóty pri jednotlivých posunutíach v hlave pilóty.



iii) porovnanie ťahanej a tlačenej pilóty

Vzájomné porovnanie ťahaných a tlačeneých pilót je zobrazené v grafe 4.12. Najúnosnejšia je tlačená pilóta s priemerom 1,2 m v kombinácii a), a to vďaka plášťovému treniu a únosnosti v päte. V tejto kombinácii je únosnejšia vrstva v okolí päty pilóty, vďaka tomu je únosnosť v päte vyššia ako napríklad v kombinácii b) s rovnakými rozmermi pilóty. V kombinácii b) je menej únosná vrstva v okolí päty pilóty, čo spôsobuje menšiu únosnosť na päte. Ťahaná pilóta rovnakých rozmerov je spravidla menej únosná z dôvodu nepôsobenia päty. Podobný výsledok dosahujú aj pilóty s menšími priermi. Pri pilóte s priemerom 0,4 m dochádza k výraznému zmenšeniu vplyvu toho, či je pilóta ťahaná alebo tlačená. Toto je spôsobené menšou plochou v päte pilóty, ktorá priamo ovplyvňuje únosnosť na päte. Menšia plocha teda znamená menší podiel päty na únosnosti.



Graf 4.12 – medzné zaťažovacie krivky, ťahané a tlačené pilóty.

## 5 SPÄTNÁ ANALÝZA

V tejto časti boli spätne analyzované dve zaťažovacie skúšky veľkopriemerových vrтанých pilót. Jednalo sa o zaťažovacie skúšky, ktoré boli zhrnuté a popísané v časti 3 Geotechnická interpretácia výsledkov zaťažovacích skúšok. Obe pilóty boli namodelované v už spomínanom programe na predikciu podľa skutočných dát zo zaťažovacej skúšky. K dosiahnutiu maximálnej zhody meraných hodnôt a hodnôt z predikcie boli menené parametre:

$\tau_{max}$	maximálne plášťové trenie danej vrstvy,
$M_s$	parameter počiatocnej tuhosti danej vrstvy,
$\sigma_{max}$	únosnosť zeminy v päte pilóty,
$M_b$	parameter počiatocnej tuhosti zeminy v päte pilóty.

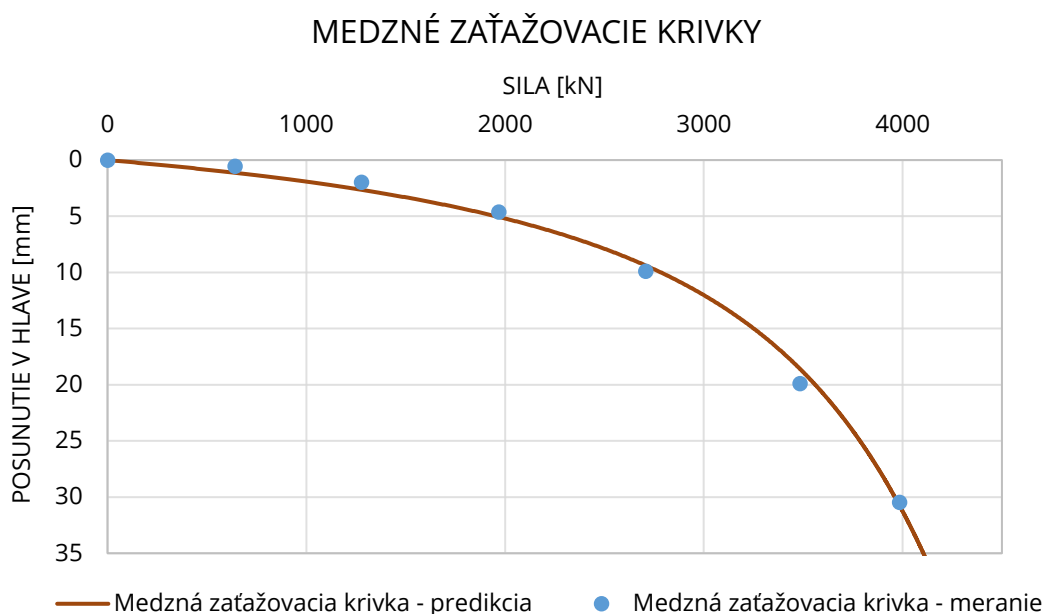
Modelovanie prostredia okolo pilóty a jednotlivé rozloženie vrstiev taktiež vychádzalo z nameraných hodnôt a popisu zeminy pri vrтанí pilóty, resp. pri podrobnom geotechnickom prieskume. Presný modul pružnosti betónu bol uvedený len pri zaťažovacej skúške objektu D 4707 SO 210,  $E_c = 27$  GPa. V zaťažovacej skúške objektu D 4704 SO 225 bol modul pružnosti betónu počítaný z pomerných pretvorení v separovanej časti a v spätnej analýze určený hodnotou  $E_c = 33$  GPa. Modul pružnosti oceli, nijako nevstupoval do výpočtu. Nemennú hodnotu mal taktiež parameter počiatocnej tuhosti zeminy v päte pilóty, a to  $M_b = 0,25$ . Táto hodnota priraduje päte veľmi malú tuhosť, ktorá však v spätnej analýze nijako neovplyvňovala výsledok, pretože zo zaťažovacích skúšok vyplývalo, že päta nesie minimálny podiel zaťaženia. Takmer celé zaťaženie je prenášané plášťovým trením do zeminy.

## a) Spätná analýza – D 4707 SO 210

Priemer pilóty bol 1,2 m a dĺžka pilóty 16 m. Prostredie, v ktorom sa pilóta nachádzala bolo rozdelené do troch vrstiev podľa ich maximálneho plášťového trenia (tabuľka 3.8) a popisu pri vŕtaní pilóty (tabuľka 3.1). Parametre, pri ktorých bola dosiahnutá maximálna zhoda s nameranými hodnotami sú uvedené v tabuľke 5.1. Porovnanie medzných zaťažovacích kriviek je zobrazené v grafe 5.1.

vrstva	Mocnosť [m]	$\tau_{max}$ [kPa]	$M_s$ [-]	$\sigma_{max}$ [kPa]	$M_b$ [-]
1.	4,5	85	0,0078	-	-
2.	7,0	51	0,0044	-	-
3.	4,5	101	0,0040	-	-
päta	-	-	-	3 000	0,25

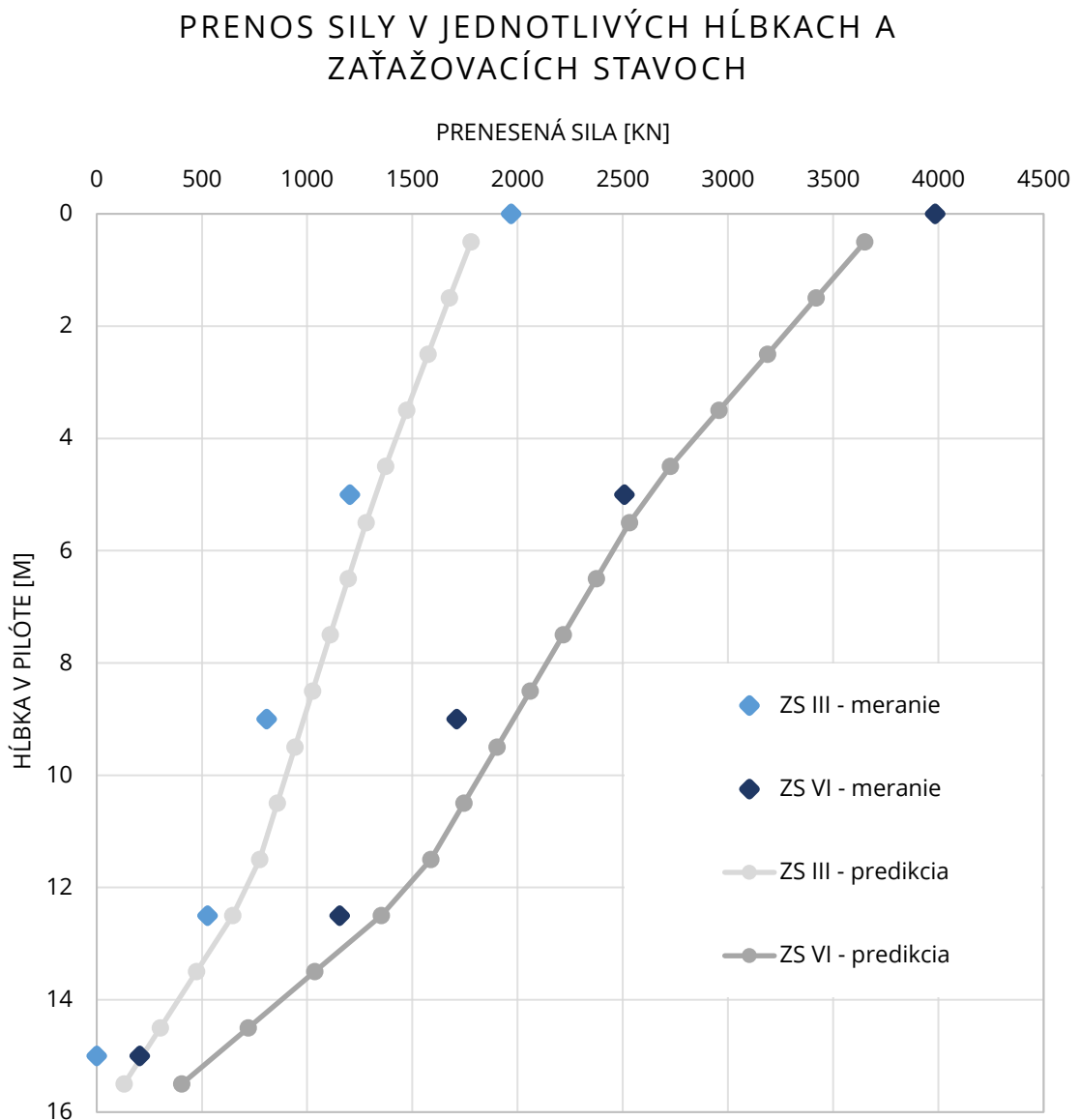
Tabuľka 5.1 – vstupné parametre do predikcie, objekt D 4707 SO 210.



Graf 5.1 – porovnanie medzných zaťažovacích kriviek, D 4707 SO 210.

Tvar predikovanej medznej zaťažovacej krivky bol priamo ovplyvňovaný parametrom počiatkovej tuhosti zemin pre všetky vrstvy. Z tohto dôvodu boli volené hodnoty, ktoré spôsobovali čo najmenšie odchýlky.

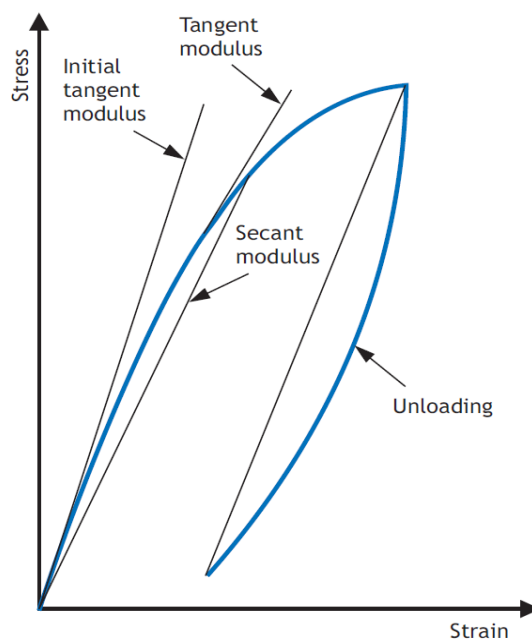
Maximálne plášťové trenie jednotlivých vrstiev v predikcii bolo nastavené tak, aby predikovaná pilóta dosahovala čo možno najväčšiu zhodu s posledným nameraným bodom medznej zaťažovacej krivky skúšanej pilóty (3985 kN a posunutie v hlave pilóty 30,47 mm). Porovnanie prenosov síl po dĺžke pilóty je zobrazené v grafe 5.2.



Graf 5.2 – porovnanie prenosov síl po dĺžke pilóty, D 4707 SO 210.

Zo zaťažovacej skúšky boli vybrané dva zaťažovacie stavy, pre ktoré boli nastavované vstupné parametre do predikcie. Konkrétne sa jednalo o tretí zaťažovací stav (ZS III) pre zobrazenie bodov pri nižšom zaťažení a šiesty (posledný) zaťažovací stav (ZS VI) pre zobrazenie bodov pri maximálnom dosiahnutom zaťažení.

Z grafu 5.2 vyplýva, že prvá vrstva dosahuje väčšie plášťové trenie ako druhá a tretia vrstva, tým pádom nebolo možné dosiahnuť prenesené sily v hĺbkach 5 m; 9 m; 12,5 m; 15,5 m. Tento jav môže byť spôsobený rôznymi príčinami. Prvá z nich je, že predpokladáme prímies jemnozrnného piesku, ktorý sa nachádza v hĺbke 2,0 – 3,5 m podľa popisu zeminy pri vŕtaní. Druhou príčinou môže byť fakt, že veľkosť prenesených síl v hĺbkach 5; 9; 12,5 a 15 m je vypočítaná z pomerných pretvorení, ktoré boli zmerané tenzometrami. Tieto hodnoty pomerných pretvorení sa prevádzajú na silu pomocou modulu pružnosti a plochy podľa Hookovho zákona. (rovnica 3.2) Ale modul pružnosti sa s úrovňou zaťaženia mení. K výpočtu síl bol v zaťažovacej skúške použitý sečnicový modul pružnosti 27 GPa, no vzhľadom na malú úroveň napätia v pilóte v porovnaní s tlakovou pevnosťou, by bolo vhodnejšie pre tento výpočet používať počiatočný dotyčnicový modul pružnosti, ktorý by bol vyšší o 5 – 20 %. (obrázok 5.1).



Obrázok 5.1 – zobrazenie dotyčnicového modulu pružnosti (*initial tangent modulus*) a sečnicového modulu pružnosti (*secant modulus*) v pracovnom diagrame betónu. (Bamforth a ďalší, 2008)

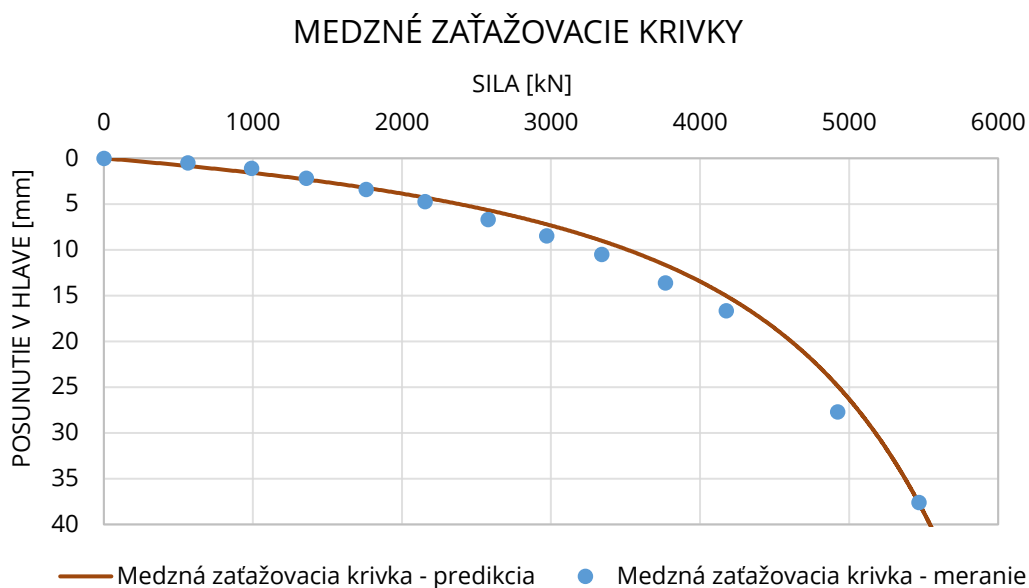
Týmto by sa výrazne zvýšili prenesené sily. Tretím dôvodom môže byť to, že pilóta má po svojej dĺžke rôzne priemery a tým pádom aj tuhosti, v tomto prípade vyššie. (Rui a ďalší, 2017) Preto môžu byť zmerané pomerné pretvorenia menšie.

## b) Spätná analýza – D 4704 SO 225

Pri spätnej analýze bola časť pilóty opatrená separáciou vynechaná a hlava pilóty bola zvolená práve v hĺbke pôvodných 4,35 m, kde separácia končila. Priemer pilóty bol 0,94 m a dĺžka pilóty teda 15 m. Prostredie, v ktorom sa pilóta nachádzala bolo homogénne, teda zložené z jednej vrstvy podľa popisu pri vrtaní pilóty (tabuľka 3.9) a podľa jej maximálneho plášťového trenia (tabuľka 3.18 a 3.19). Vstupné parametre, ktoré predikovali najväčšiu zhodu s nameranými hodnotami zo zaťažovacích skúšok sú uvedené v tabuľke 5.2. Porovnanie medzných zaťažovacích kriviek je zobrazené v grafe 5.3.

vrstva	Mocnosť [m]	$\tau_{max}$ [kPa]	$M_s$ [-]	$\sigma_{max}$ [kPa]	$M_b$ [-]
1.	15,00	135	0,0075	-	-
päta	-	-	-	5 000	0,25

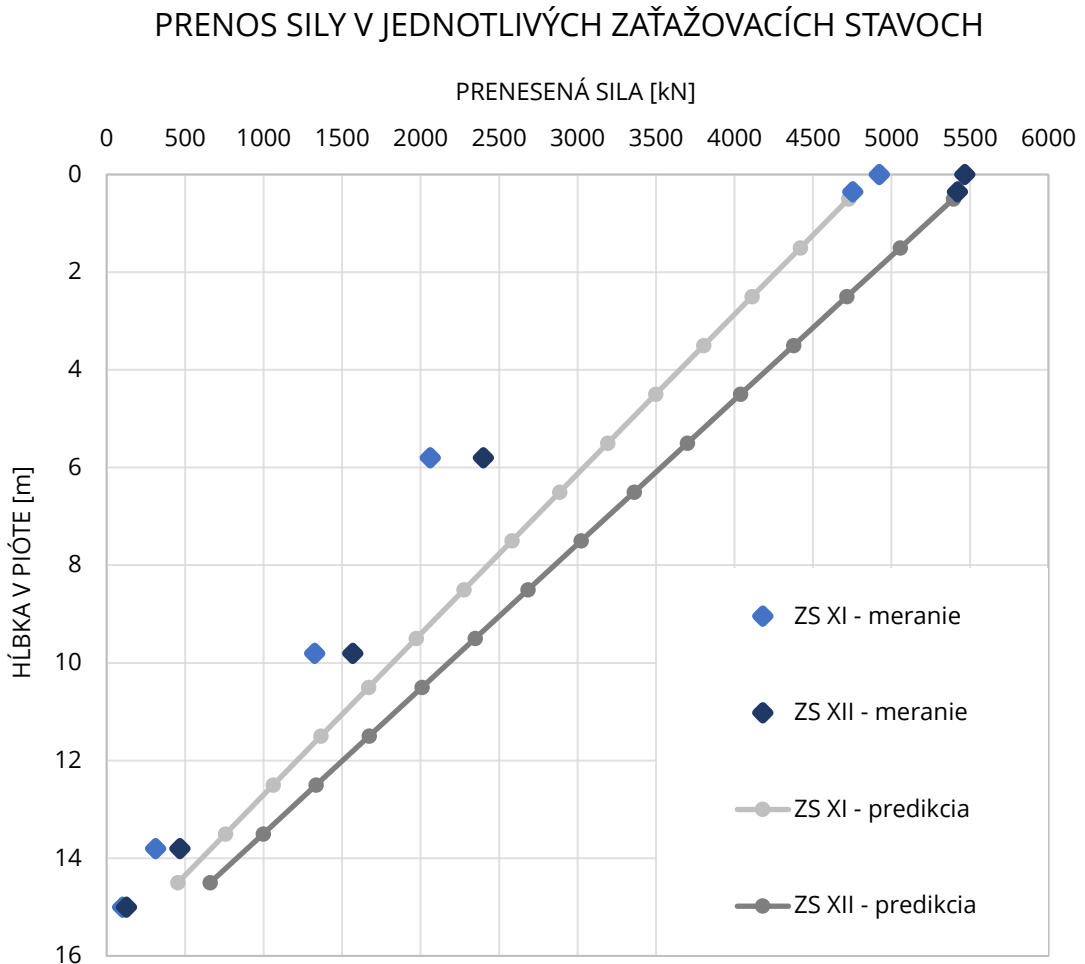
Tabuľka 5.2 – vstupné parametre do predikcie, objekt D 4704 SO 225.



Graf 5.3 – porovnanie medzných zaťažovacích kriviek, D 4704 SO 225.

Počiatočná tuhosť zeminy je pomerne nízka, no vzhľadom na meranie nebolo možné túto hodnotu zvýšiť, keďže by sa medzná zaťažovacia krivka vo vyšších zaťažovacích stavoch ešte viac vychýlila od nameranej medznej zaťažovacej krivky vplyvom menších posunutí v hlave pilóty.

Snahou bolo dosiahnuť posledný nameraný bod v zaťažovacej skúške (5468 kN a posunutím v hlave pilóty 37,61 mm) vhodne zvoleným maximálnym plášťovým trením. Porovnanie prenosov síl po dĺžke pilóty je zobrazené v grafe 5.4.



Graf 5.4 – porovnanie prenosov síl po dĺžke pilóty, D 4704 SO 225.

V grafe 5.4 je zobrazený prenos síl po dĺžke pilóty, pričom bola snaha dosiahnuť maximálnu zhodu s nameranými hodnotami prenosu síl v ZS XI a ZS XII. Vplyvom nedokonalnej separácie mali plášťové trenia v separovanej časti pri nižších ZS vysoké hodnoty. Pri ZS XI a ZS XII boli tieto hodnoty zodpovedajúce separácii (graf 3.6). Podobne ako v prípade spätnej analýzy zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225 nastala situácia, kedy by plášťové trenie v hornej časti pilóty bolo vyššie ako v dolnej časti a prenesené sily v hĺbkach 5,8 m; 9,8 m; 13,8 m nebolo možné dosiahnuť.

V tomto prípade však nemohla byť chyba v hodnote modulu pružnosti betónu, keďže ten bol počítaný na základe zmeranej sily a pomerného pretvorenia v časti so separáciou podľa Hookovho zákona. Je možné, že pri vŕtaní pilóty a ani pri podrobnom geologickom prieskume nebola zachytená vrstva hrubozrnnejšieho materiálu, ktorý by toto správanie spôsobil. Najreálnejšou príčinou je zvýšenie priemeru pilóty v týchto hĺbkach (Rui a ďalší, 2017), čo by spôsobovalo aj menšie namerané hodnoty pomerného pretvorenia.



## 6 ZÁVER

V predloženej bakalárskej práci je popísaný princíp fungovania metódy prenosových funkcií a jej aplikácia na predikciu správania vrтанých pilót. Použitý bol hyperbolický tvar prenosovej funkcie. Súčasťou práce je aj parametrická štúdia, ktorá interpretuje vplyvy parametrov na predikciu. Spätne boli analyzované dve zaťažovacie skúšky veľkopriemerových vrтанých pilót ako mostných základov na diaľnici D47, konkrétne objekty SO 210 a SO 225.

V spätnej analýze objektu SO 210 mala pilóta priemer 1,2 m a dĺžka bola 16 m rovnako ako skutočná pilóta. Prostredie bolo rozdelené do troch vrstiev podľa vypočítaného plášťového trenia a popisu zeminy pri vrтанí pilóty. Hodnoty charakterizujúce tieto vrstvy sú uvedené v tabuľke 5.1. Bola dosiahnutá pomerne presná zhoda medzi medznou zaťažovacou krivkou z merania a z predikcie. Graficky je znázornená v grafe 5.1. Hodnoty síl prenesených po dĺžke pilóty (graf 5.2), ktoré boli zmerané tenzometrami v hĺbkach 5 m; 9 m; 12,5 m; 15,5 m nebolo možné dosiahnuť z troch možných dôvodov. Prvým je predpoklad prímеси jemnozrnného piesku v hĺbke 2,0 – 3,5 m podľa popisu zeminy pri vrтанí. Toto by spôsobovalo vyššie plášťové trenie v rozmedzí hĺbok 0,0 – 5 m, ako v časti od 5,0 m po pätu pilóty. Druhým dôvodom môže byť použitie nesprávneho modulu pružnosti pri výpočte prenesenej sily vzhľadom na nízke napätie v pilóte v porovnaní s tlakovou pevnosťou. Vhodnejšie pre výpočet prenesenej sily by bolo použitie počiatočného dotyčnicového modulu pružnosti betónu (o 5 – 20 % vyšší) namiesto sečnicového modulu pružnosti betónu. (Bamforth a ďalší, 2008) Tretím dôvodom môže byť premenný priemer po dĺžke pilóty, ktorým by sa menila plocha a teda aj tuhosť prierezu, čo spôsobuje menšie pomerné pretvorenie a teda aj menšie hodnoty prenesenej sily v danej hĺbke. (Rui a ďalší, 2017)

V spätnej analýze objektu SO 225 mala pilóta priemer 0,94 m a dĺžku 15 m. Dĺžka modelovanej pilóty bola znížená z 19,35 m na 15 m účinnej dĺžky vplyvom separácie v hornej časti pilóty. Prostredie bolo tvorené jednou vrstvou podľa vypočítaného plášťového trenia a popisu zeminy pri vrtaní pilóty. Hodnoty charakterizujúce tieto vrstvy sú uvedené v tabuľke 5.2. Taktiež bola dosiahnutá pomerne presná zhoda medzi medznou zaťažovacou krivkou z merania a z predikcie. Graficky je znázornená v grafe 5.3. Hodnoty síl prenesených po dĺžke pilóty (graf 5.4), ktoré boli zmerané tenzometrami v hĺbkach 5,8 m; 9,8 m; 13,8 m nebolo možné dosiahnuť z dvoch možných dôvodov. V porovnaní so spätou analýzou objektu SO 210 bol použitý správny modul pružnosti betónu, keďže tento modul bol prepočítaný základe zmeranej sily a pomerného pretvorenia v časti so separáciou podľa Hookovho zákona. A teda prvým dôvodom je možnosť, že pri vrtaní pilóty a ani pri podrobnom geologickom prieskume nebola zachytená vrstva hrubozrnnejšieho materiálu, ktorý by toto správanie spôsoboval. Avšak najreálnejším dôvodom zostáva taktiež premenný priemer po dĺžke pilóty ako aj v prípade objektu SO 210. (Rui a ďalší, 2017)

## 7 POUŽITÉ ZDROJE

**C. Bohn, A. Lopes dos Santos, R. Frank.** *Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests.* Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 2016. 143(1), s. 1-15.

**Geotest, a.s., Brno.** *Podrobný geotechnický průzkum.* Geotest, a.s., Brno, březen, 2001.

**J. Hulla, P. Turček.** *Zakladanie stavieb.* Jaga Group. 2004. 350 s. ISBN 978-8-0807-6023-6.

**K. Soga, V. Kwan, L. Pelecanos, Y. Rui, T. Schwamb, H. Seo a M. Wilcock.** *The Role of Distributed Sensing in Understanding the Engineering Performance of Geotechnical Structures.* United Kingdom: Institute of Civil Engineers publishing. 2015. s. 1-38. ISBN 978-0-7277-6067-8.

**P. Bamforth, D. Chisholm, J. Gibbs, T. Harrison.** *Properties of Concrete for use in Eurocode 2.* United Kingdom: The Concrete Centre. 2008. s. 19-20. ISBN 978-1-904482-39-0.

**S. B. Reddy, M. O'Reilly, D.N. Chapman.** *Modified T - Z model - a software for tension piles.* Elsevier Science Ltd. 1998. 68 (6), s. 613-625.

**SKANSKA.** *Zatěžovací zkouška piloty SO 210 - závěrečná zpráva.* Brno: SKANSKA, únor, 2005.

**SKANSKA.** *Zatěžovací zkouška piloty SO 225 - závěrečná zpráva.* Brno: SKANSKA, květen, 2006.

**Y. Rui, C. Kechavarzi, F. O'Leary, Ch. Barker, D. Nicholson and K. Soga.** *Integrity Testing of Pile Cover Using Distributed Fibre Optic Sensing.* Sensors. 2017. 17 (12). s. 1-21.

## 8 ZOZNAM POUŽITÝCH SKRATIEK A SYMBOLOV

$A$	prierezová plocha pilóty
$d_1$	priemer pilóty
$\Delta z_i$	dĺžka i-teho segmentu
$e_i$	elastická deformácia i-teho segmentu
$E_c$	Youngov modul pružnosti betónu
$E_s$	Youngov modul pružnosti oceli
$l_c$	index konzistencie
$l_D$	index relatívnej uľahlosti
$L$	dĺžka pilóty
$M_s$	parameter počiatocnej tuhosti zeminy
$M_b$	parameter počiatocnej tuhosti v päte pilóty
$N$	počet segmentov
$P_i$	zaťaženie pôsobiace na i-ty segment
$P_s$	súčet zaťažení prenesených jednotlivými segmentami pilóty
$P_i'$	priemerné zaťaženie pôsobiace na i-ty segment
$R_0$	polomer pilóty
$s$	posunutie v hlave pilóty
$S_i$	zaťaženie prenesené i-tým segmentom
$U_{con}$	smerná únosnosť osamelej pilóty
$U_{pu}$	únosnosť pilóty odpovedajúca posunutiu v hlave pilóty 25 mm
$U_{vd}$	zvislá výpočtová únosnosť osamelej pilóty
$y_i$	posun na vrchu i-teho segmentu
$Z_i$	hĺbka stredu segmentu po hlavou pilóty
$\Delta F_i$	sila prenesená i-tým segmentom
$\varepsilon$	pomerné pretvorenie
$\sigma_{max}$	únosnosť v päte pilóty
$\sigma_{ri}$	radiálne napätie na stred i-teho segmentu
$\Delta y_i$	posun stredu i-teho segmentu
$\tau_i$	plášťové trenie i-teho segmentu
$\tau_{max}$	maximálne plášťové trenie

## 9 ZOZNAM OBRÁZKOV, TABULIEK A GRAFOV

### Obrázky:

Obrázok 2.1 – výpočet zaťaženia a posunutia po dĺžke pilóty. Upravený na základe materiálu s názvom „Modified $\tau$ – s model – a software for tension piles“. (Reddy a ďalší, 1998) .....	11
Obrázok 2.2 – diagram metódy prenosových funkcií, 1. časť. ....	15
Obrázok 2.3 – diagram metódy prenosových funkcií, 2. časť. ....	16
Obrázok 5.1 – zobrazenie dotyčnicového modulu pružnosti (initial tangent modulus) a sečnicového modulu pružnosti (secant modulus) v pracovnom diagrame betónu. (Bamforth a ďalší, 2008) .....	61

### Tabuľky:

Tabuľka 3.1 – geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4707 SO 210.....	18
Tabuľka 3.2 – zjednotený geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4707 SO 210. ....	19
Tabuľka 3.3 – hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu D 4707 SO 210.....	20
Tabuľka 3.4 – namerané hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch objektu D 4707 SO 210.....	21
Tabuľka 3.5 – namerané hodnoty posunutí v hlave pilóty v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.....	22
Tabuľka 3.6 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4707 SO 210. ....	23
Tabuľka 3.7 – rozdiely síl na hornej a dolnej hrane segmentov v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.....	25
Tabuľka 3.8 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210. ....	26
Tabuľka 3.9 – geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225.....	27
Tabuľka 3.10 – zjednotený geologický profil zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225. ....	28
Tabuľka 3.11 – hodnoty jednotlivých zaťažovacích stavov zaťažovacej skúšky objektu D 4704 SO 225.....	29
Tabuľka 3.12 – namerané hodnoty síl v jednotlivých zaťažovacích stavoch objektu D 4704 SO 225.....	31
Tabuľka 3.13 – namerané hodnoty posunutí v hlave pilóty v jednotlivých ZS objektu D 4704	

SO 225.....	32
Tabuľka 3.14 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4704 SO 225, časť 1.....	34
Tabuľka 3.15 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4704 SO 225, časť 2.....	34
Tabuľka 3.16 – rozdiely síl na hornej a dolnej hrane segmentov v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 1.....	36
Tabuľka 3.17 – rozdiely síl na hornej a dolnej hrane segmentov v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 2.....	36
Tabuľka 3.18 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 1.....	37
Tabuľka 3.19 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225, časť 2.....	37
Tabuľka 4.1 – hodnoty únosnosti v päte podľa (Hulla a ďalší, 2004).....	46
Tabuľka 4.2 – vstupy do predikcie, ťahaná pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer pilóty 1,2 m.....	46
Tabuľka 4.3 – vstupy do predikcie, tlačaná pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer pilóty 1,2 m.....	49
Tabuľka 4.4 – vstupy do predikcie, ťahaná pilóta s dvoma vrstvami podložia.....	52
Tabuľka 4.5 – vstupy do predikcie, tlačaná pilóta s dvoma vrstvami podložia.....	54
Tabuľka 5.1 – vstupné parametre do predikcie, objekt D 4707 SO 210.....	59
Tabuľka 5.2 – vstupné parametre do predikcie, objekt D 4704 SO 225.....	62

### **Grafy:**

Graf 3.1 – medzná zaťažovacia krivka objektu D 4707 SO 210.....	23
Graf 3.2 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4707 SO 210.....	24
Graf 3.3 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4707 SO 210.....	26
Graf 3.4 – medzná zaťažovacia krivka objektu D 4704 SO 225.....	33
Graf 3.5 – prenesené sily v jednotlivých ZS po dĺžke pilóty objektu D 4704 SO 225.....	35
Graf 3.6 – plášťové trenie na segmentoch v jednotlivých ZS objektu D 4704 SO 225.....	38
Graf 3.7 – prenos síl po dĺžke pilóty s premenným modulom pružnosti betónu.....	40
Graf 3.8 – plášťové trenie na segmentoch s premenným modulom pružnosti betónu.....	41

Graf 3.9 – prenos síl po dĺžke pilóty s premenným priemerom pilóty. ....	43
Graf 3.10 – plášťové trenie na segmentoch s premenným priemerom pilóty. ....	44
Graf 4.1 – medzné zaťažovacie krivky, ťahaná pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer pilóty 1,2 m. ....	47
Graf 4.2 – prenos sily po dĺžke pilóty pri jednotlivých posunutiach v hlave pilóty, kombinácia a).....	48
Graf 4.3 – medzné zaťažovacie krivky, tlačaná pilóta s jednou vrstvou podložia, priemer 1,2 m.....	49
Graf 4.4 – prenosová funkcia päty pilóty. (Bohn a ďalší, 2016).....	50
Graf 4.5 – prenosová funkcia segmentov pilóty. (Bohn a ďalší, 2016).....	50
Graf 4.6 – medzné zaťažovacie krivky, ťahaná a tlačaná pilóta. ....	51
Graf 4.7 – medzné zaťažovacie krivky, ťahaná pilóta s dvoma vrstvami podložia. ....	52
Graf 4.8 – detail rozdielu posunutia v hlave pilóty pre rôzne usporiadanie vrstiev. ....	53
Graf 4.9 – prenos sily po dĺžke pilóty pri jednotlivých posunutiach v hlave pilóty.....	54
Graf 4.10 – medzné zaťažovacie krivky, tlačaná pilóta s dvoma vrstvami podložia.....	55
Graf 4.11 – prenos sily po dĺžke pilóty pri jednotlivých posunutiach v hlave pilóty. ....	56
Graf 4.12 – medzné zaťažovacie krivky, ťahané a tlačané pilóty. ....	57
Graf 5.1 – porovnanie medzných zaťažovacích kriviek, D 4707 SO 210. ....	59
Graf 5.2 – porovnanie prenosov síl po dĺžke pilóty, D 4707 SO 210. ....	60
Graf 5.3 – porovnanie medzných zaťažovacích kriviek, D 4704 SO 225. ....	62
Graf 5.4 – porovnanie prenosov síl po dĺžke pilóty, D 4704 SO 225. ....	63