



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEOTECHNIKY**

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**ODVOZENÍ PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ PRO  
VRTANÉ PILOTY**

DETERMINATION OF LOAD-TRANSFER FUNCTIONS FOR BORED PILES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Simona Čechová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.**

**BRNO 2019**





# 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	Simona Čechová
Název	Odvození přenosových funkcí pro vrtané piloty
Vedoucí práce	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2018
Datum odevzdání	24. 5. 2019

V Brně dne 30. 11. 2018

---

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. 1995.
  - HIDEKI HIRAYMA. Load-settlement analysis for bored piles using hyperbolic transfer functions. 1990.
  - 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. 2012.
- Další podklady budou předány na základě konzultací v průběhu samotného řešení bakalářské práce.

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Cílem navrhované bakalářské práce je odvození tvaru přenosových funkcí (mobilizačních křivek) pro plášť a patu vrtaných velkopřůměrových pilot na základě současných běžně používaných empirických/semiempirických návrhových postupů. Práce je rámcově rozčleněna do tří celků:

- V první části práce bude ožřejmen princip fungování metody přenosových funkcí.
- Druhá část práce je zaměřena na rozbor doporučených tvarů přenosových funkcí používaných v zahraničí. Dále zde budou definovány vstupní veličiny nutné pro sestavení mobilizačních křivek.
- Ve třetí části práce pak budou odvozeny vlastní tvary přenosových funkcí formou transformace v současnosti používaného postupu pro návrh pilot. Sestavené přenosové funkce budou srovnány se zahraničními doporučeními.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Práce se skládá z části teoretické a praktické. V části teoretické byl ozřejměn princip současně používané metody dle Masopust (1994) pro analýzu vrtaných osamělých svisle zatížených pilot. Dále byl vysvětlen princip fungování metody přenosových funkcí a byl proveden rozbor doporučených tvarů přenosových funkcí používaných v zahraničí a následná definice nutných vstupních parametrů pro vybrané mobilizační křivky.

V části praktické byla provedena transformace metody dle Masopust (1994) a výpočet limitních napětí pro piloty, následně byly určeny hodnoty deformačních parametrů přenosových funkcí pro sestavení kubické a hyperbolické mobilizační křivky. V posledním kroku byly přenosové funkce sestrojeny pro patu i plášť vrtaných pilot v různých hloubkách v zeminách soudržných a nesoudržných.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Geotechnika, vrtané piloty, metoda přenosových funkcí, mobilizační křivka, plášťové tření, odpor na patě, sedání.

## **ABSTRACT**

The thesis is consisted of theoretical and practical part. In theoretical part was described nowadays commonly used method for analysis of single axially loaded replacement piles defined by Masopust (1994). There was also explained principle of load transfer method and was done analysis of mobilization curves, which are applied abroad, and finally were defined essential entry parameters for construction of selected load transfer curves.

In practical part method by Masopust (1994) was transformed, limit shear stresses and tip resistances were calculated and values of deformation parameters for constructing cubic root curve and hyperbolic load transfer curve were determined. In the last step both types of load transfer curves were constructed for shaft and pile tip of a replacement pile in different depths in fine-grained soil and in coarse-grained soil.

## **KEYWORDS**

Geotechnics, replacement piles, axially loaded piles, load transfer method, mobilization curve, skin friction, tip resistance, settlement.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Simona Čechová *Odvození přenosových funkcí pro vrtané piloty*. Brno, 2019. 61 s., 13 s. příl. 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 *Odvození přenosových funkcí pro vrtané piloty* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 20. 5. 2019

---

Simona Čechová  
autor práce

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Odvození přenosových funkcí pro vrtané piloty* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 20. 5. 2019

---

Simona Čechová  
autor práce



## **PODĚKOVÁNÍ**

Chtěla bych poděkovat vedoucímu práce panu Ing. Juraji Chalmovskému, Ph.D. za pomoc s výběrem tématu, trpělivost a poskytnutí rad během vypracování této práce. Také bych chtěla poděkovat svojí rodině a přátelům za to, že mě během celého studia podporovali a motivovali.

# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>11</b>
<b>2</b>	<b>SESTAVENÍ MEZNÍ ZATĚŽOVACÍ KŘIVKY DLE MASOPUSTA</b>	<b>12</b>
2.1	Mezní plášťové tření a mezní odpor na patě piloty	13
2.2	Zatížení na mezi plné mobilizace tření na plášti	16
2.3	Sedání na mezi plné mobilizace plášťového tření	17
2.4	Síla vyvozující sedání 25 mm	21
<b>3</b>	<b>METODA PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ</b>	<b>22</b>
3.1	Princip metody	22
3.2	Doporučené tvary přenosových funkcí	23
3.2.1	Kubická parabola	24
3.2.2	Hyperbola	26
<b>4</b>	<b>ODVOZENÍ TVARU PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ</b>	<b>28</b>
4.1	Stanovení limitních hodnot plášťových tření a napětí na patě	28
4.1.1	Mezní plášťové tření	28
4.1.2	Mezní napětí na patě	30
4.2	Power law (mocninná funkce)	32
4.2.1	Limitní plášťová tření	33
4.2.1.1	Soudržné zeminy	33
4.2.1.2	Nesoudržné zeminy	35
4.2.2	Limitní napětí na patě	37
4.2.2.1	Soudržné zeminy	38
4.2.2.2	Nesoudržné zeminy	40
4.3	Přenosové funkce	42
4.3.1	Hyperbola	42
4.3.1.1	Plášťové tření	42
4.3.1.2	Napětí na patě	45
4.3.2	Kubická parabola	47
4.3.2.1	Plášťové tření	47
4.3.2.2	Napětí na patě	49
4.4	Vliv průměru piloty	51
<b>5</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>54</b>
<b>6</b>	<b>POUŽITÉ ZDROJE</b>	<b>55</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ</b>	<b>56</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK</b>	<b>58</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>61</b>

## 1 ÚVOD

Pro výpočet 2. mezního stavu vrtaných pilot se v současnosti v České republice často využívá metoda dle Masopust (1994). Jedná se o metodu analytickou, která je doplněna o řadu empirických konstant a regresních a korekčních součinitelů. Alternativní postup pro sestavení mezní zatěžovací křivky piloty je metoda přenosových funkcí. Vychází z jasného fyzikálního principu, kdy postupné mobilizaci plášťového tření/napětí na patě odpovídá relativní pohyb konstrukce – zemina. Její použití je časté např. ve Francii, kde se osvědčila jako efektivní a přesný způsob pro odvození zatěžovací křivky vrtaných osamělých svisle zatížených pilot. Tato metoda si určitě zaslouží pozornost a další rozvoj.

## 2 SESTAVENÍ MEZNÍ ZATĚŽOVACÍ KŘIVKY DLE MASOPUSTA

V současnosti používanou metodou pro sestavení mezní zatěžovací křivky osově zatížené piloty je postup dle Masopust (1994). Tato metoda byla vytvořena na základě statických zatěžovacích zkoušek pilot a následné statistické analýze výsledků, pomocí které byly odvozeny regresní součinitele používané pro výpočet (viz Tab. 2.1). (Masopust (1994))

Mezní zatěžovací křivka vyjadřuje závislost sedání piloty na velikosti svislého zatížení v její hlavě. Skládá se ze dvou částí – z kubické paraboly a přímky (Obr. 2.1). Tyto dvě křivky se stýkají v bodě určeném zatížením na mezi plné mobilizace plášťového tření  $R_y$  (rov. (2.11)), kterému odpovídá sedání  $s_y$  (rov. (2.12)). Kubická parabola platí pro obor zatěžování  $0 \leq R \leq R_y$  a je určena rovnicí dle Masopust (1994):

$$s = s_y * \left(\frac{R}{R_y}\right)^2 \quad (2.1)$$

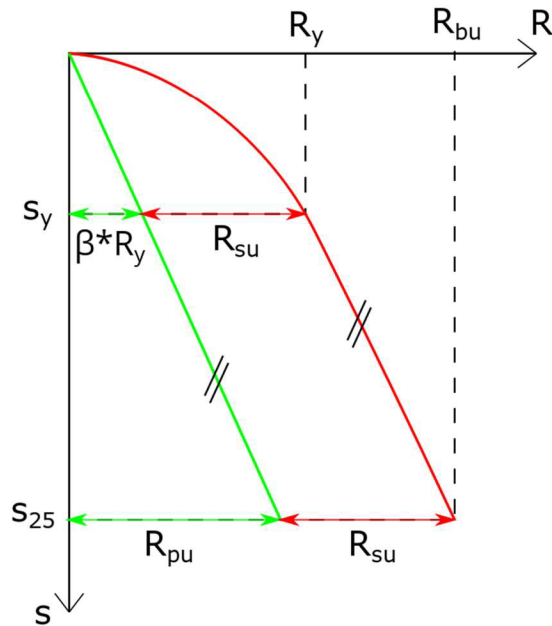
- R svislá síla zatěžující pilotu
- $R_y$  svislé zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření
- $s_y$  sedání piloty při zatížení  $R_y$

Přímková část platí pro obor zatížení  $R_y \leq R \leq R_{bu}$  dle Masopust (1994):

$$s = s_y + \frac{s_{25} - s_y}{R_{bu} - R_y} * (R - R_y) \quad (2.2)$$

- $s_y$  sedání piloty při zatížení  $R_y$
- $s_{25}$  sednutí piloty o velikosti 25 mm
- $R_{bu}$  zatížení vyvolující sednutí piloty  $s_{25}$
- R svislá síla zatěžující pilotu
- $R_y$  svislé zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření

*„Vrtané piloty přenášejí svislé tlakové zatížení do okolního zemního prostředí pláštěm a patou, přičemž nejde o zcela nezávislé komponenty celkové únosnosti.“* uvádí Masopust (1994). Nejprve je zatížení přenášeno plášťovým třením, jehož velikost narůstá s sedáním. Při určité hodnotě deformace dosáhne plášťové tření maxima a při dalším zatlačování piloty se téměř nemění (Masopust (1994). Obr. 2.1 zachycuje tento mechanismus mobilizace únosnosti vrtaných pilot, kde červená křivka reprezentuje celkovou únosnost piloty, zelená vyjadřuje zatížení přenášené pouze její patou.



Obr. 2.1 Mezní zatěžovací křivka vrtané piloty dle Masopust (1994) (červená), zatížení přenášené patou (zelená)

## 2.1 Mezní plášťové tření a mezní odpor na patě piloty

Pro mezní tření na plášti platí dle Masopust (1994):

$$q_{si} = a - \frac{b}{D_i / d_i} \quad (2.3)$$

- a, b regresní koeficienty zeminy v i-té vrstvě profilu (Tab. 2.1)
- $D_i$  hloubka od povrchu terénu do středu i-té vrstvy profilu
- $d_i$  průměr piloty v i-té vrstvě

Průměrné plášťové tření dle Masopust (1994):

$$\bar{q}_s = \frac{\sum (d_i \cdot l_i \cdot q_{si})}{\sum (d_i \cdot l_i)} \quad (2.4)$$

- $d_i$  průměr piloty v i-té vrstvě
- $l_i$  mocnost i-té vrstvy profilu
- $q_{si}$  mezní plášťové tření v i-té vrstvě (rovnice (2.3))

Pro mezní odpor na patě platí dle Masopust (1994):

$$q_p = e - \frac{f}{l / d_p} \quad (2.5)$$

- e, f    regresní koeficienty pro zeminu v patě piloty (Tab. 2.1)
- l      hloubka, ve které se pata nachází
- $d_p$    průměr piloty v patě

Uvedené rovnice pro výpočet mezního tření na plášti piloty (rovnice (2.3)) a mezního odporu na její patě (rovnice (2.5)) vychází z funkce nepřímé úměrnosti (rovnice (2.6)), ze které byly odvozeny ve dvou krocích:

$$f(x) = \frac{k}{x} \quad (2.6)$$

$$f_1(x) = -\frac{k}{x} \quad (2.7)$$

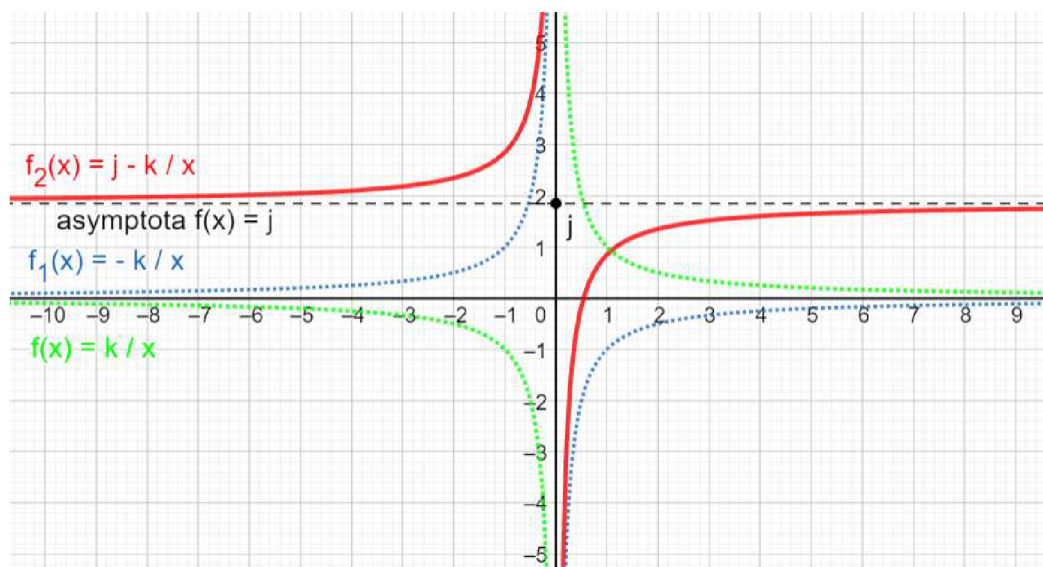
$$f_2(x) = j - \frac{k}{x} \quad (2.8)$$

- x    proměnná
- k    konstanta – libovolné reálné číslo různé od nuly
- j    konstanta – libovolné reálné číslo

Rovnice (2.6) je obecným zápisem nepřímé úměrnosti, jejíž grafem je rovnoosá hyperbola. V prvním kroku byla hyperbola zrcadlena kolem osy x – rovnice (2.5). V druhém kroku byla původní asymptota grafu osa x nahrazena rovnoběžkou v hodnotě  $j$  na ose y – rovnice (2.6). Jednotlivé grafy jsou znázorněny v Obr. 2.2.

Konstanta  $k$  je v rovnicích (2.3) a (2.5) vyjádřena součinem regresního koeficientu  $b$  a průměru piloty  $d_i$  nebo součinem regresního koeficientu  $f$  a průměru paty  $d_p$ . Proměnné  $x$  odpovídá v rovnici (2.3) hloubka středu vrstvy  $D_i$  a v rovnici (2.5) hloubka paty pilot  $l$ . Pozici konstanty  $j$  zastávají v rovnicích (2.3) a (2.5) regresní koeficienty  $a$  a  $e$ , jsou tedy hodnotami asymptotickými, tudíž je můžeme nazvat limitními hodnotami plášťového tření  $q_{s,lim}$  a limitními napětími na patě  $q_{p,lim}$  (viz Tab. 2.1).

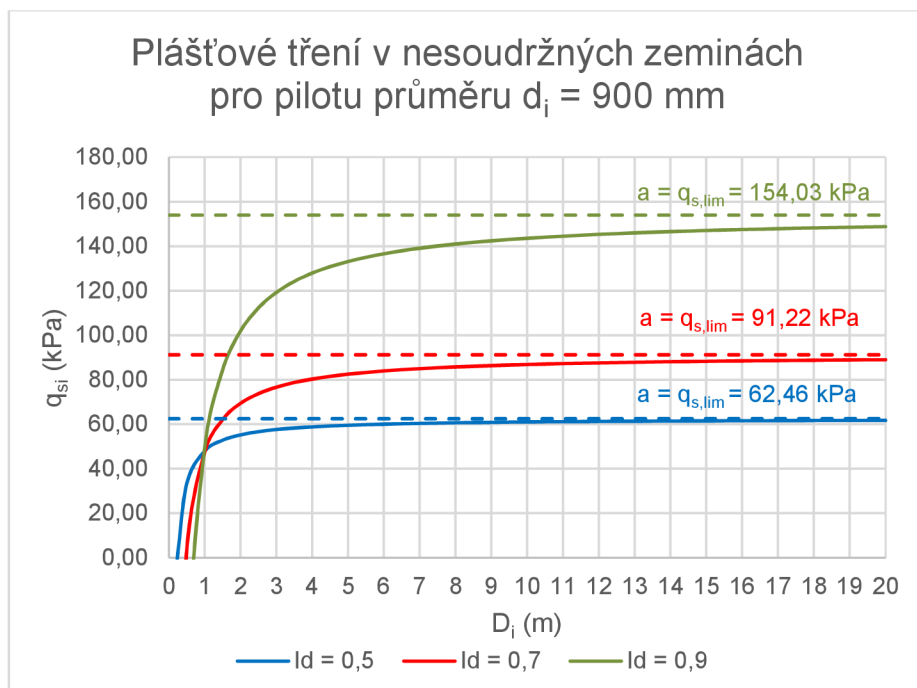
Příklady konkrétních průběhů plášťového tření  $q_{si}$  po hloubce  $D_i$  zobrazuje Obr. 2.3. Zde je jasně vidět, že plášťové tření  $q_{si}$  má hyperbolický průběh a že regresní koeficienty  $a$  tvoří asymptoty a tedy skutečně jsou limitními hodnotami plášťového tření  $q_{s,lim}$ .



Obr. 2.2 Příkladů grafů nepřímé úměrnosti (připraveno v programu GeoGebra)

Tab. 2.1 Regresní koeficienty pro jednotlivé typy zemin a hornin (převzato z Masopust & Glisníková (2007))

Zemina		Regresní koeficienty /kPa/			
Hornina		$a \approx q_{s,lim}$	b	$e \approx q_{p,lim}$	f
Poloskalní	R 3	246,02	225,95	2841,31	1298,96
	R 4	169,98	139,45	1616,22	1155,34
	R 5	131,92	94,96	957,61	703,89
Nesoudržné	ID = 0,5	62,46	16,06	268,11	174,89
	ID = 0,7	91,22	48,44	490,34	445,42
	ID = 0,9	154,03	115,88	1596,70	1399,88
Soudržné	IC = 0,5	46,39	20,81	197,74	150,22
	IC ≥ 1,0	97,31	108,59	987,60	1084,26



Obr. 2.3 Průběh plášťového tření  $q_{si}$  po hloubce  $D_i$  pro piloty průměru  $d_i = 900$  mm v nesoudržných zeminách dle metody Masopust (1994)

## 2.2 Zatížení na mezi plné mobilizace tření na plášti

Mezní síla přenášená na plášti dle Masopust (1994):

$$R_{su} = m_1 * m_2 * \pi * \sum_{i=1}^n (d_i * h_i * q_{si}) \quad (2.9)$$

- $m_1$  koeficient podle druhu zatížení
- $m_2$  koeficient vyjadřující vliv ochrany dřívku piloty
- $d_i$  průměr piloty v i-té vrstvě
- $h_i$  mocnost i-té vrstvy profilu
- $q_{si}$  mezní plášťové tření v i-té vrstvě (rov. (2.3))

Koeficient přenosu zatížení do paty piloty dle Masopust (1994):

$$\beta = \frac{q_p}{q_p + 4 * \bar{q}_s * l / d_p} \quad (2.10)$$

- $q_p$  mezní odpor na patě (rov. (2.5))
- $\bar{q}_s$  průměrné plášťové tření (rov. (2.4))
- $l$  hloubka, ve které se nachází pata piloty
- $d_p$  průměr paty piloty



Zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření dle Masopust (1994) (Obr. 2.1):

$$R_y = \frac{R_{su}}{1-\beta} = \beta \cdot R_y + R_{su} \quad (2.11)$$

$R_{su}$  mezní síla přenášená pláštěm (rov. (2.9))

$\beta$  koeficient přenosu zatížení do paty piloty (rov. (2.10))

### 2.3 Sedání na mezi plné mobilizace plášťového tření

Sedání na mezi mobilizace plášťového tření dle Masopust (1994):

$$s_y = I \cdot \frac{R_y}{\bar{d} \cdot \bar{E}_s} \quad (2.12)$$

$I$  příčinkový koeficient sedání piloty (rov. (2.14))

$R_y$  svislé zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření (rov. (2.11))

$\bar{d}$  vážený průměr profilů piloty

$\bar{E}_s$  průměrný sečnový modul deformace zemin podél dřívku (rov. (2.15))

Rovnice (2.12) vychází z postupu dle Poulos & Davis (1980):

$$\rho = \frac{P \cdot I}{E_s \cdot d} \quad (2.13)$$

$\rho$  sedání hlavy piloty

$P$  svislé zatížení

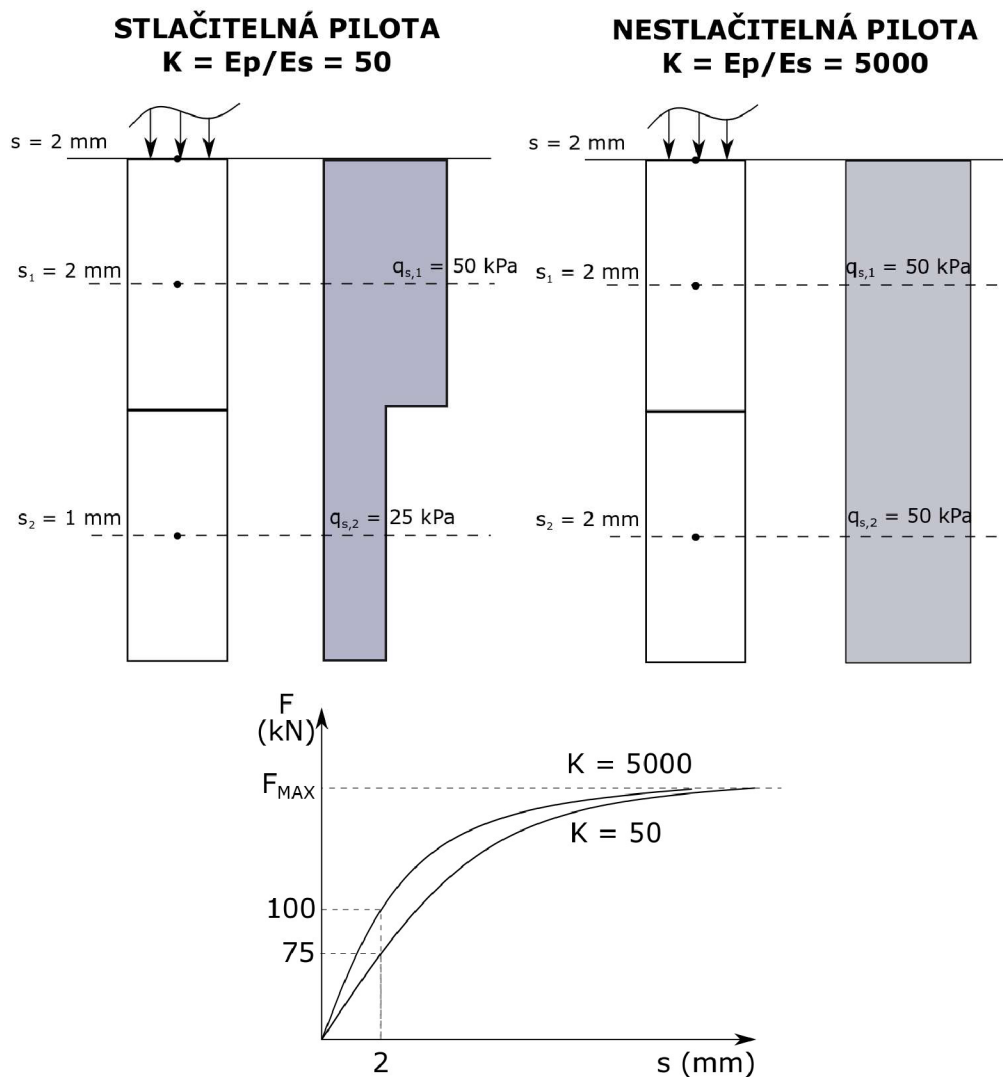
$I$  příčinkový koeficient sedání piloty

$E_s$  Youngův modul

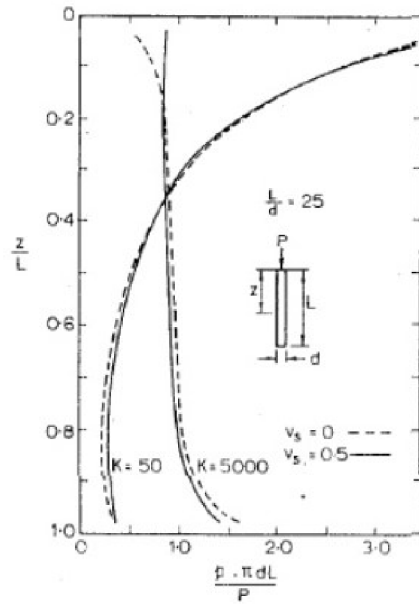
$d$  průměr piloty

Vztah byl vytvořen pro nestlačitelnou pilotu v pružném poloprostoru a doplněn o korekční faktor  $I$  (příčinkový koeficient sedání), který zohledňuje především vliv poměru tuhostí materiálu piloty  $E_p$  a okolní zeminy  $E_s$ . Tento poměr značíme  $K$ , jeho velikost říká, jak moc je pilota stlačitelná či nestlačitelná v daných podmínkách. Vliv tohoto faktoru na tvar mezní zatěžovací křivky ilustruje Obr. 2.4 pro stlačitelnou pilotu ( $K=50$ ) a nestlačitelnou pilotu ( $K = 5000$ ). Pro názornost je pilota rozdělena do dvou segmentů, každý má plochu  $1 \text{ m}^2$ . U nestlačitelné piloty ( $K = 5000$ ) se plášťové tření  $q_s$  mobilizuje rovnoměrně, avšak u piloty stlačitelné ( $K = 50$ ) se objevuje nárůst plášťového tření  $q_s$  u hlavy, což též znázorňuje Obr. 2.5. Rovnoměrná mobilizace plášťového tření  $q_s$  nestlačitelné piloty ( $K = 5000$ ) se projeví větší únosností  $F_{MAX}$  pro dané posunutí  $s$  v hlavě piloty, a tudíž větší celkovou tuhostí. (Poulos & Davis (1980))

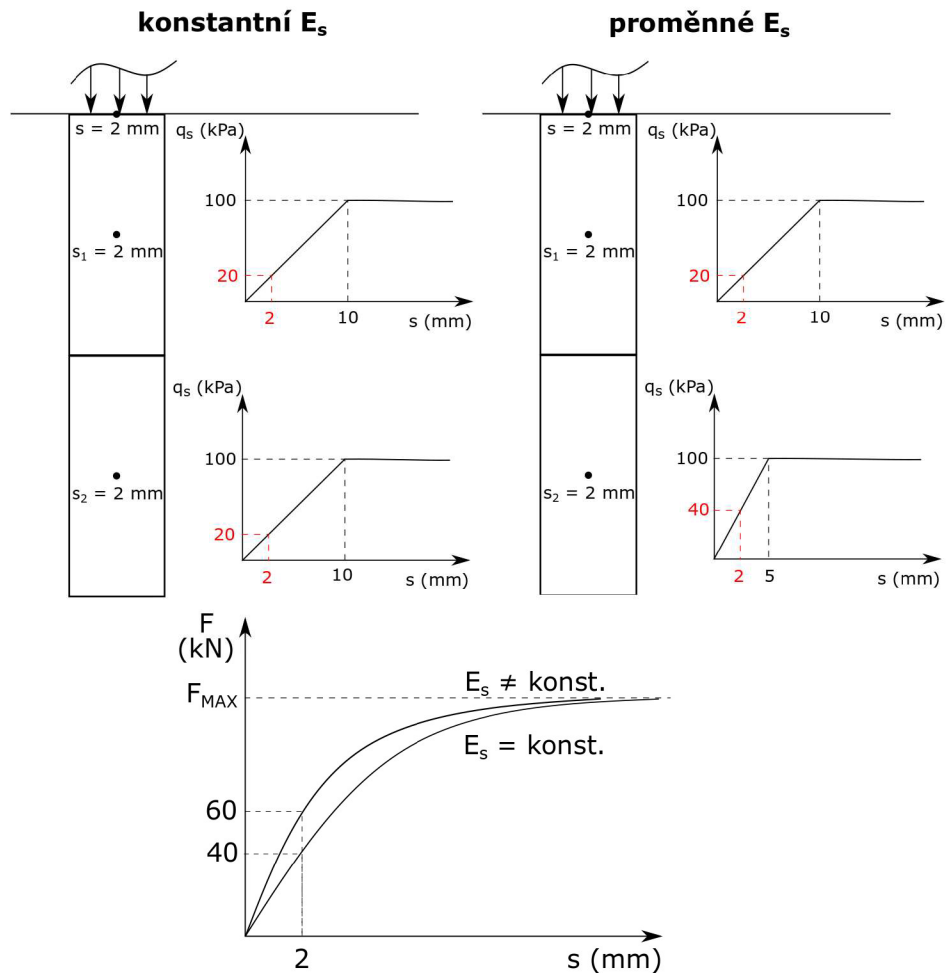
Příčinkový koeficient sedání / těž zahrnuje vliv nárůstu tuhosti okolní zeminy  $E_s$  s hloubkou. S narůstající hloubkou se v dané zemině rychleji mobilizuje plášťové tření  $q_s$  při stejné hodnotě sedání  $s$ . Tento jev a jeho vliv na tvar mezní zatěžovací křivky demonstruje Obr. 2.6, kde opět máme porovnány dvě piloty. Každá pilota je rozdělena do dvou segmentů o ploše  $1 \text{ m}^2$ . U první piloty není uvažován nárůst tuhosti  $E_s$  s hloubkou, tato pilota vykazuje menší celkovou únosnost  $F_{MAX}$  pro dané posunutí v hlavě piloty  $s$ . (Poulos & Davis (1980))



Obr. 2.4 Vliv tuhosti  $K$  (stlačitelnosti) na tvar mezní zatěžovací křivky piloty



Obr. 2.5 Distribuce plášťového tření podél dřívku pro pilotu stlačitelnou ( $K = 50$ ) a nestlačitelnou ( $K = 5000$ ) (převzato z Poulos & Davis (1980))



Obr. 2.6 Vliv nárůstu tuhosti zeminy  $E_s$  s hloubkou na tvar mezní zatěžovací křivky

Příčinkový koeficient sedání piloty dle Masopust (1994):

$$I = I_1 * R_k \quad (2.14)$$

- $I_1$  základní příčinkový koeficient sedání závislý poměru délky piloty  $l$  a průměru  $d$  (viz Obr. 2.8 a)
- $R_k$  korekční koeficient vlivu poměru tuhostí  $K$  v závislosti na poměru délky  $l$  a průměru  $d$  (viz Obr. 2.7 a)

Průměrný sečnový modul deformace zemín dle Masopust (1994):

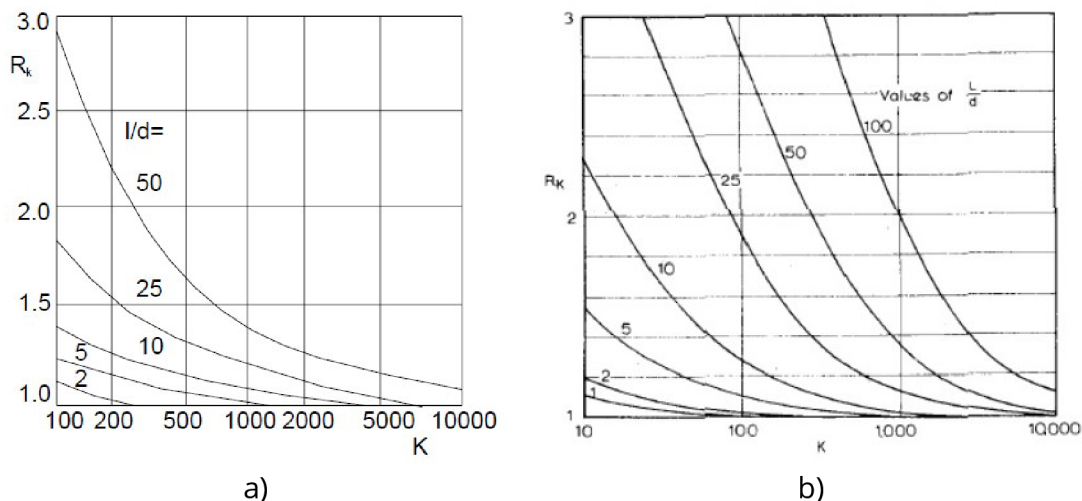
$$\bar{E}_s = \frac{\sum(E_{si} * h_i)}{\sum h_i} \quad (2.15)$$

- $E_{si}$  sečnový modul deformace zeminy  $i$ -té vrstvy (viz příloha P1)
- $h_i$  mocnost  $i$ -té vrstvy

Poměr tuhostí zemina – pilota dle Masopust (1994):

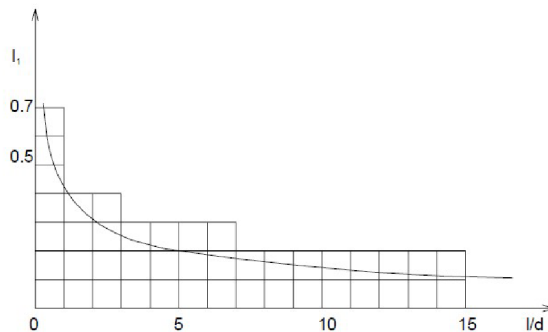
$$K = \frac{E_b}{\bar{E}_s} \quad (2.16)$$

- $E_b$  modul pružnosti materiálu piloty
- $\bar{E}_s$  průměrný sečnový modul deformace zeminy podél dřívku (rov. (2.15))

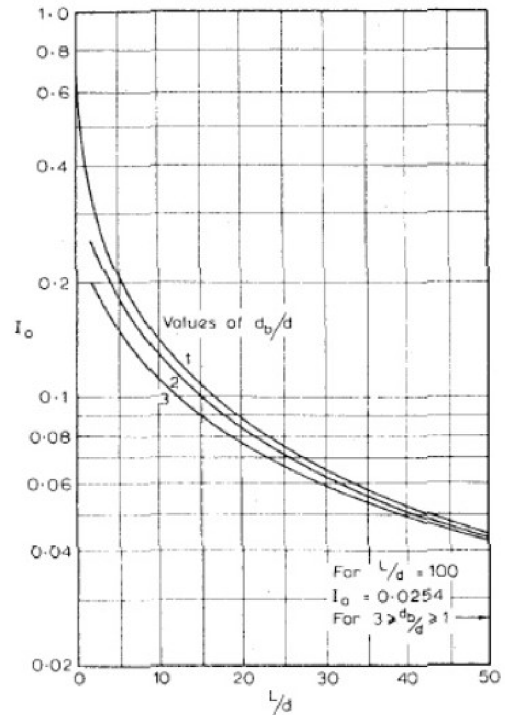


Obr. 2.7 a) Graf pro určení koeficientu  $R_k$  (převzato z Masopust & Glisníková (2007))

b) Výchozí graf pro graf a) (převzato z Poulos & Davis (1980))



a)



b)

Obr. 2.8 a) Graf pro určení příčinkového koeficientu sedání  $I_1$  (převzato z Masopust & Glisníková (2007))

b) Výchozí graf pro graf a) (převzato z Poulos & Davis (1980))

## 2.4 Síla vyvozující sedání 25 mm

Zatížení přenášené patou piloty při sedání 25 mm dle Masopust (1994):

$$R_{pu} = \beta \cdot R_y \cdot \frac{S_{25}}{S_y} \quad (2.17)$$

- $\beta$  koeficient přenosu zatížení do paty piloty (rov. (2.10))
- $R_y$  svislé zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření (rov. (2.11))
- $S_{25}$  sednutí piloty o velikosti 25 mm
- $S_y$  sedání piloty při zatížení  $R_y$  (rov. (2.12))

Zatížení vyvozující sedání piloty 25 mm dle Masopust (1994):

$$R_{bu} = R_{su} + R_{pu} \quad (2.18)$$

- $R_{su}$  mezní síla přenášená pláštěm (rov. (2.9))
- $R_{pu}$  síla přenášené patou (rov. (2.17))

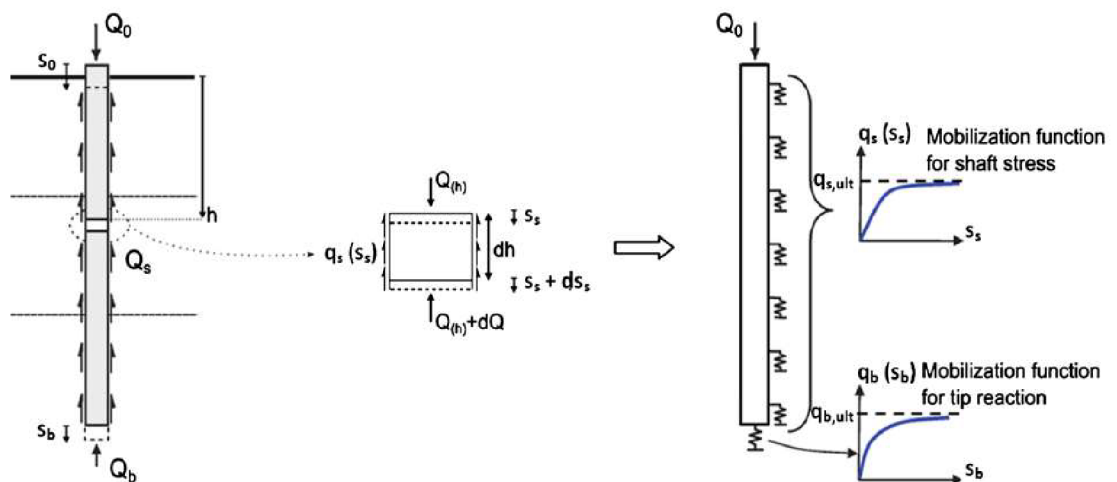
### 3 METODA PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

Aplikace metody přenosových funkcí (mobilizačních křivek) je velice efektivní a přesný způsob analýzy interakce osamělé svisle zatížené vrtané piloty s prostředím, ve kterém se nachází. Tato funkce vyjadřuje závislost mobilizovaného plášťového tření, v případě paty jejího mezního napětí, na velikosti relativního posunu mezi pilotou a zemínou (viz Obr. 3.1). Různé parametry zemín v různých lokalitách mají za následek odlišné hodnoty mezního tření na plášti a odporu na patě, případně mohou ovlivnit definici mobilizační křivky. Proto se při sestavování tvaru přenosových funkcí pro danou lokalitu kombinují jak základní poznatky stavební mechaniky, tak empirických přístupů. (Bohn (2016))

#### 3.1 Princip metody

Postup analýzy (viz Obr. 3.1):

1. Pilotu po délce rozdělíme na stejně velké segmenty
2. Kontakt základové půdy se segmenty a patou nahradíme nelineárními pružinami
3. Patě a každému středu segmentu přiřadíme konkrétní přenosovou funkci – závislost mezi smykovým napětím ( $q_s$ ,  $q_b$ ) a posunutím ( $s_s$ ,  $s_b$ )
4. Postup Analýzy od paty směrem k hlavě piloty
5. Pro zvolené velmi malé sedání paty piloty ( $s_b$ ) určíme z přenosové funkce napětí na patě ( $q_b$ )
6. Vypočteme sílu mobilizovanou na patě ( $Q_b$ )
7. Vypočteme svislý posun středu segmentu ( $s_s$ ) a z přenosové funkce určíme plášťové tření segmentu ( $q_s(s_s)$ )
8. Vypočteme sílu ( $Q_{(h)}+dQ$ ) na horní části segmentu a svislý posun ( $s_s+ds_s$ ) v tomto místě
9. Na spodní část následujícího segmentu aplikujeme posun a sílu působící na horní části předchozího segmentu ( $(s_s+ds_s, Q_{(h)}+dQ$ )
10. Opakujeme kroky 7 až 9, dokud ne získáme hodnoty veličin v hlavě piloty ( $s_0, Q_0$ )
11. Zvýšíme hodnotu sedání paty ( $s_b$ ) a opakujeme kroky 4 až 10, dokud nedosáhneme daného mezního sedání ( $s_{0,lim}$ ) v hlavě piloty
12. Sestavení zatěžovací křivky v hlavě piloty

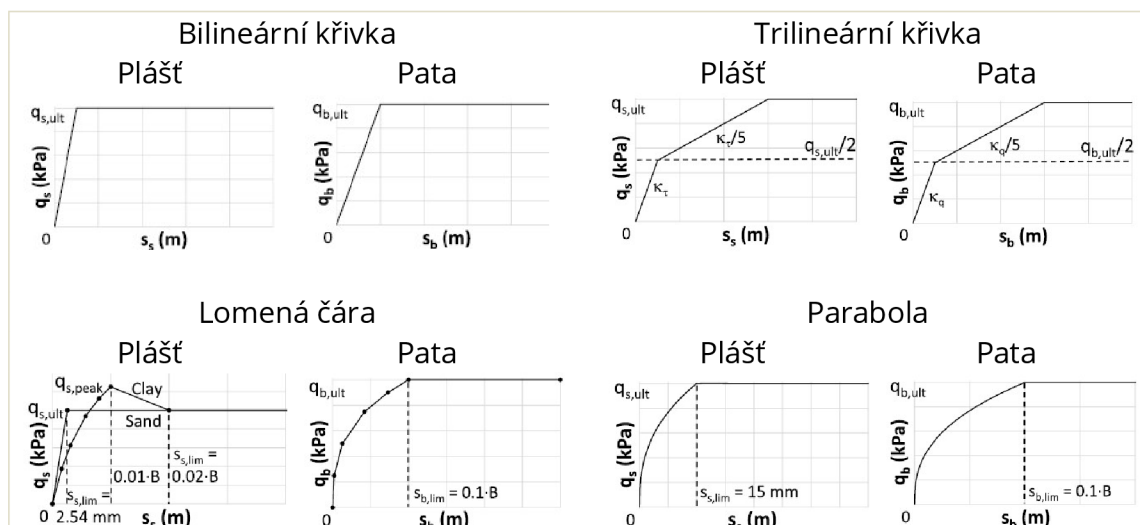


- $s_s$  sednutí segmentu
- $s_b$  sednutí paty piloty
- $s_0$  sednutí hlavy piloty
- $q_s$  plášťové tření
- $q_b$  odpor na patě
- $q_{s,ult}$  mezní plášťové tření
- $q_{b,ult}$  mezní odpor na patě piloty

Obr. 3.1 Model metody přenosových funkcí pro svisle zatížené piloty (převzato z Bohn (2016))

### 3.2 Doporučené tvary přenosových funkcí

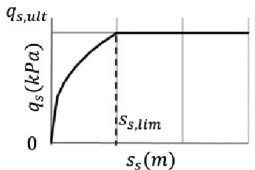
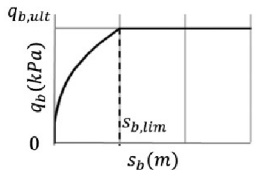
V současné době existují různé návrhy tvarů mobilizačních křivek s různými vstupními parametry (viz Obr. 3.2). Některé se doporučují pouze pro specifické typy zemin nebo typy pilot. Na základě 72 zatěžovacích zkoušek pilot byla nejlepší shoda prokázána pro kubickou parabolou a hyperbolu. (Bohn (2016))



Obr. 3.2 Některé příklady existujících tvarů mobilizačních křivek (převzato z Bohn (2016))

### 3.2.1 Kubická parabola

Tab. 3.1 Parametry kubické křivky (převzato z Bohn (2016))

	PLÁŠŤ	PATA
Matematické vyjádření	$q_s = \min \left\{ \left( \frac{s_s}{s_{s,lim}} \right)^{1/3} * q_{s,ult}; q_{s,ult} \right\}$	$q_b = \min \left\{ \left( \frac{s_b}{s_{b,lim}} \right)^{1/3} * q_{b,ult}; q_{b,ult} \right\}$
Tvar křivky		
Deformační parametry	$s_{s,lim}$ (pevná hodnota)	$s_{b,lim}$ (závisí na průměru paty B)
Počáteční sklon křivky	$\infty$	$\infty$
Vhodný typ základové půdy	Jakýkoliv	
Vhodný typ piloty	Jakýkoliv	

Vstupní parametry:

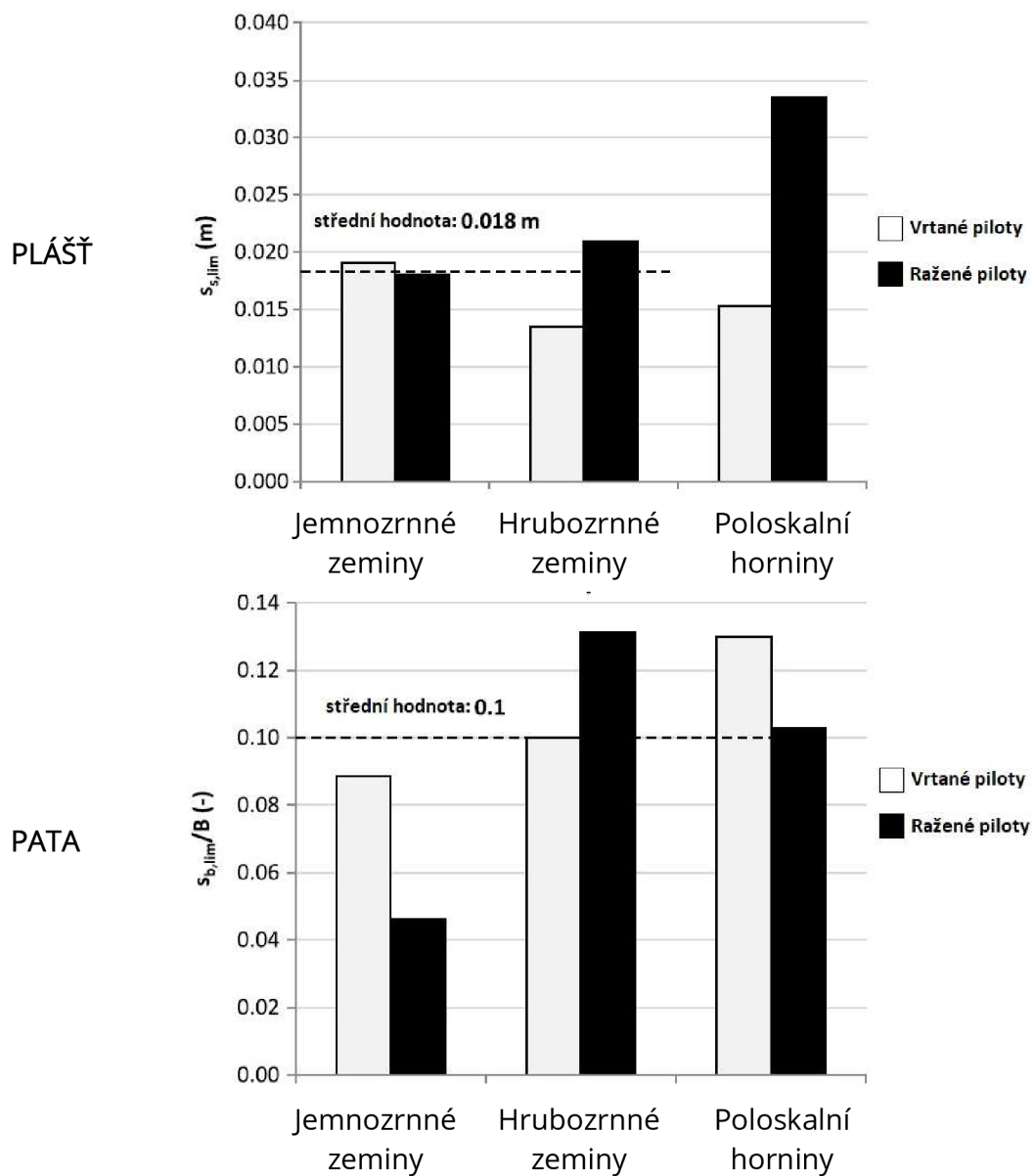
- $s_s$  sedání segmentu piloty
- $s_{s,lim}$  mezní sedání segmentu piloty
- $q_{s,ult}$  mezní plášťové tření
- $s_b$  sedání paty piloty
- $s_{b,lim}$  mezní sedání paty piloty
- $q_{b,ult}$  mezní odpor na patě
- B průměr paty piloty

Tvar kubické funkce a byl odvozen na základě vyhodnocení výsledků padesáti zatěžovacích zkoušek. Počáteční sklon křivek je teoreticky nekonečný, což však není realistická hodnota. Z fyzikálního hlediska lze určit počáteční sklon pro velmi malé počáteční sednutí. Při odvozování této funkce byla použita počáteční hodnota sednutí 0,1 mm. (Bohn (2016))

Pomocí kalibrace výsledků zkoušek byla zjištěna střední hodnota mezního sedání segmentu  $s_{s,lim} = 18 \text{ mm}$  pro jemnozrnné a hrubozrnné zeminy (viz Obr. 3.3). Při této aproximaci se neuvažovalo s výsledky měření pro poloskalní horniny, jelikož ty se nejčastěji nacházejí pouze v patě piloty, nikoli v okolí jejího pláště. (Bohn (2016))

Mezní sedání paty piloty závisí na jejím průměru B, dle měření přibližně platí  $s_{b,lim} = 0,1 * B$  pro všechny typy základové půdy (viz Obr. 3.3). (Bohn (2016))

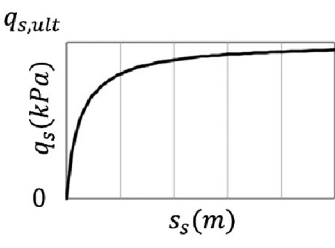
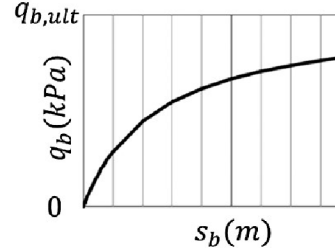




Obr. 3.3 Výsledky zatěžovacích zkoušek pro určení mezních hodnot sedání kubické křivky  $s_{s,lim}$  a  $s_{b,lim}$  (převzato z (Bohn (2016)))

### 3.2.2 Hyperbola

Tab. 3.2 Parametry hyperbolické křivky (převzato z Bohn (2016))

	PLÁŠŤ	PATA
Matematické vyjádření	$q_s = \frac{q_{s,ult} * s_s}{M_s * B + s_s}$	$q_b = \frac{q_{b,ult} * s_b}{M_b * B + s_b}$
Tvar křivky		
Deformační parametry	$M_s$	$M_b$
Počáteční sklon křivky	$\frac{q_{s,ult}}{M_s * B}$	$\frac{q_{b,ult}}{M_b * B}$
Vhodný typ základové půdy	Jakýkoliv	
Vhodný typ piloty	Jakýkoliv	

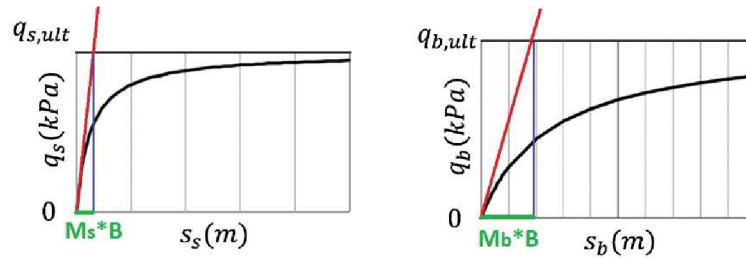
Vstupní parametry:

- $s_s$  sedání segmentu piloty
- $M_s$  deformační parametr pláště piloty
- $q_{s,ult}$  mezní plášťové tření
- $s_b$  sedání paty piloty
- $M_b$  deformační parametr paty piloty
- $q_{b,ult}$  mezní odpor na patě
- $B$  průměr piloty

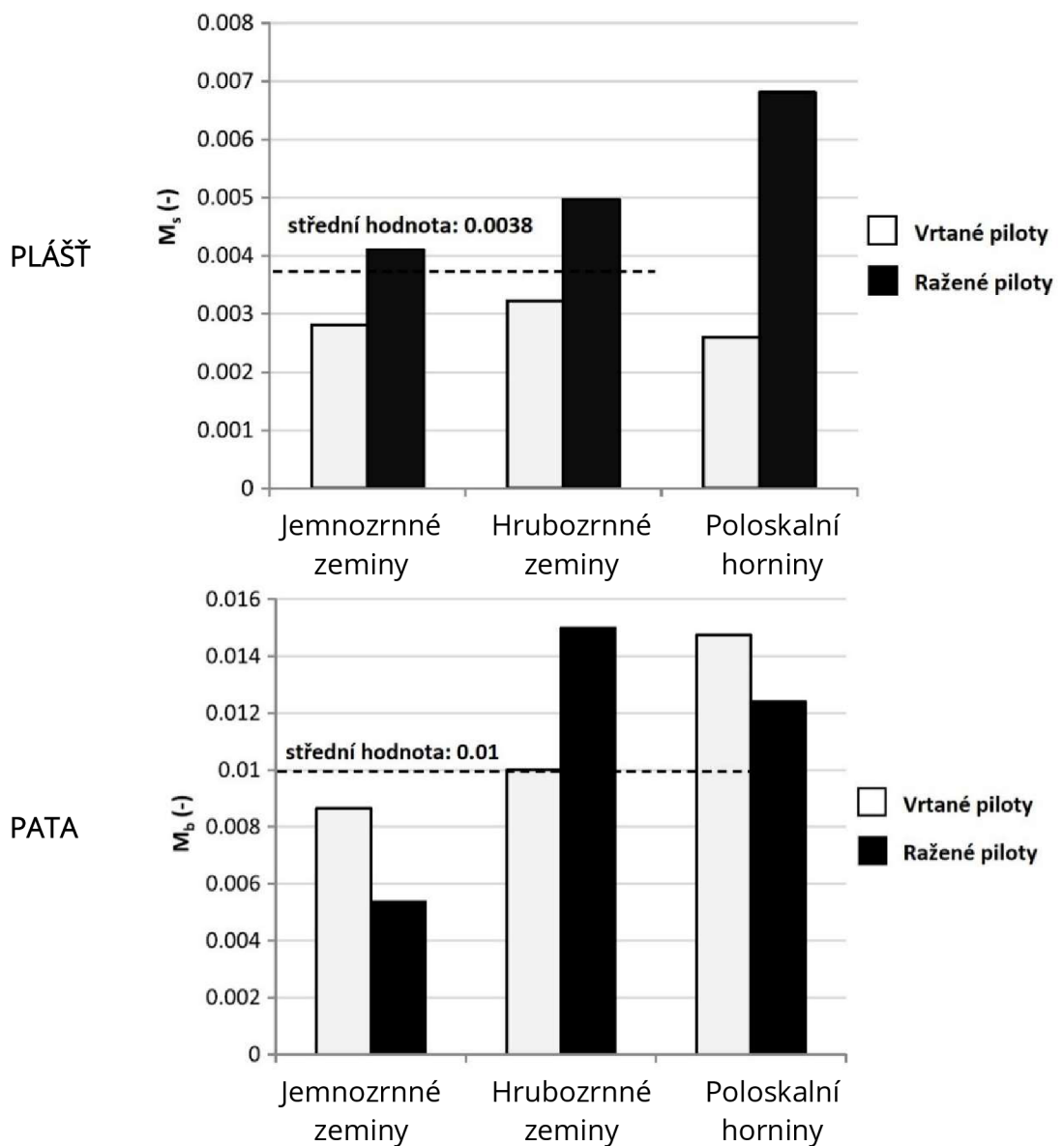
Tvar hyperbolické funkce a byl odvozen na základě vyhodnocení výsledků padesáti zatěžovacích zkoušek. Z těchto výsledků byly kalibrovány deformační parametry  $M_s$  a  $M_b$ , které jsou jeden z parametrů vyjadřujících sklon tečny v počátku hyperboly (Obr. 3.4). (Bohn (2016))

Podobně jako u křivky kubické, parametr  $M_s$  se odvodil pouze z vyhodnocení zkoušek pro zeminy jemnozrnné a hrubozrnné, jelikož skalní horniny se obecně vyskytují především v patě piloty. Střední hodnota pro piloty ražené i vrtané je  $M_s = 0,0038$  (viz Obr. 3.5). Z výsledků měření je patrné, že u pilot vrtaných se plášťové tření  $q_s$  mobilizuje rychleji než u pilot ražených, jelikož pro vrtané piloty byly naměřeny nižší hodnoty deformačního parametru  $M_s$  (viz Obr. 3.5). (Bohn (2016))

Pro odpor na patě piloty byla zvolena střední hodnota deformačního parametru  $M_b = 0,01$  pro všechny typy základové půdy, pro piloty vrtané i ražené (viz Obr. 3.5). (Bohn (2016))



Obr. 3.4 Znáznornění počáteční tečny a jejího sklonu (Bohn (2016))



Obr. 3.5 Výsledky zatěžovacích zkoušek pro určení parametrů  $M_s$  a  $M_b$  (převzato z Bohn (2016))

## 4 ODVOZENÍ TVARU PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

Odvození tvaru přenosových funkcí pro podmínky v České republice bylo v rámci této práce provedeno pro vrtané piloty průměru 900 mm umístěných celou svojí délkou v zeminách soudržných různé konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  nebo v zeminách nesoudržných různé ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$ . Limitní hodnoty napětí byly určeny pro plášť v hloubkách 2 až 20 m, pro patu v hloubkách 6 až 20 m.

### 4.1 Stanovení limitních hodnot plášťových tření a napětí na patě

Výchozí hodnoty limitních plášťových tření a napětí na patě byly stanoveny dle metody Masopust (1994) – viz kapitola 2.1.

#### 4.1.1 Mezní plášťové tření

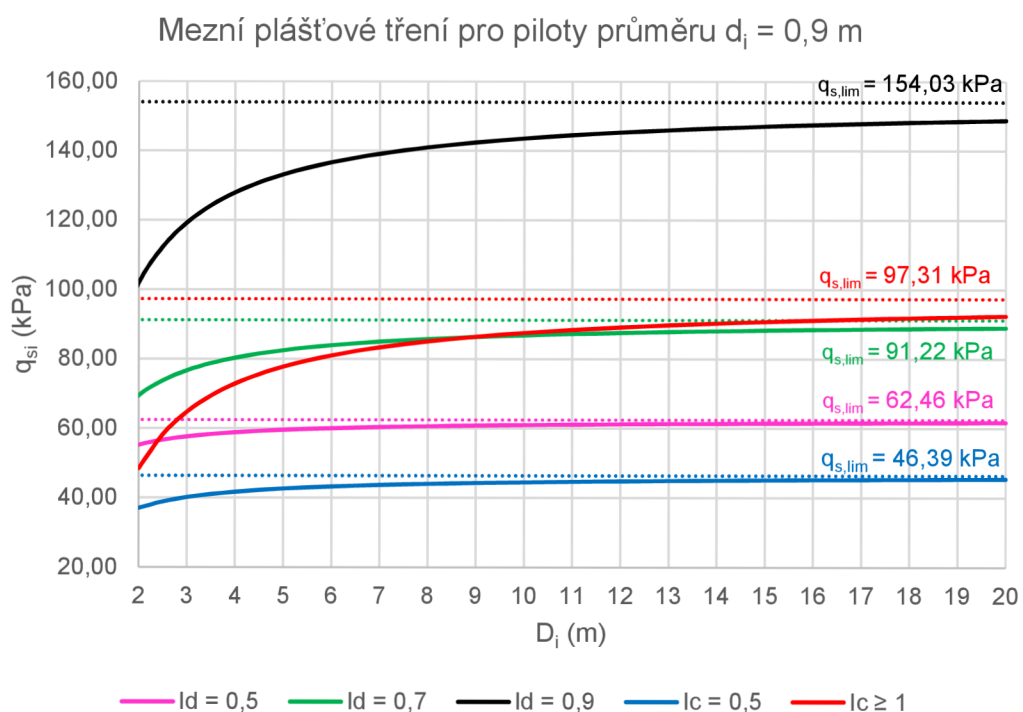
Mezní plášťové tření pro soudržné zeminy bylo vypočteno pro hodnoty indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$ , pro nesoudržné zeminy pro hodnoty indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$  v hloubkách 2 až 20 m. Jednotlivé průběhy plášťového tření jsou znázorněny na Obr. 4.1.

Tab. 4.1 Regresní koeficienty soudržných a nesoudržných zemin (viz Tab. 2.1) pro výpočet mezního plášťového tření dle metody Masopust (1994)

		a	b
Soudržné zeminy	$I_c = 0,5$	46,39	20,81
	$I_c \geq 1$	97,31	108,59
Nesoudržné zeminy	$I_D = 0,5$	62,46	16,06
	$I_D = 0,7$	91,22	48,44
	$I_D = 0,9$	154,03	115,88

Tab. 4.2 Limitní plášťová tření dle rovnice (2.3) pro piloty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zeminách dle metody Masopust (1994)

$d_i = 900$ mm	$q_{s,lim}$ (kPa)				
	SOUDRŽNÉ ZEMINY		NESOUDRŽNÉ ZEMINY		
$D_i$ (m)	$l_c = 0,5$	$l_c \geq 1$	$l_D = 0,5$	$l_D = 0,7$	$l_D = 0,9$
2	37,03	48,44	55,23	69,42	101,88
3	40,15	64,73	57,64	76,69	119,27
4	41,71	72,88	58,85	80,32	127,96
5	42,64	77,76	59,57	82,50	133,17
6	43,27	81,02	60,05	83,95	136,65
7	43,71	83,35	60,40	84,99	139,13
8	44,05	85,09	60,65	85,77	140,99
9	44,31	86,45	60,85	86,38	142,44
10	44,52	87,54	61,01	86,86	143,60
11	44,69	88,43	61,15	87,26	144,55
12	44,83	89,17	61,26	87,59	145,34
13	44,95	89,79	61,35	87,87	146,01
14	45,05	90,33	61,43	88,11	146,30
15	45,14	90,79	61,50	88,31	147,08
16	45,22	91,20	61,56	88,50	147,51
17	45,29	91,56	61,61	88,66	147,90
18	45,35	91,88	61,66	88,80	148,24
19	45,40	92,17	61,70	88,93	148,54
20	45,45	92,42	61,74	89,04	148,82



Obr. 4.1 Průběhy mezních plášťových tření pro piloty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zemínách dle metody Masopust (1994)

#### 4.1.2 Mezní napětí na patě

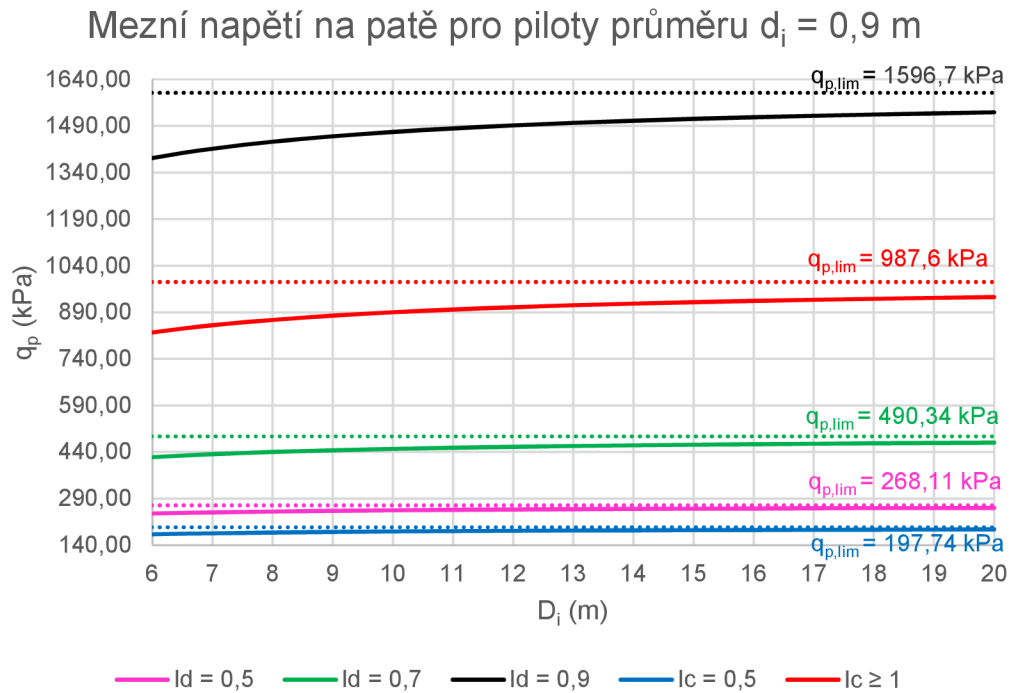
Mezní napětí na patě pro soudržné zeminy bylo vypočteno pro hodnoty indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$ , pro nesoudržné zeminy pro hodnoty indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$  pro piloty délky 6 až 20 m. Jednotlivé průběhy plášťového tření jsou znázorněny na Obr. 4.2.

Tab. 4.3 Regresní koeficienty soudržných a nesoudržných zemín (viz Tab. 2.1) pro výpočet mezního napětí na patě dle metody Masopust (1994)

		e	f
Soudržné zeminy	$I_c = 0,5$	197,74	150,22
	$I_c \geq 1$	987,60	1084,26
Nesoudržné zeminy	$I_D = 0,5$	268,11	174,89
	$I_D = 0,7$	490,34	445,42
	$I_D = 0,9$	1596,7	1399,88

Tab. 4.4 Limitní napětí na patě dle rovnice (2.5) pro piloty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zeminách dle metody Masopust (1994)

$d_i = 900$ mm	$q_{p,lim}$ (kPa)				
	SOUDRŽNÉ ZEMINY		NESOUDRŽNÉ ZEMINY		
$l$ (m)	$l_c = 0,5$	$l_c \geq 1$	$l_D = 0,5$	$l_D = 0,7$	$l_D = 0,9$
6	175,21	824,96	241,88	423,53	1386,72
7	178,43	848,20	245,62	433,07	1416,72
8	180,84	865,62	248,43	440,23	1439,21
9	182,72	879,17	250,62	445,80	1456,71
10	184,22	890,02	252,37	450,25	1470,71
11	185,45	898,89	253,80	453,90	1482,16
12	186,47	906,28	254,99	456,93	1491,71
13	187,34	912,54	256,00	459,50	1499,79
14	188,08	917,90	256,87	461,71	1506,71
15	188,73	922,54	257,62	463,61	1512,71
16	189,29	926,61	258,27	465,29	1517,96
17	189,79	930,20	258,85	466,76	1522,59
18	190,23	933,39	259,37	468,07	1526,71
19	190,62	936,24	259,83	469,24	1530,39
20	190,98	938,81	260,24	470,30	1533,71



Obr. 4.2 Průběhy mezních napětí na patě pro piloty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zeminách dle metody Masopust (1994)

## 4.2 Power law (mocninná funkce)

Mocninné funkce (power laws) se často používají pro vyjádření nelineárního vztahu mezi dvěma veličinami, kdy jedna z nich figuruje jako mocnitel druhé. Touto funkcí lze popsat širokou škálu přírodních i sociologických jevů. Uplatnění nachází ve fyzice, biologii, meteorologii, astronomii, ekonomii, matematice a statistice. (Wikipedia (2019))

Obecná rovnice pro power law (Wikipedia, 2019):

$$f(x) = ax^k \quad (4.1)$$

a	konstanta
x	proměnná hodnota
k	mocnitel

V této práci byla funkce power law využita pro aproximaci závislosti mezi limitním plášťovým třením ( $q_{s,lim}$ )/napětím na patě ( $q_{p,lim}$ ) a hloubkou středu segmentu ( $D_i$ )/hloubkou paty piloty ( $L$ ). Jde tedy o alternativu Tab. 4.2 a Tab. 4.4. Funkce byla dále upravena tak, aby zahrnovala referenční limitní hodnotu napětí ( $q_{s,ref}$ ,  $q_{p,ref}$ ) pro referenční hloubku ( $D_{ref}$ ,  $L_{ref}$ ). Limitní referenční napětí ( $q_{s,ref}$ ,  $q_{p,ref}$ ) pro daný typ zeminy figuruje v pozici konstanty  $a$  v referenční hloubce ( $D_{ref}$ ,  $L_{ref}$ ). Proměnnou  $x$  reprezentuje poměr řešené hloubky ( $D_i$ ,  $L$ ) ku hloubce referenční ( $D_{ref}$ ,  $L_{ref}$ ). Mocnitel funkce  $k$  ( $\alpha$ ,  $\beta$ ) byl stanoven využitím aplikace Řešitel v tabulkovém kalkulátoru Microsoft Excel. Odchýlení, které Řešitel minimalizoval, je určeno rovnicí (4.2).

Výpočet limitního plášťového tření ( $q_{s,lim}$ ) a limitního napětí na patě ( $q_{p,lim}$ ) dle power law vysvětluje fyzikální podstatu těchto hodnot.

Odchýlení minimalizované aplikací Řešitel:

$$E(p) = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( \frac{u_i^m(p) - u_i}{u_i} \right)^2} * 100\% \quad (4.2)$$

n	počet měření
$u_i$	původní hodnoty (Masopust (1994))
$u_i^m$	korespondující hodnoty (power law)



## 4.2.1 Limitní plášťová tření

Limitní tření na plášti dle power law:

$$q_{s,\text{lim}} = q_{s,\text{ref}} \cdot \left( \frac{D_i}{D_{\text{ref}}} \right)^\alpha \quad (4.3)$$

- $D_{\text{ref}}$  referenční hloubka středu segmentu piloty,  $D_{\text{ref}} = 5 \text{ m}$   
 $q_{s,\text{ref}}$  referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce  $D_{\text{ref}}$   
 $D_i$  hloubka středu segmentu piloty  
 $\alpha$  exponent pro daný typ a stav zeminy

### 4.2.1.1 Soudržné zeminy

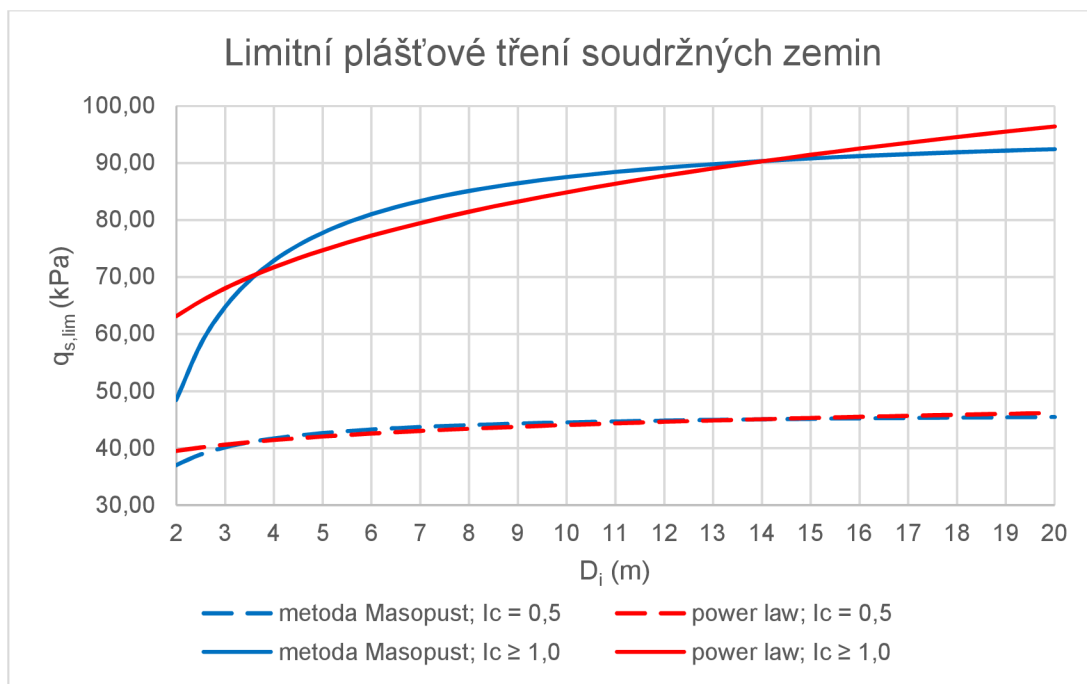
Limitní plášťové tření bylo vypočteno pro soudržné zeminy indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  v hloubkách 2 až 20 m a porovnáno s hodnotami dle metody Masopust (1994) v Tab. 4.2. Grafické srovnání znázorňuje Obr. 4.3.

Tab. 4.5 Referenční hodnoty pro výpočet limitního plášťového tření dle power law v soudržných zeminách

	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$
$q_{s,\text{ref}}$ (kPa)	42,04	74,71
$D_{\text{ref}}$ (m)	5,00	5,00
$\alpha$	0,068	0,184

Tab. 4.6 Limitní plášťová tření v soudržných zeminách dle power law (rovnice (4.3)) a srovnání s metodou Masopust (1994)

d <sub>i</sub> = 900 mm	q <sub>s,lim</sub> (kPa)			
	I <sub>c</sub> = 0,5		I <sub>c</sub> ≥ 1	
D <sub>i</sub> (m)	Masopust	Power law	Masopust	Power law
2	37,03	39,51	48,44	63,13
3	40,15	40,61	64,73	68,02
4	41,71	41,41	72,88	71,71
5	42,64	42,04	77,76	74,71
6	43,27	42,57	81,02	77,26
7	43,71	43,01	83,35	79,48
8	44,05	43,40	85,09	81,45
9	44,31	43,75	86,45	83,24
10	44,52	44,06	87,54	84,86
11	44,69	44,35	88,43	86,36
12	44,83	44,61	89,17	87,76
13	44,95	44,85	89,79	89,06
14	45,05	45,08	90,33	90,28
15	45,14	45,29	90,79	91,43
16	45,22	45,49	91,20	92,52
17	45,29	45,68	91,56	93,56
18	45,35	45,85	91,88	94,55
19	45,40	46,02	92,17	95,49
20	45,45	46,18	92,42	96,39
	E(p) = 1,60 %		E(p) = 6,20 %	



Obr. 4.3 Porovnání hodnot limitního plášťového tření dle power law s metodou Masopust (1994) pro soudržné zemin

#### 4.2.1.2 Nesoudržné zemin

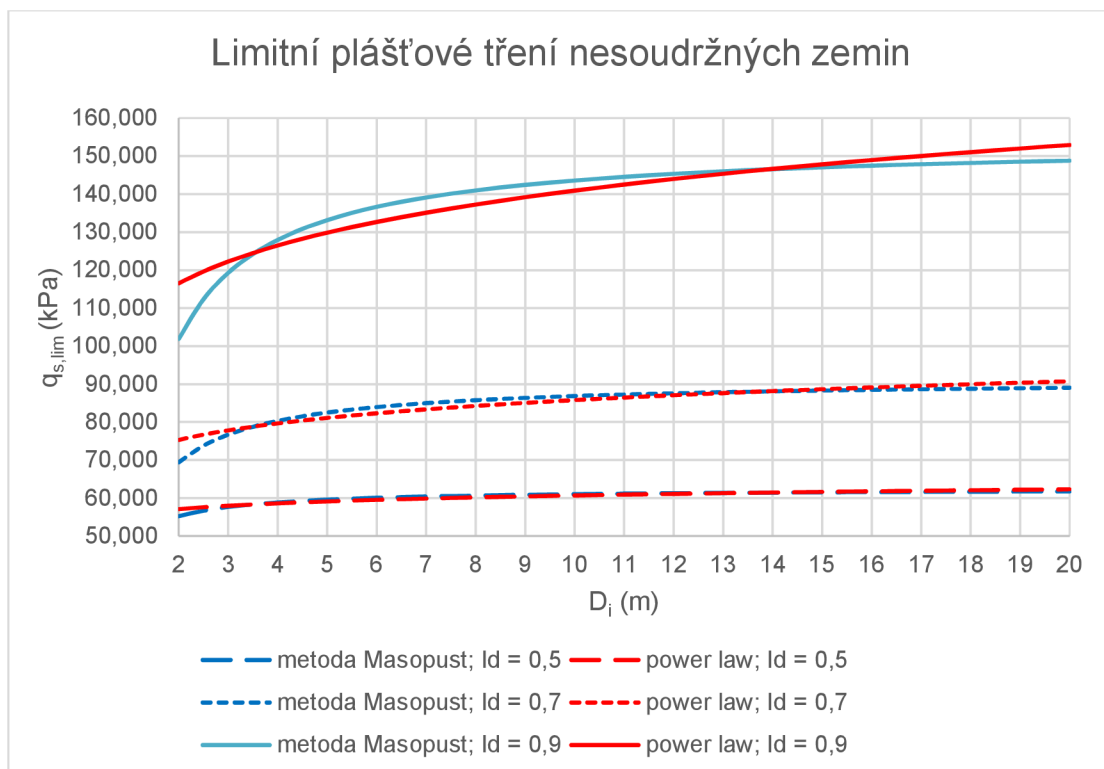
Limitní plášťové tření bylo vypočteno pro nesoudržné zemin indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$  v hloubkách 2 až 20 m a porovnáno s hodnotami dle metody Masopust (1994) v Tab. 4.2. Grafické srovnání znázorňuje Obr. 4.4.

Tab. 4.7 Referenční hodnoty pro výpočet limitního plášťového tření dle power Law v nesoudržných zeminách

	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
$q_{s,ref}$ (kPa)	59,11	81,11	129,85
$D_{ref}$ (m)	5,00	5,00	5,00
$\alpha$	0,038	0,081	0,118

Tab. 4.8 Limitní plášťová tření v nesoudržných zeminách dle power law (rovnice (4.3)) a srovnání s metodou Masopust (1994)

d <sub>i</sub> = 900 mm	q <sub>s,lim</sub> (kPa)					
	I <sub>D</sub> = 0,5		I <sub>D</sub> = 0,7		I <sub>D</sub> = 0,9	
D <sub>i</sub> (m)	Masopus t	Power law	Masopus t	Power law	Masopus t	Power law
2	55,23	57,09	69,42	75,30	101,88	116,53
3	57,64	57,97	76,69	77,82	119,27	122,25
4	58,85	58,61	80,32	79,65	127,96	126,47
5	59,57	59,11	82,50	81,10	133,17	129,85
6	60,05	59,51	83,95	82,31	136,65	132,68
7	60,40	59,86	84,99	83,35	139,13	135,12
8	60,65	60,17	85,77	84,25	140,99	137,26
9	60,85	60,44	86,38	85,06	142,44	139,19
10	61,01	60,68	86,86	85,79	143,60	140,93
11	61,15	60,90	87,26	86,45	144,55	142,53
12	61,26	61,10	87,59	87,06	145,34	144,00
13	61,35	61,28	87,87	87,63	146,01	145,37
14	61,43	61,45	88,11	88,16	146,30	146,64
15	61,50	61,62	88,31	88,65	147,08	147,84
16	61,56	61,77	88,50	89,12	147,51	148,97
17	61,61	61,91	88,66	89,56	147,90	150,05
18	61,66	62,04	88,80	89,97	148,24	151,06
19	61,70	62,17	88,93	90,37	148,54	152,03
20	61,74	62,29	89,04	90,74	148,82	152,95
	E(p) = 0,84 %		E(p) = 1,98 %		E(p) = 3,20 %	



Obr. 4.4 Porovnání hodnot limitního plášťového tření dle power Law s metodou Masopust (1994) pro nesoudržné zeminy

#### 4.2.2 Limitní napětí na patě

Limitní napětí na patě dle power law:

$$q_{p,lim} = q_{p,ref} * \left( \frac{L}{L_{ref}} \right)^\beta \quad (4.4)$$

$L_{ref}$  referenční hloubka paty piloty,  $L_{ref} = 10$  m

$q_{p,ref}$  referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce  $L_{ref}$

$L$  hloubka paty piloty

$\beta$  exponent pro daný typ a stav zeminy v patě piloty

#### 4.2.2.1 Soudržné zeminy

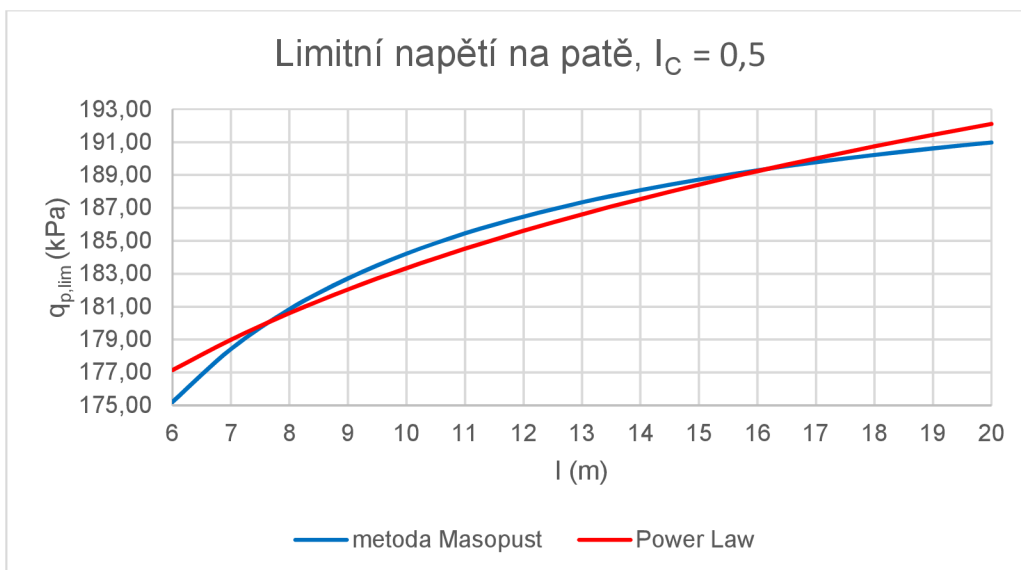
Limitní napětí na patě bylo vypočteno pro soudržné zeminy indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  v hloubkách 6 až 20 m a porovnáno s hodnotami dle metody Masopust (1994) v Tab. 4.4. Grafické srovnání znázorňuje Obr. 4.5 a Obr. 4.6.

Tab. 4.9 Referenční hodnoty pro výpočet limitního napětí na patě dle power law v soudržných zeminách

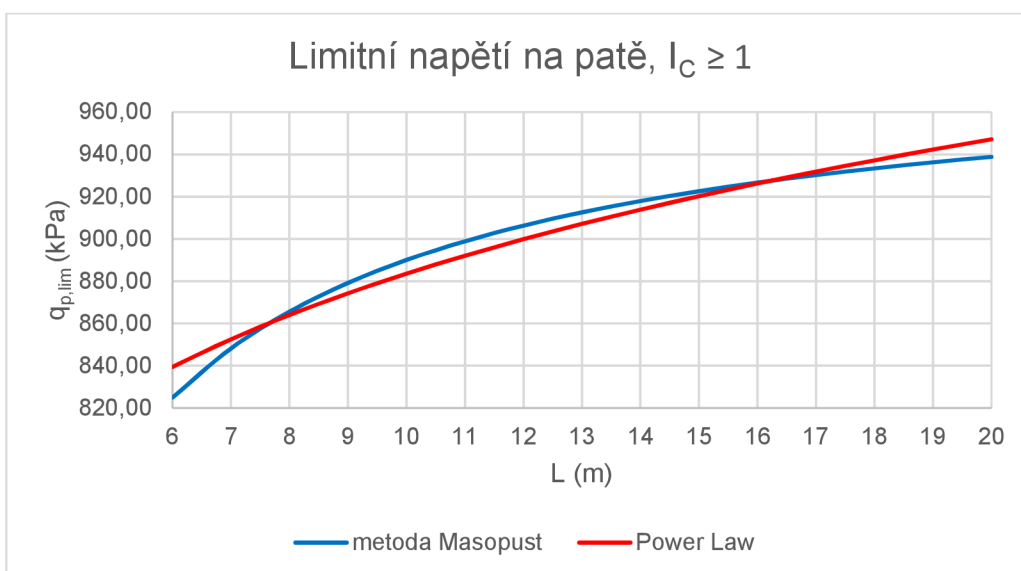
	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$
$q_{p,ref}$ (kPa)	183,34	883,55
$L_{ref}$ (m)	10,00	10,00
$\beta$	0,067	0,100

Tab. 4.10 Limitní napětí na patě v soudržných zeminách dle power law (rovnice (4.4)) a srovnání s metodou Masopust (1994)

$d_i = 900$ mm	$q_{p,lim}$ (kPa)			
	$I_c = 0,5$		$I_c \geq 1$	
	Masopust	Power law	Masopust	Power law
L (m)				
6	175,21	177,14	824,96	839,45
7	178,43	178,99	848,20	852,52
8	180,84	180,61	865,62	864,01
9	182,72	182,05	879,17	874,27
10	184,22	183,34	890,02	883,55
11	185,45	184,52	898,89	892,03
12	186,47	185,61	906,28	899,85
13	187,34	186,61	912,54	907,10
14	188,08	187,55	917,90	913,86
15	188,73	188,42	922,54	920,20
16	189,29	189,24	926,61	926,18
17	189,79	190,02	930,20	931,82
18	190,23	190,75	933,39	937,18
19	190,62	191,44	936,24	942,27
20	190,98	192,11	938,81	947,13
	E(p) = 0,45 %		E(p) = 0,70 %	



Obr. 4.5 Porovnání hodnot limitního napětí na patě dle Power law s metodou Masopust (1994) pro soudržnou zeminu konzistence  $I_C = 0,5$



Obr. 4.6 Porovnání hodnot limitního napětí na patě dle Power law s metodou Masopust (1994) pro soudržnou zeminu konzistence  $I_C \geq 1$

#### 4.2.2.2 Nesoudržné zeminy

Limitní napětí na patě bylo vypočteno pro nesoudržné zeminy indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$  v hloubkách 6 až 20 m a porovnáno s hodnotami dle metody Masopust (1994) v Tab. 4.4. Grafické srovnání znázorňuje Obr. 4.7, Obr. 4.8 a Obr. 4.9.

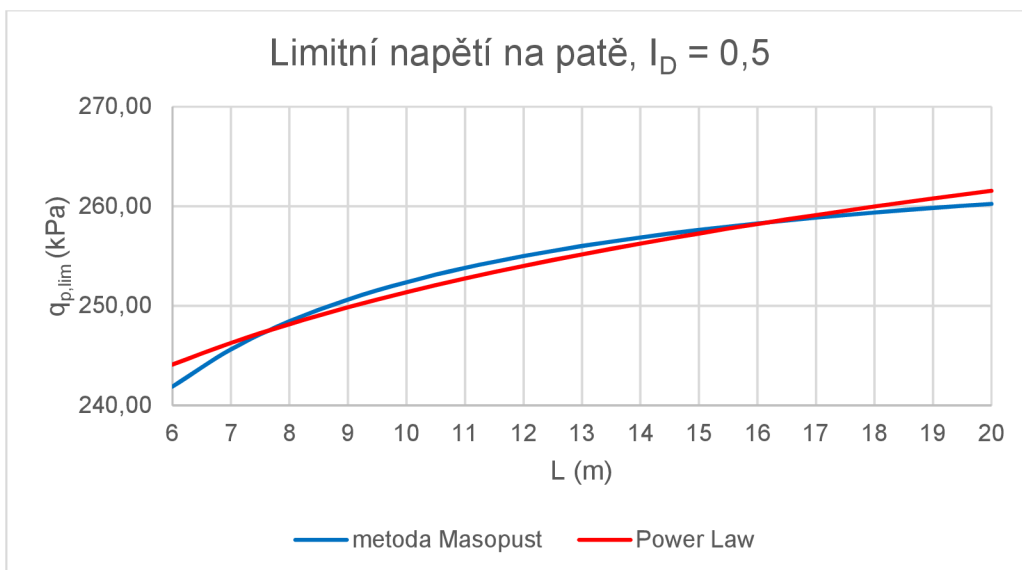
Tab. 4.11 Referenční hodnoty pro výpočet limitního napětí na patě dle power law v nesoudržných zeminách

	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
$q_{p,ref}$ (kPa)	251,36	447,63	1462,48
$L_{ref}$ (m)	10,00	10,00	10,00
$\beta$	0,057	0,082	0,079

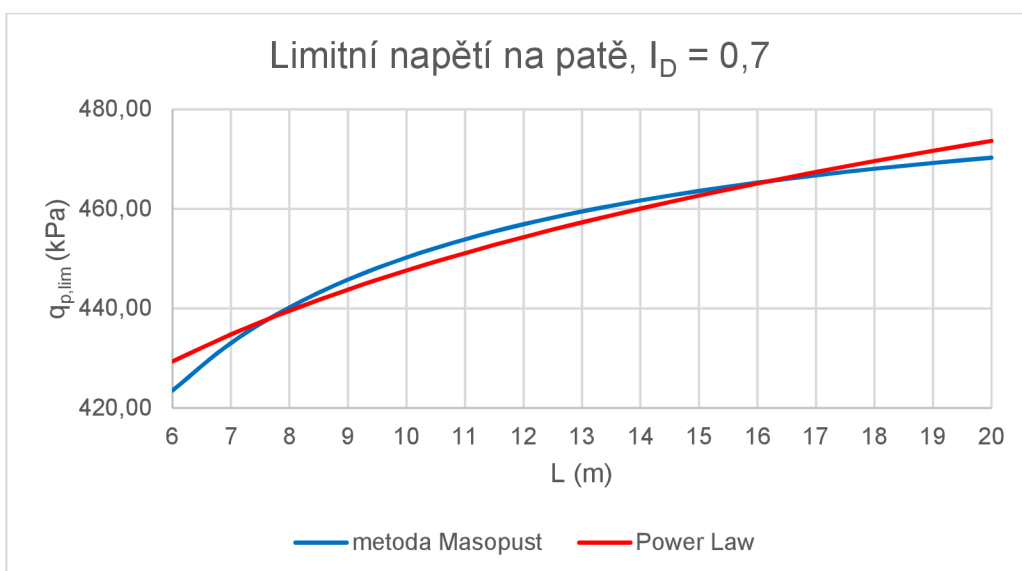
Tab. 4.12 Limitní napětí na patě v nesoudržných zeminách dle power law (rovnice (4.4)) a srovnání s metodou Masopust (1994)

$d_i = 900$ mm	$q_{s,lim}$ (kPa)					
	$I_D = 0,5$		$I_D = 0,7$		$I_D = 0,9$	
L (m)	Masopus t	Power law	Masopus t	Power law	Masopus t	Power law
6	241,88	244,10	423,53	429,36	1386,72	1404,98
7	245,62	246,27	433,07	434,79	1416,72	1422,09
8	248,43	248,16	440,23	439,55	1439,21	1437,08
9	250,62	249,84	445,80	443,80	1456,71	1450,43
10	252,37	251,36	450,25	447,63	1470,71	1462,48
11	253,80	252,73	453,90	451,12	1482,16	1473,47
12	254,99	254,00	456,93	454,34	1491,71	1483,57
13	256,00	255,16	459,50	457,31	1499,79	1492,92
14	256,87	256,25	461,71	460,09	1506,71	1501,63
15	257,62	257,27	463,61	462,68	1512,71	1509,79
16	258,27	258,22	465,29	465,13	1517,96	1517,46
17	258,85	259,12	466,76	467,43	1522,59	1524,70
18	259,37	259,97	468,07	469,62	1526,71	1531,56
19	259,83	260,77	469,24	471,69	1530,39	1538,08
20	260,24	261,54	470,30	473,67	1533,71	1544,29
	E(p) = 0,38 %		E(p) = 0,56 %		E(p) = 0,53 %	

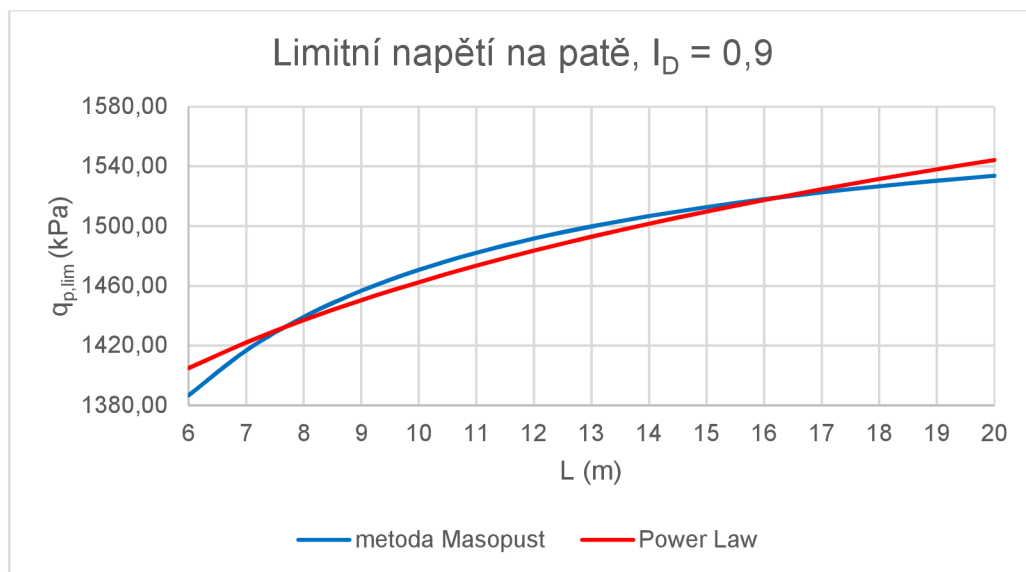




Obr. 4.7 Porovnání hodnot limitního napětí na patě dle power law s metodou Masopust (1994) pro nesoudržnou zeminu ulehlosti  $I_D = 0,5$



Obr. 4.8 Porovnání hodnot limitního napětí na patě dle power law s metodou Masopust (1994) pro nesoudržnou zeminu ulehlosti  $I_D = 0,7$



Obr. 4.9 Porovnání hodnot limitního napětí na patě dle power law s metodou Masopust (1994) pro nesoudržnou zeminu ulehlosti  $I_D = 0,9$

### 4.3 Přenosové funkce

V rámci této práce byly odvozeny přenosové funkce tvaru hyperboly a kubické paraboly pro segmenty pláště piloty se středem v hloubce  $D_i = (5; 10; 15)$  m a pro patu v hloubce  $L = (10; 15; 20)$  m v zeminách soudržných indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  a nesoudržných indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$ . Průměr piloty činí  $d_i = 900$  mm, limitní napětí  $q_{s,lim}$  a  $q_{p,lim}$  byla vypočtena dle power law - rovnice (4.3) a (4.4). Limitní hodnoty sedání  $s_{s,lim} = 18$  mm a  $s_{p,lim} = (0,1 \cdot d_i)$  pro kubickou parabolu byly převzaty z doporučení dle Bohn (2016), viz kapitola 3.2.1 Kubická parabola. Deformační parametry  $M_s = 0,0038$  a  $M_p = 0,1$  pro sestavení hyperboly byly taktéž převzaty z doporučení dle Bohn (2016), viz kapitola 3.2.2 Hyperbola.

#### 4.3.1 Hyperbola

##### 4.3.1.1 Plášťové tření

Hyperbolické přenosové funkce byly vytvořeny pro segmenty pláště piloty průměru  $d_i = 900$  mm se středem v hloubce  $D_i = (5; 10; 15)$  m v zeminách soudržných o indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  a nesoudržných o indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$ . Grafické znázornění jednotlivých křivek viz Obr. 4.10 a Obr. 4.11, vypočtené hodnoty napětí  $q_s$  v závislosti na sedání  $s_s$  pro sestavení těchto křivek viz příloha P2.1.1.

Výpočet plášťového tření dle Bohn (2016) (viz 3.2.2 Hyperbola):

$$q_s = \frac{q_{s,lim} * s_s}{M_s * d_i + s_s} = q_{s,ref} * \left( \frac{D_i}{D_{ref}} \right)^\alpha * \frac{s_s}{M_s * d_i + s_s} \quad (4.5)$$

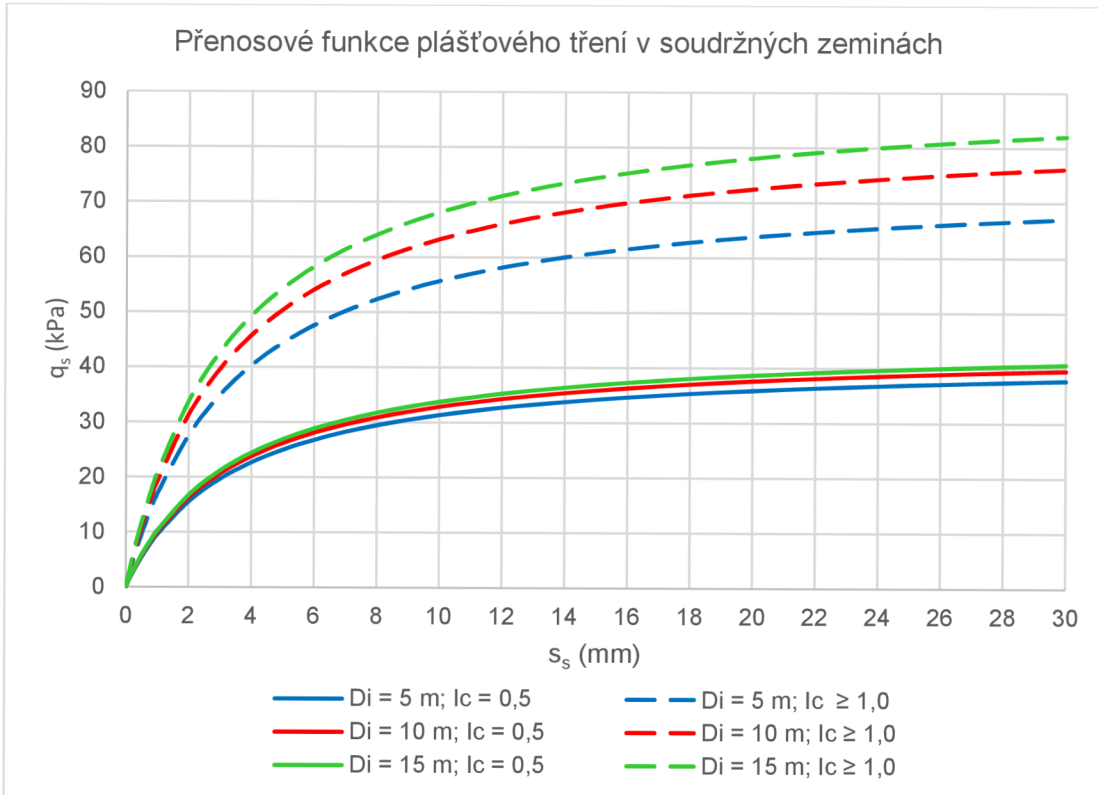
- $q_{s,lim}$  limitní plášťové tření dle power law (viz rovnice (4.3))
- $s_s$  sedání segmentu
- $M_s$  deformační parametr pláště piloty (viz 3.2.2 Hyperbola)
- $d_i$  průměr segmentu piloty
- $D_{ref}$  referenční hloubka středu segmentu piloty,  $D_{ref} = 5$  m
- $q_{s,ref}$  referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce  $D_{ref}$
- $D_i$  hloubka středu segmentu piloty
- $\alpha$  exponent pro daný typ a stav zeminy

Tab. 4.13 Vstupní parametry pro hyperbolickou přenosovou křivku pro plášťové tření pro segmenty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zemínách

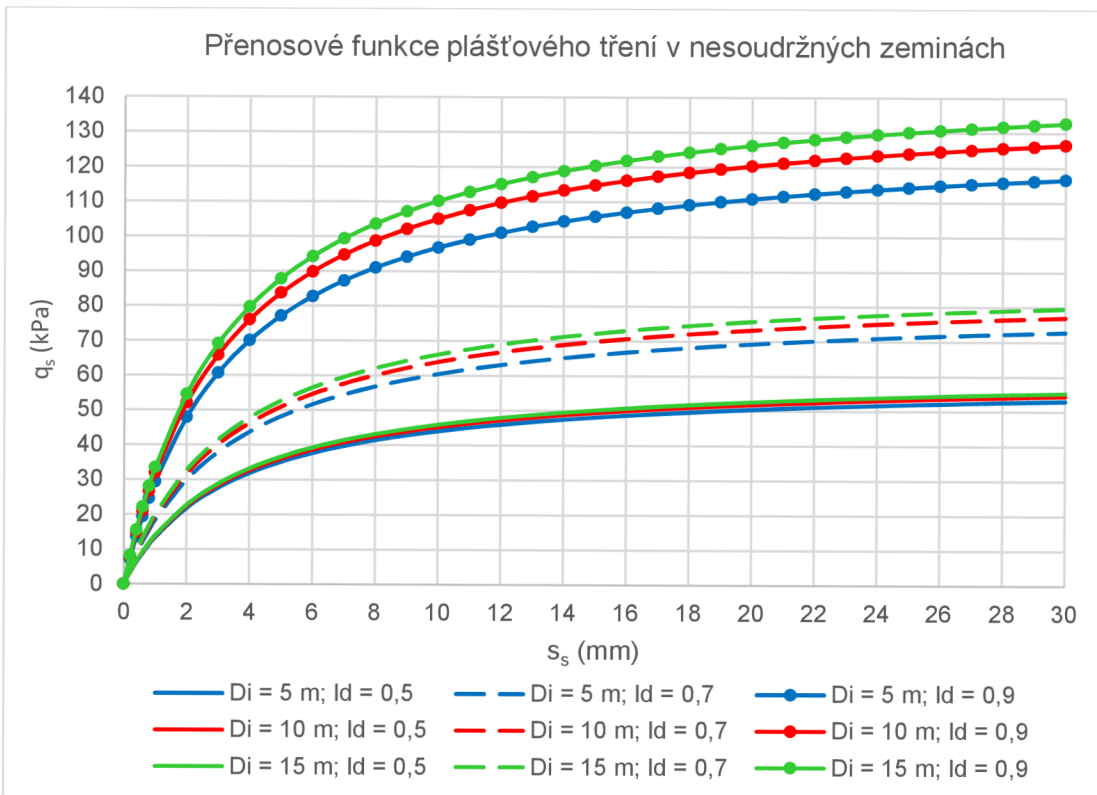
$d_i = 900$ mm	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
	$l_c = 0,5$	$l_c \geq 1$	$l_D = 0,5$	$l_D = 0,7$	$l_D = 0,9$
$D_{ref}$ (m)	5,00		5,00		
$q_{s,ref}$ (kPa)	42,04	74,71	59,11	81,11	129,85
$\alpha$	0,068	0,184	0,038	0,081	0,118
$M_s$	0,0038		0,0038		

Tab. 4.14 Limitní plášťová tření dle power law pro zeminy soudržné a nesoudržné v hloubkách  $D_i = (5; 10; 15)$  m

$d_i = 900$ mm	$q_{s,lim}$ (kPa)				
	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
$D_i$ (m)	$l_c = 0,5$	$l_c \geq 1$	$l_D = 0,5$	$l_D = 0,7$	$l_D = 0,9$
5	42,04	74,71	59,11	81,10	129,85
10	44,06	84,86	60,68	85,79	140,93
15	45,29	91,43	61,62	88,65	147,84



Obr. 4.10 Hyperbolické přenosové funkce plášťového tření v soudržných zeminách pro středy segmentů hloubkách  $D_i = (5; 10; 15)$  m,  $d_i = 900$  mm



Obr. 4.11 Hyperbolické přenosové funkce plášťového tření v nesoudržných zeminách pro středy segmentů v hloubkách  $D_i = (5; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm

#### 4.3.1.2 Napětí na patě

Hyperbolické přenosové funkce byly vytvořeny pro patu piloty průměru  $d_i = 900$  mm v hloubce  $L = (10; 15; 20)$  m v zeminách soudržných o indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  a nesoudržných o indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$ . Grafické znázornění jednotlivých křivek viz Obr. 4.12 a Obr. 4.13, vypočtené hodnoty napětí  $q_p$  v závislosti na sedání  $s_p$  pro sestavení těchto křivek viz příloha P2.1.2.

Výpočet napětí na patě dle Bohn (2016) (viz 3.2.2 Hyperbola):

$$q_p = \frac{q_{p,\text{lim}} * s_p}{M_p * d_i + s_p} = q_{p,\text{ref}} * \left(\frac{L}{L_{\text{ref}}}\right)^\beta * \frac{s_p}{M_p * d_i + s_p} \quad (4.6)$$

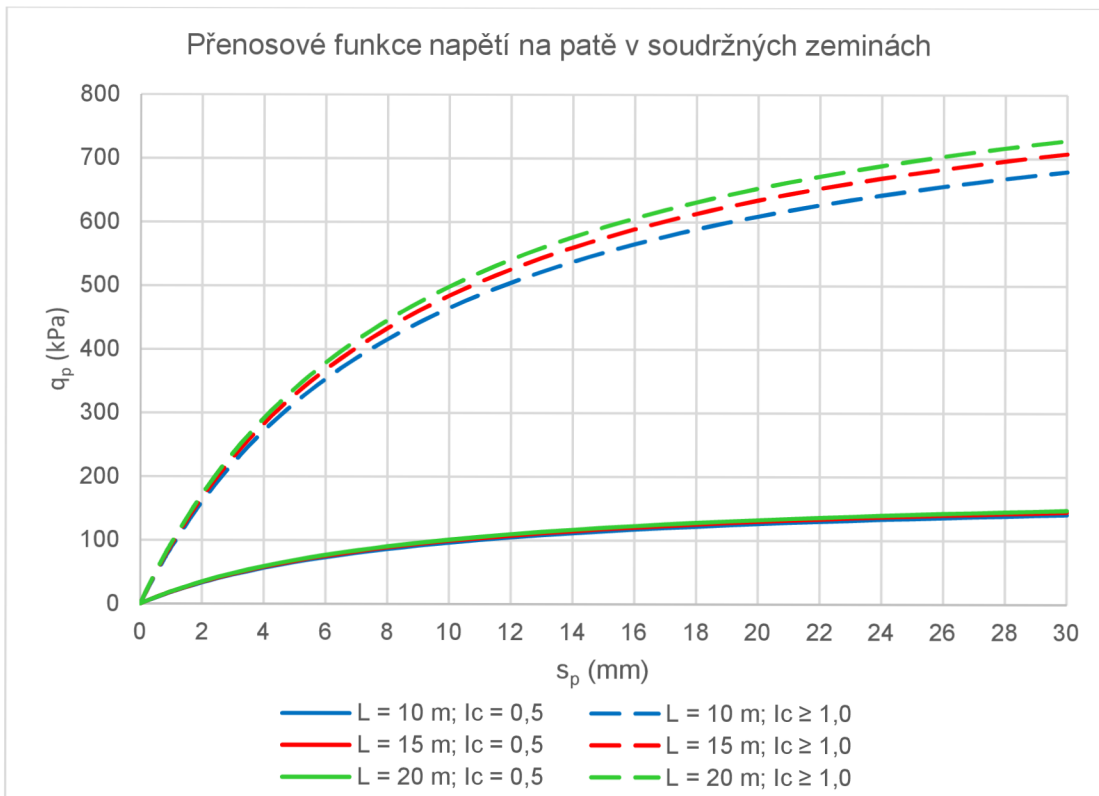
- $q_{p,\text{lim}}$  limitní napětí na patě dle power law (viz rovnice (4.4))
- $s_p$  sedání paty
- $M_p$  deformační parametr paty piloty (viz 3.2.2 Hyperbola)
- $d_i$  průměr paty piloty
- $L_{\text{ref}}$  referenční hloubka paty piloty,  $L_{\text{ref}} = 10$  m
- $q_{p,\text{ref}}$  referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce  $L_{\text{ref}}$
- $L$  hloubka paty piloty
- $\beta$  exponent pro daný typ a stav zeminy v patě piloty

Tab. 4.15 Vstupní parametry pro hyperbolickou přenosovou křivku pro odpor na patě piloty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zeminách

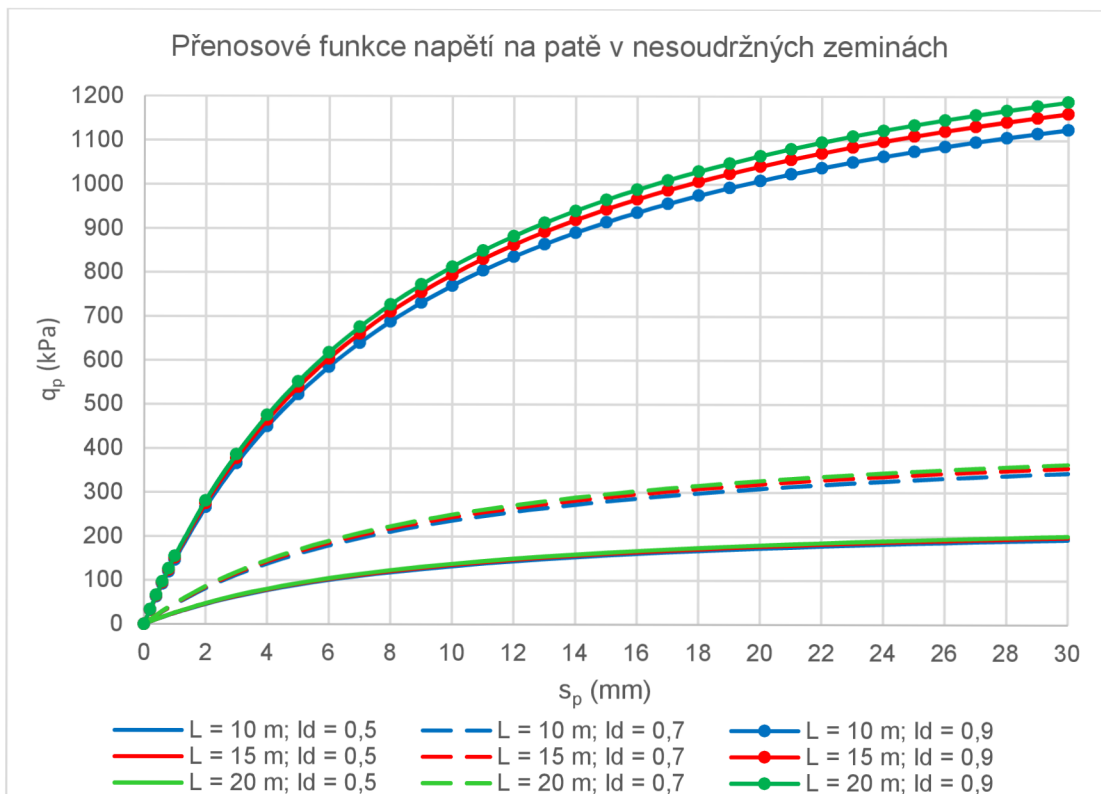
$d_i = 900$ mm	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
$L_{\text{ref}}$ (m)	10,00		10,00		
$q_{p,\text{ref}}$ (kPa)	183,34	883,55	251,36	447,63	1462,48
$\beta$	0,067	0,100	0,057	0,082	0,079
$M_p$	0,01		0,01		

Tab. 4.16 Limitní napětí na patě dle power law pro zeminy soudržné a nesoudržné v hloubkách  $L = (10; 15; 20)$  m

$d_i = 900$ mm	$q_{p,\text{lim}}$ (kPa)				
	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
$L$ (m)	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
10	183,34	883,55	251,36	447,63	1462,48
15	188,42	920,20	257,27	462,68	1509,79
20	192,11	947,13	261,54	473,67	1544,29



Obr. 4.12 Hyperbolické přenosové funkce napětí na patě v soudržných zeminách pro hloubku paty  $L = (10; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm



Obr. 4.13 Hyperbolické přenosové funkce napětí na patě v nesoudržných zeminách pro hloubku paty  $L = (10; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm

## 4.3.2 Kubická parabola

### 4.3.2.1 Plášťové tření

Kubické přenosové funkce byly vytvořeny pro segmenty pláště piloty průměru  $d_i = 900$  mm se středem v hloubce  $D_i = (5; 10; 15)$  m v zeminách soudrzných o indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  a nesoudrzných o indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$ . Grafické znázornění jednotlivých křivek viz Obr. 4.14 a Obr. 4.15, vypočtené hodnoty napětí  $q_s$  v závislosti na sedání  $s_s$  pro sestavení těchto křivek viz příloha P2.2.1.

Výpočet plášťového tření dle Bohn (2016) (viz 3.2.1 Kubická parabola):

$$q_s = q_{s,lim} * \left(\frac{s_s}{s_{s,lim}}\right)^{1/3} = q_{s,ref} * \left(\frac{D_i}{D_{ref}}\right)^\alpha * \left(\frac{s_s}{s_{s,lim}}\right)^{1/3} \quad (4.7)$$

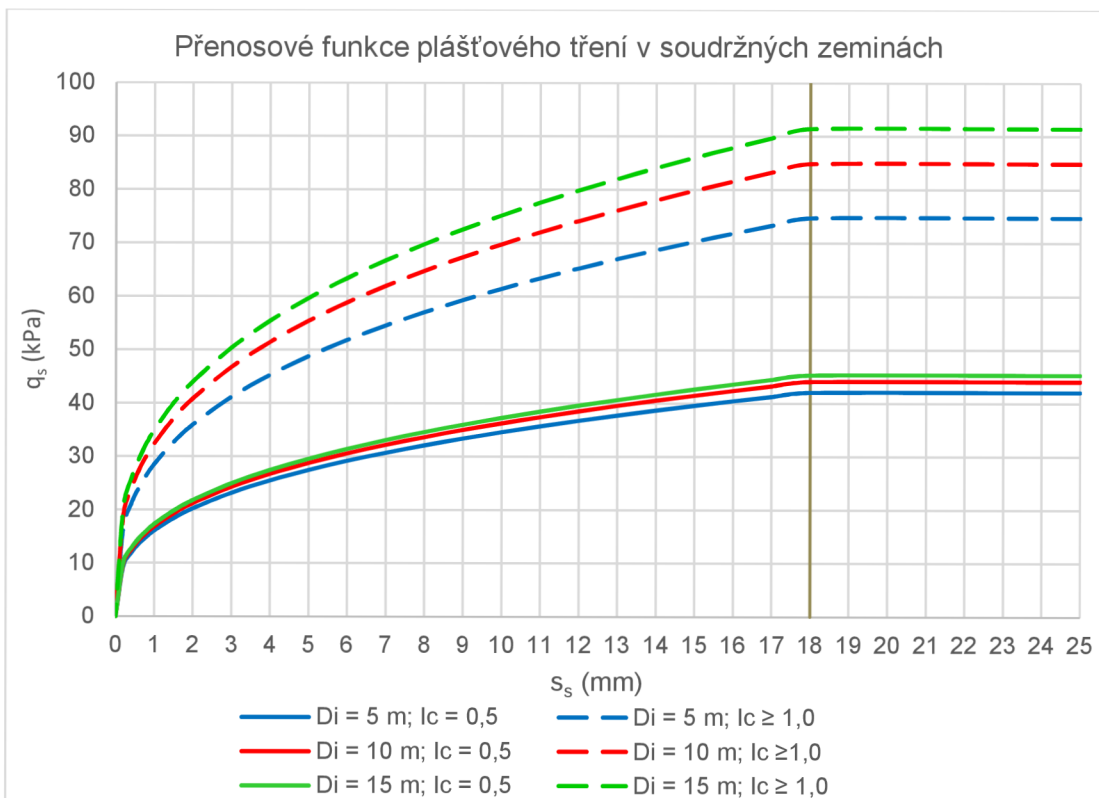
- $q_{s,lim}$  limitní plášťové tření dle power law (viz rovnice (4.3))
- $s_s$  sedání segmentu
- $s_{s,lim}$  limitní sedání segmentu (viz 3.2.1 Kubická parabola):
- $D_{ref}$  referenční hloubka středu segmentu piloty,  $D_{ref} = 5$  m
- $q_{s,ref}$  referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce  $D_{ref}$
- $D_i$  hloubka středu segmentu piloty
- $\alpha$  exponent pro daný typ a stav zeminy

Tab. 4.17 Vstupní parametry pro kubickou přenosovou křivku pro plášťové tření pro segmenty průměru  $d_i = 900$  mm v soudrzných a nesoudrzných zeminách

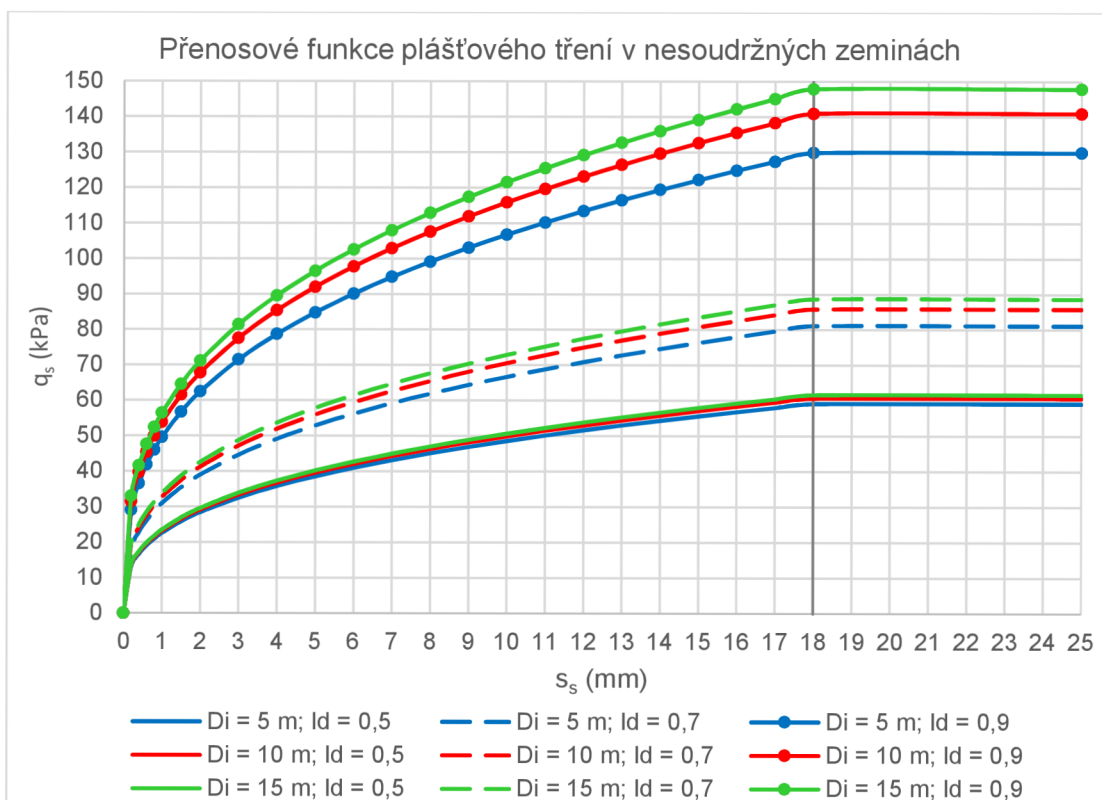
$d_i = 900$ mm	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
$D_{ref}$ (m)	5,00		5,00		
$q_{s,ref}$ (kPa)	42,04	74,71	59,11	81,11	129,85
$\alpha$	0,068	0,184	0,038	0,081	0,118
$s_{s,lim}$ (mm)	18,00		18,00		

Tab. 4.18 Limitní plášťová tření dle power law pro zeminy soudrzné a nesoudrzné v hloubkách  $D_i = (5; 10; 15)$  m

$d_i = 900$ mm	$q_{s,lim}$ (kPa)				
	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
$D_i$ (m)	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
5	42,04	74,71	59,11	81,10	129,85
10	44,06	84,86	60,68	85,79	140,93
15	45,29	91,43	61,62	88,65	147,84



Obr. 4.14 Kubické přenosové funkce plášťového tření v soudržných zeminách pro středy segmentů v hloubkách  $D_i = (5; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm



Obr. 4.15 Kubické přenosové funkce plášťového tření v nesoudržných zeminách pro středy segmentů v hloubkách  $D_i = (5; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm



#### 4.3.2.2 Napětí na patě

Kubické přenosové funkce byly vytvořeny pro patu piloty průměru  $d_i = 900$  mm v hloubce  $L = (10; 15; 20)$  m v zeminách soudržných o indexu konzistence  $I_c = (0,5; \geq 1)$  a nesoudržných o indexu ulehlosti  $I_D = (0,5; 0,7; 0,9)$ . Grafické znázornění jednotlivých křivek viz Obr. 4.16 a Obr. 4.17, vypočtené hodnoty napětí  $q_p$  v závislosti na sedání  $s_p$  pro sestavení těchto křivek viz příloha P2.2.2.

Výpočet napětí na patě dle Bohn (2016) (viz 3.2.1 Kubická):

$$q_p = q_{p,lim} * \left( \frac{s_p}{s_{p,lim}} \right)^{1/3} = q_{p,ref} * \left( \frac{L}{L_{ref}} \right)^\beta * \frac{s_p}{M_p * d_i + s_p} \quad (4.8)$$

$$s_{p,lim} = 0,1 * d_i \quad (4.9)$$

$q_{p,lim}$  limitní napětí na patě dle power law (viz rovnice (4.4))

$s_p$  sedání paty piloty

$s_{p,lim}$  limitní sedání paty piloty (viz 3.2.1 Kubická parabola)

$L_{ref}$  referenční hloubka paty piloty,  $L_{ref} = 10$  m

$q_{p,ref}$  referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce  $L_{ref}$

$L$  hloubka paty piloty

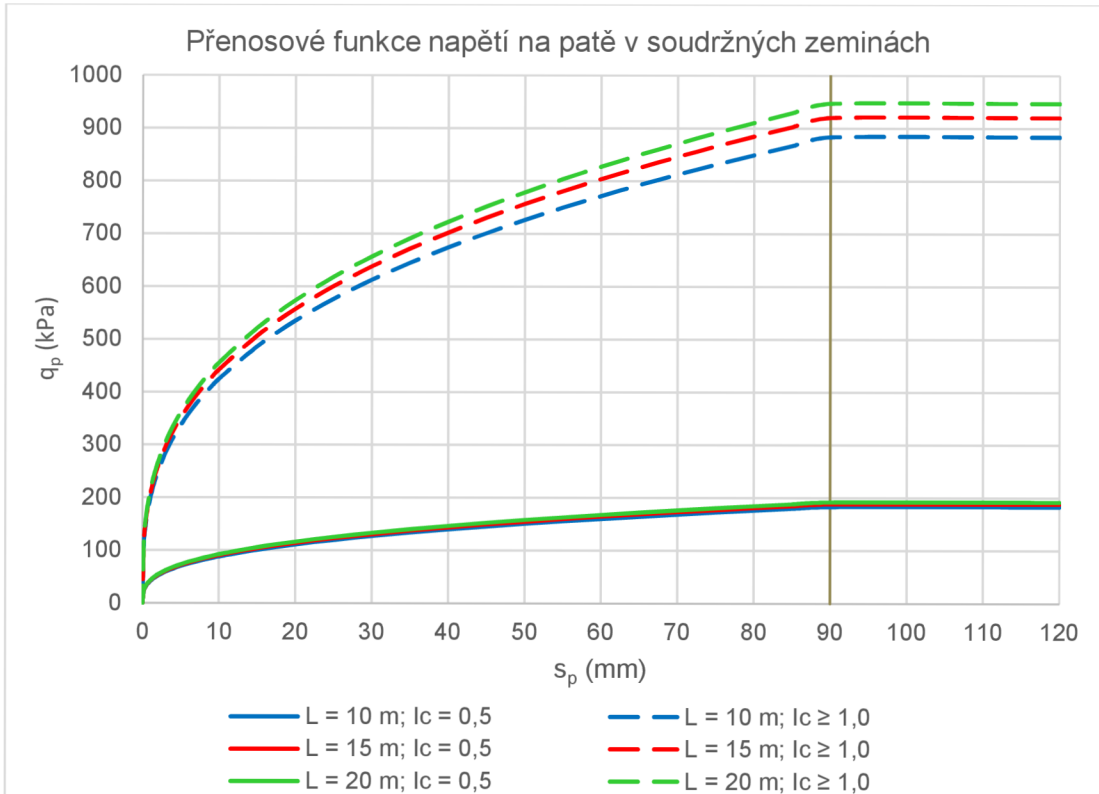
$\beta$  exponent pro daný typ a stav zeminy v patě piloty

Tab. 4.19 Vstupní parametry pro kubickou přenosovou křivku pro odpor na patě piloty průměru  $d_i = 900$  mm v soudržných a nesoudržných zeminách

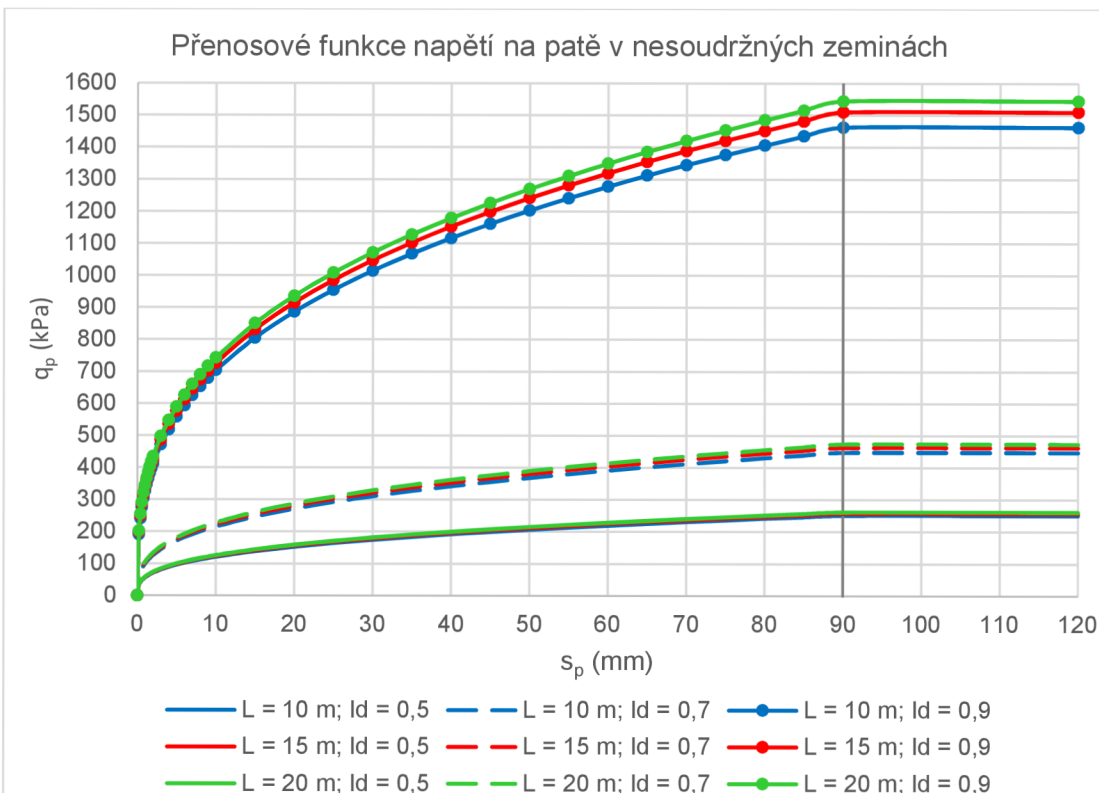
$d_i = 900$ mm	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
$L_{ref}$ (m)	10,00		10,00		
$q_{p,ref}$ (kPa)	183,34	883,55	251,36	447,63	1462,48
$\beta$	0,067	0,100	0,057	0,082	0,079
$s_{p,lim}$ (mm)	90,00		90,00		

Tab. 4.20 Limitní napětí na patě dle power law pro zeminy soudržné a nesoudržné v hloubkách  $L = (10; 15; 20)$  m

$d_i = 900$ mm	$q_{p,lim}$ (kPa)				
	SOUDRŽNÉ		NESOUDRŽNÉ		
$L$ (m)	$I_c = 0,5$	$I_c \geq 1$	$I_D = 0,5$	$I_D = 0,7$	$I_D = 0,9$
10	183,34	883,55	251,36	447,63	1462,48
15	188,42	920,20	257,27	462,68	1509,79
20	192,11	947,13	261,54	473,67	1544,29



Obr. 4.16 Kubické přenosové funkce napětí na patě v soudržných zeminách pro hloubku paty  $L = (10; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm



Obr. 4.17 Kubické přenosové funkce napětí na patě v nesoudržných zeminách pro hloubku paty  $L = (10; 15; 20)$  m,  $d_i = 900$  mm

#### 4.4 Vliv průměru piloty

Dle Masopust (1994) vstupuje do výpočtu mezního plášťového tření/odporu na patě průměr piloty. Se zvětšujícím se průměrem klesá mezní plášťové tření/odpor na patě, což je demonstrováno na Obr. 4.18. Nicméně vliv průměru na výslednou kapacitu je poměrně malý, což je v souladu se zahraničními zdroji (viz Loukidis & Salgado (2008)).

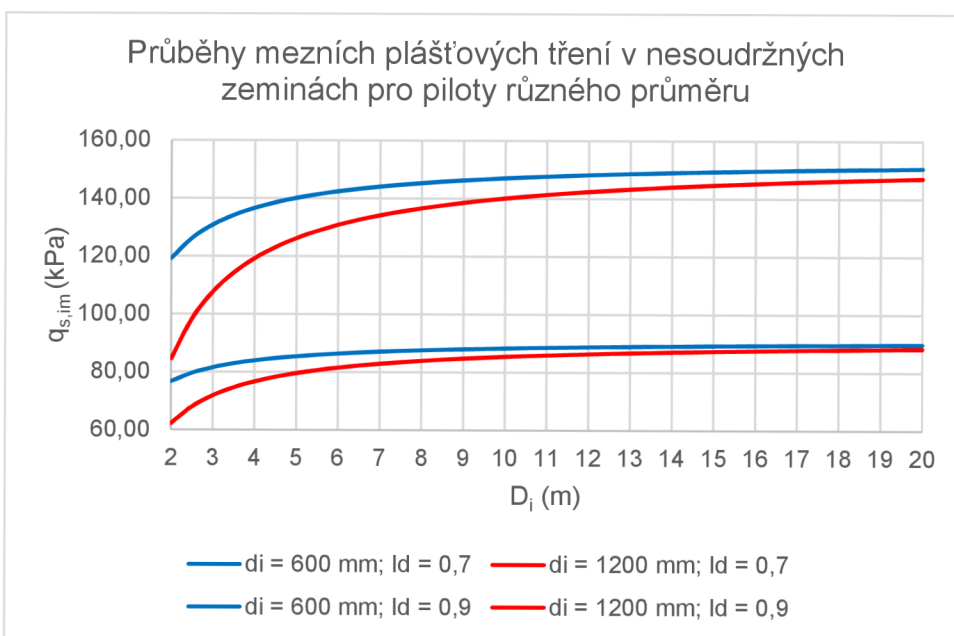
Tento jev jsem se pokusila vysvětlit na základě článku dle Foray (1998), kde byl odvozen vztah pro normálovou tuhost rozhraní piloty – zemina:

$$k = \frac{\Delta\sigma_n}{\Delta u} = \frac{2 \cdot E_p}{R} \quad (4.10)$$

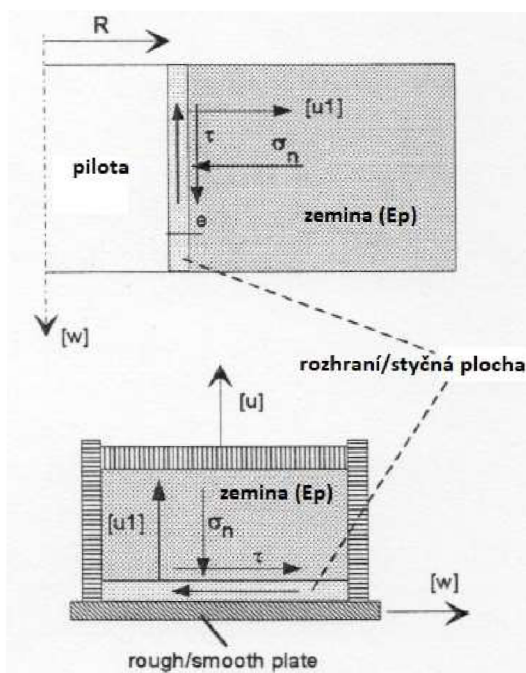
- k normálová tuhost rozhraní pilota – zemina
- $\Delta\sigma_n$  změna normálového napětí na dřívku piloty (zemní tlak)
- $\Delta u$  posun ve směru normály k dřívku (dilatance zeminy)
- $E_p$  presiometrický modul
- R poloměr dřívku piloty

Vliv průměru na plášťové tření je spojován s dilatantním chováním nesoudržných zemín a s tím související koncentrací smykových a objemových deformací do tenkého smykového pásku („shear band“) podél pláště piloty. Nárůst objemu (normálového posunu  $\Delta u$ ) způsobuje nárůst normálového napětí  $\Delta\sigma_n$  působícího na plášť piloty v závislosti na aktuální normálové tuhosti  $k$ . Dle rovnice (4.10) je normálové napětí  $\Delta\sigma_n$  (resp. zemní tlak) nepřímo úměrný poloměru piloty  $R$ . Čím menší je poloměr  $R$ , tím větší tlak je na pilotu vyvíjen, což vede k mobilizaci většího plášťového tření  $\tau$ . Vztah (4.10) je ilustrován na Obr. 4.19, který mobilizaci plášťového tření přirovnává ke smykové krabicové zkoušce. (Foray (1998))

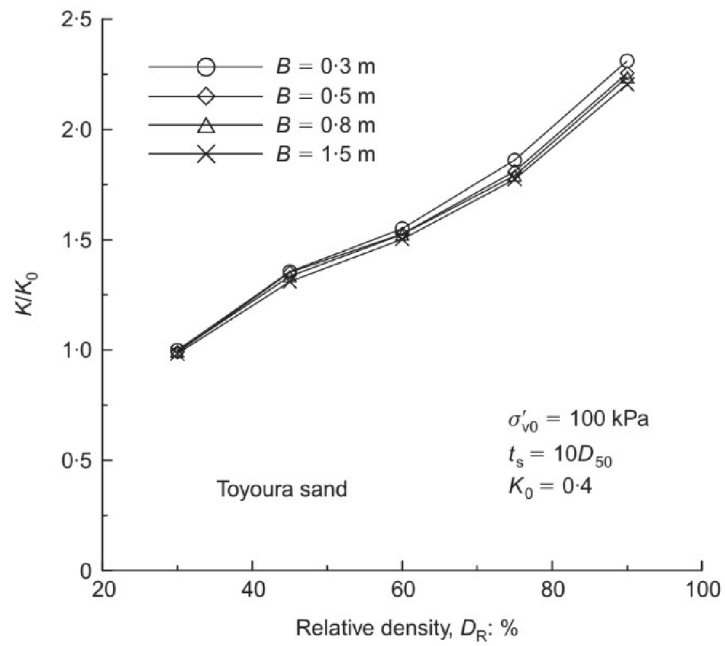
Platnost této nepřímé úměry mezi zemním tlakem (součinitelem zemního tlaku  $K$ ) a průměrem/poloměrem piloty potvrzují i Loukidis & Salgado (2008), kteří provedli analýzu metodou konečných prvků a zjistili, že rozdíl mezi jednotlivými hodnotami součinitele zemního tlaku  $K$  (resp. plášťového tření) při změně průměru piloty nepřesáhl 5 %. Výsledky analýzy jsou znázorněny na Obr. 4.20, kde můžeme vidět, že vliv průměru na velikost součinitele zemního tlaku není výrazný. Nutné je vliv průměru na plášťové tření brát v potaz především při laboratorním testování modelových pilot, kde je poměr velikosti zrn a poloměru piloty relativně velký. (Loukidis & Salgado (2008))



Obr. 4.18 Průběh mezního plášťového tření  $q_{s,lim}$  dle metody Masopust (1994) pro piloty o průměru  $d_i = 600$  mm a  $d_i = 1200$  mm v nesoudrzných zeminách ulehlosti  $I_D = 0,7$  a  $I_D = 0,9$



Obr. 4.19 Znázornění analogie mezi plášťovým třením piloty a krabicovou smykovou zkouškou (převzato z Foray (1998))



- B průměr piloty
- $K_0$  počáteční součinitel zemního tlaku
- K součinitel zemního tlaku ve sledovaném stavu
- $D_R$  relativní ulehlost materiálu

Obr. 4.20 Vliv průměru piloty B na velikost součinitele zemního tlaku K při různých stavech ulehlosti  $D_R$  základové půdy (převzato z Loukidis & Salgado (2008))

## 5 ZÁVĚR

Cílem práce bylo odvození tvaru přenosových funkcí (mobilizačních křivek) pro plášť a patu vrtaných velkopřůměrových pilot na základě transformace současně často používaného empirického/semiempirického návrhového postupu – metody dle Masopust (1994).

V práci byl objasněn princip fungování metody přenosových funkcí a uvedeny doporučené tvary přenosových funkcí. Použity byly mobilizační křivky založené na rovnici hyperboly a kubické paraboly dle Bohn (2016). Následně byl proveden rozbor těchto dvou tvarů mobilizačních křivek a definice potřebných vstupních parametrů pro jejich sestavení.

Hodnoty vstupních parametrů definujících limitní plášťové tření a limitní napětí na patě byly odvozeny z Masopust (1994). Do matematických vztahů pro mobilizační křivky byla zahrnuta závislost mezních napětí na hloubce transformací limitních hodnot napětí dle Masopust (1994) do mocninné funkce (power law) pomocí aplikace Řešitel v softwaru Microsoft Excel. Deformační parametry přenosových funkcí byly převzaty z Bohn (2016).

V posledním kroku byly tyto mobilizační křivky sestaveny pro plášť i patu v různých hloubkách pro pilotu průměru 900 mm umístěnou v soudržných zeminách různé konzistence nebo v nesoudržných zeminách různé ulehlosti.

## 6 POUŽITÉ ZDROJE

BOHN, C., LOPES DOS SANTOS, A. & FRANK, R., 2016. Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, July 25.

FORAY, P., BALACHOWSKI, L. & RAULT, G., 1998. Scale effect in shaft friction due to the localisation of deformations. V: *Centrifuge 98 : Proceedings of International Conference Centrifuge 98, Tokyo, Japan, 23-25 September 1998*. Rotterdam: Balkema, pp. 211 - 216.

LOUKIDIS, D. & SALGADO, R., 2008. *Analysis of the Shaft Resistance of Nondisplacement Piles in Sand*, West Lafayette: autor neznámý

MASOPUST, J., 1994. 2 Únosnost svise zatížených vrtaných pilot. V: *Vrtané piloty*. Praha: Čeněk a Ježek s. r. o., pp. 66 - 92.

MASOPUST, J. & GLISNÍKOVÁ, V., 2007. *Zakládání staveb, modul M01*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s. r. o..

POULOS, E. H. & DAVIS, H. G., 1980. 5.3 Theoretical Solutions for Settlement and Load Distribution. V: *Pile Foundation Analysis and Design*. New York: J. Wiley and Sons.

Wikipedia, 2019. *Wikipedia.org*. [Online]

Available at: [https://en.wikipedia.org/wiki/Power\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Power_law)

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

a	konstanta
a,b	regresní koeficienty zeminy v i-té vrstvě profilu
B	průměr piloty
d	průměr piloty
$\bar{d}$	vážený průměr profilů piloty
$D_i$	hloubka od povrchu terénu do středu i-té vrstvy profilu/segmentu
$d_i$	průměr piloty v i-té vrstvě, průměr segmentu piloty
$d_p$	průměr paty piloty
$D_R$	relativní ulehlost materiálu
$D_{ref}$	referenční hloubka středu segmentu piloty
e,f	regresní koeficienty pro zeminu v patě piloty
$E_b$	modul pružnosti materiálu piloty
$E_p$	tuhost materiálu piloty
$E_p$	presimetrický modul
$E_s$	Youngův modul
$E_{si}$	sečnový modul deformace zeminy i-té vrstvy
$\bar{E}_s$	průměrný sečnový modul deformace zeminy podél dřívku
f(x)	funkce
$h_i$	mocnost i-té vrstvy profilu
I	příčinkový koeficient sedání piloty
$I_1$	základní příčinkový koeficient sedání
$I_c$	index konzistence soudržných zemin
$I_D$	index ulehlosti nesoudržných zemin
j, k	konstanty
k	mocnitel
k	normálová tuhost
K	součinitel zemního tlaku
K	poměr tuhostí zemina – pilota
$K_0$	počáteční součinitel zemního tlaku
L	hloubka paty piloty
$l_i$	mocnost i-té vrstvy profilu
$L_{ref}$	referenční hloubka paty piloty
$m_1$	koeficient podle druhu zatížení
$m_2$	koeficient vyjadřující vliv ochrany dřívku piloty
$M_b, M_p$	deformační parametr paty piloty
$M_s$	deformační parametr pláště piloty



$n$	počet měření
$P$	svislé zatížení
$q_b$	odpor na patě
$q_{b,ult}$	mezní odpor na patě piloty
$q_p$	odpor na patě piloty
$q_{p,lim}$	mezní odpor na patě piloty
$q_{p,ref}$	referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce $L_{ref}$
$q_s$	plášťové tření
$\overline{q_s}$	průměrné plášťové tření
$q_{s,lim}$	limitní plášťové tření
$q_{s,ref}$	referenční limitní plášťové tření v referenční hloubce $D_{ref}$
$q_{s,ult}$	mezní plášťové tření
$q_{si}$	mezní plášťové tření v $i$ -té vrstvě
$R$	svislá síla zatěžující pilotu
$R$	poloměr dříku piloty
$R_{bu}$	zatížení vyvolující sednutí piloty $s_{25}$
$R_k$	korekční koeficient vlivu poměru tuhostí $K$
$R_{pu}$	síla přenášená patou
$R_{su}$	mezní síla přenášená pláštěm
$R_y$	svislé zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření
$s_0$	sednutí hlavy piloty
$s_{25}$	sednutí piloty o velikosti 25 mm
$s_b$	sednutí paty piloty
$s_{b,lim}$	mezní sedání paty piloty
$s_p$	sedání paty piloty
$s_{p,lim}$	limitní sedání paty piloty
$s_s$	sedání segmentu piloty
$s_{s,lim}$	mezní sedání segmentu piloty
$s_y$	sedání piloty při zatížení $R_y$
$u_i$	původní hodnoty měření
$u_i^m$	korespondující hodnoty měření
$x$	proměnná
$\alpha$	exponent pro daný typ a stav zeminy
$\beta$	koeficient přenosu zatížení do paty piloty
$\beta$	exponent pro daný typ a stav zeminy v patě piloty
$\Delta u$	posun ve směru normály k dříku (dilatance zeminy)
$\Delta \sigma_n$	změna normálového napětí na dříku piloty (zemní tlak)
$\rho$	sedání hlavy piloty

## 8 SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

### Obrázky:

OBR. 2.1 MEZNÍ ZATĚŽOVACÍ KŘIVKA VRTANÉ PILOTY DLE MASOPUST (1994) (ČERVENÁ), ZATÍŽENÍ PŘENÁŠENÉ PATOU (ZELENÁ) .....	13
OBR. 2.2 PŘÍKLADY GRAFŮ NEPŘÍMÉ ÚMĚRNOSTI (PŘIPRAVENO V PROGRAMU GEOGEBRA) .....	15
OBR. 2.3 PRŮBĚH PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ $Q_{si}$ PO HLOUBCE $D_i$ PRO PILOTY PRŮMĚRU $D_i = 900$ MM V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE METODY MASOPUST (1994) .....	16
OBR. 2.4 VLIV TUHOSTI $K$ (STLAČITELNOSTI) NA TVAR MEZNÍ ZATĚŽOVACÍ KŘIVKY PILOTY .....	18
OBR. 2.5 DISTRIBUCE PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ PODÉL DŘÍKU PRO PILOTU STLAČITELNOU ( $K = 50$ ) A NESTLAČITELNOU ( $K = 5000$ ) (PŘEVZATO Z POULOS & DAVIS (1980)) .....	19
OBR. 2.6 VLIV NÁRŮSTU TUHOSTI ZEMINY $E_s$ S HLOUBKOU NA TVAR MEZNÍ ZATĚŽOVACÍ KŘIVKY .....	19
OBR. 2.7 A) GRAF PRO URČENÍ KOEFICIENTU $R_k$ (PŘEVZATO Z MASOPUST & GLISNÍKOVÁ (2007)) .....	20
OBR. 2.8 A) GRAF PRO URČENÍ PŘÍČINKOVÉHO KOEFICIENTU SEDÁNÍ $I_1$ (PŘEVZATO Z MASOPUST & GLISNÍKOVÁ (2007)) .....	21
OBR. 3.1 MODEL METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ PRO SVISLE ZATÍŽENÉ PILOTY (PŘEVZATO Z BOHN (2016)) .....	23
OBR. 3.2 NĚKTERÉ PŘÍKLADY EXISTUJÍCÍCH TVARŮ MOBILIZAČNÍCH KŘIVEK (PŘEVZATO Z BOHN (2016)) .....	23
OBR. 3.3 VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK PRO URČENÍ MEZNÍCH HODNOT SEDÁNÍ KUBICKÉ KŘIVKY $S_{s,LIM A}$ $S_{B,LIM}$ (PŘEVZATO Z (BOHN (2016))) .....	25
OBR. 3.4 ZNÁZORNĚNÍ POČÁTEČNÍ TEČNY A JEJÍHO SKLONU (BOHN (2016)) .....	27
OBR. 3.5 VÝSLEDKY ZATĚŽOVACÍCH ZKOUŠEK PRO URČENÍ PARAMETRŮ $M_s$ A $M_B$ (PŘEVZATO Z BOHN (2016)) .....	27
OBR. 4.1 PRŮBĚHY MEZNÍCH PLÁŠŤOVÝCH TŘENÍ PRO PILOTY PRŮMĚRU $D_i = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE METODY MASOPUST (1994) .....	30
OBR. 4.2 PRŮBĚHY MEZNÍCH NAPĚTÍ NA PATĚ PRO PILOTY PRŮMĚRU $D_i = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE METODY MASOPUST (1994) .....	31
OBR. 4.3 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO SOUDRŽNÉ ZEMINY .....	35
OBR. 4.4 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO NESOUDRŽNÉ ZEMINY .....	37
OBR. 4.5 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO SOUDRŽNOU ZEMINU KONZISTENCE $I_c = 0,5$ .....	39
OBR. 4.6 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO SOUDRŽNOU ZEMINU KONZISTENCE $I_c \geq 1$ .....	39
OBR. 4.7 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO NESOUDRŽNOU ZEMINU ULEHLOSTI $I_D = 0,5$ .....	41
OBR. 4.8 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO NESOUDRŽNOU ZEMINU ULEHLOSTI $I_D = 0,7$ .....	41
OBR. 4.9 POROVNÁNÍ HODNOT LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW S METODOU MASOPUST (1994) PRO NESOUDRŽNOU ZEMINU ULEHLOSTI $I_D = 0,9$ .....	42
OBR. 4.10 HYPERBOLICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO STŘEDY SEGMENTŮ HLOUBKÁCH $D_i = (5; 10; 15)$ M, $D_i = 900$ MM .....	44
OBR. 4.11 HYPERBOLICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO STŘEDY SEGMENTŮ V HLOUBKÁCH $D_i = (5; 15; 20)$ M, $D_i = 900$ MM .....	44
OBR. 4.12 HYPERBOLICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE NAPĚTÍ NA PATĚ V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO HLOUBKU PATY $L = (10; 15; 20)$ M, $D_i = 900$ MM .....	46

OBR. 4.13 HYPERBOLICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE NAPĚTÍ NA PATĚ V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO HLOUBKU PATY $L = (10; 15; 20)$ M, $D_1 = 900$ MM .....	46
OBR. 4.14 KUBICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO STŘEDY SEGMENTŮ V HLOUBKÁCH $D_1 = (5; 15; 20)$ M, $D_1 = 900$ MM .....	48
OBR. 4.15 KUBICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO STŘEDY SEGMENTŮ V HLOUBKÁCH $D_1 = (5; 15; 20)$ M, $D_1 = 900$ MM .....	48
OBR. 4.16 KUBICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE NAPĚTÍ NA PATĚ V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO HLOUBKU PATY $L = (10; 15; 20)$ M, $D_1 = 900$ MM .....	50
OBR. 4.17 KUBICKÉ PŘENOSOVÉ FUNKCE NAPĚTÍ NA PATĚ V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH PRO HLOUBKU PATY $L = (10; 15; 20)$ M, $D_1 = 900$ MM .....	50
OBR. 4.18 PRŮBĚH MEZNÍHO PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ $Q_{s,LIM}$ DLE METODY MASOPUST (1994) PRO PILOTY O PRŮMĚRU $D_1 = 600$ MM A $D_1 = 1200$ MM V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH ULEHLOSTI $I_D = 0,7$ A $I_D = 0,9$	52
OBR. 4.19 ZNÁZORNĚNÍ ANALOGIE MEZI PLÁŠŤOVÝM TŘENÍM PILOTY A KRABICOVOU SMYKOVOU ZKOUŠKOU (PŘEVZATO Z FORAY (1998)) .....	52
OBR. 4.20 VLIV PRŮMĚRU PILOTY B NA VELIKOST SOUČINITELE ZEMNÍHO TLAKU K PŘI RŮZNÝCH STAVECH ULEHLOSTI $D_R$ ZÁKLADOVÉ PŮDY (PŘEVZATO Z LOUKIDIS & SALGADO (2008)) .....	53

## Tabulky:

TAB. 8.1 REGRESNÍ KOEFICIENTY PRO JEDNOTLIVÉ TYPY ZEMIN A HORNIN (PŘEVZATO Z MASOPUST & GLISNÍKOVÁ (2007)).....	12
TAB. 3.1 PARAMETRY KUBICKÉ KŘIVKY (PŘEVZATO Z BOHN (2016)).....	24
TAB. 3.2 PARAMETRY HYPERBOLICKÉ KŘIVKY (PŘEVZATO Z BOHN (2016)).....	26
TAB. 4.1 REGRESNÍ KOEFICIENTY SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMIN (VIZ TAB. 2.1) PRO VÝPOČET MEZNÍHO PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ DLE METODY MASOPUST (1994).....	28
TAB. 8.2 LIMITNÍ PLÁŠŤOVÁ TŘENÍ DLE ROVNICE (2.3) PRO PILOTY PRŮMĚRU $D_1 = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE METODY MASOPUST (1994) .....	30
TAB. 4.3 REGRESNÍ KOEFICIENTY SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMIN (VIZ TAB. 2.1) PRO VÝPOČET MEZNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE METODY MASOPUST (1994).....	30
TAB. 8.3 LIMITNÍ NAPĚTÍ NA PATĚ DLE ROVNICE (2.5) PRO PILOTY PRŮMĚRU $D_1 = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE METODY MASOPUST (1994) .....	32
TAB. 4.5 REFERENČNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET LIMITNÍHO PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ DLE POWER LAW V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH .....	33
TAB. 8.4 LIMITNÍ PLÁŠŤOVÁ TŘENÍ V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE POWER LAW (ROVNICE (4.3)) A SROVNÁNÍ S METODOU MASOPUST (1994) .....	35
TAB. 4.7 REFERENČNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET LIMITNÍHO PLÁŠŤOVÉHO TŘENÍ DLE POWER LAW V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH .....	35
TAB. 8.5 LIMITNÍ PLÁŠŤOVÁ TŘENÍ V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE POWER LAW (ROVNICE (4.3)) A SROVNÁNÍ S METODOU MASOPUST (1994) .....	37
TAB. 8.6 REFERENČNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH .....	39
TAB. 4.10 LIMITNÍ NAPĚTÍ NA PATĚ V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE POWER LAW (ROVNICE (4.4)) A SROVNÁNÍ S METODOU MASOPUST (1994) .....	38
TAB. 8.7 REFERENČNÍ HODNOTY PRO VÝPOČET LIMITNÍHO NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH .....	41
TAB. 4.12 LIMITNÍ NAPĚTÍ NA PATĚ V NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH DLE POWER LAW (ROVNICE (4.4)) A SROVNÁNÍ S METODOU MASOPUST (1994) .....	40
TAB. 4.13 VSTUPNÍ PARAMETRY PRO HYPERBOLICKOU PŘENOSOVOU KŘIVKU PRO PLÁŠŤOVÉ TŘENÍ PRO SEGMENTY PRŮMĚRU $D_1 = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH .....	43

TAB. 4.14 LIMITNÍ PLÁŠŤOVÁ TŘENÍ DLE POWER LAW PRO ZEMINY SOUDRŽNÉ A NESOUDRŽNÉ V HLOUBKÁCH $D_i = (5; 10; 15)$ M.....	43
TAB. 4.15 VSTUPNÍ PARAMETRY PRO HYPERBOLICKOU PŘENOSOVOU KŘIVKU PRO ODPOR NA PATĚ PILOTY PRŮMĚRU $D_i = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH.....	45
TAB. 4.16 LIMITNÍ NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW PRO ZEMINY SOUDRŽNÉ A NESOUDRŽNÉ V HLOUBKÁCH $L = (10; 15; 20)$ M .....	45
TAB. 4.17 VSTUPNÍ PARAMETRY PRO KUBICKOU PŘENOSOVOU KŘIVKU PRO PLÁŠŤOVÉ TŘENÍ PRO SEGMENTY PRŮMĚRU $D_i = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH.....	47
TAB. 4.18 LIMITNÍ PLÁŠŤOVÁ TŘENÍ DLE POWER LAW PRO ZEMINY SOUDRŽNÉ A NESOUDRŽNÉ V HLOUBKÁCH $D_i = (5; 10; 15)$ M.....	47
TAB. 4.19 VSTUPNÍ PARAMETRY PRO KUBICKOU PŘENOSOVOU KŘIVKU PRO ODPOR NA PATĚ PILOTY PRŮMĚRU $D_i = 900$ MM V SOUDRŽNÝCH A NESOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH .....	49
TAB. 4.20 LIMITNÍ NAPĚTÍ NA PATĚ DLE POWER LAW PRO ZEMINY SOUDRŽNÉ A NESOUDRŽNÉ V HLOUBKÁCH $L = (10; 15; 20)$ M .....	49

## **9 SEZNAM PŘÍLOH**

**P1 Sečnové moduly deformace zemin  $E_s$**

**P2 Mobilizovaná napětí pro sestrojení přenosových funkcí**

**P2.1 Hyperbola**

**P2.1.1 Plášťové tření**

**P2.1.2 Napětí na patě**

**P2.2 Kubická parabola**

**P2.2.1 Plášťové tření**

**P2.2.2 Napětí na patě**