



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEOTECHNIKY**

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**APLIKACE METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ PRO  
STANOVENÍ MEZNÍ ZATĚŽOVACÍ KŘIVKY MIKROPILOT**

APPLICATION OF THE LOAD-TRANSFER METHOD IN DETERMINATION OF THE MICROPILES LOAD-DISPLACEMENT CURVE

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Matěj Mareš**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.**

**BRNO 2023**



## Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav geotechniky  
Student: **Matěj Mareš**  
Vedoucí práce: **Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.**  
Akademický rok: 2022/23  
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

Děkan Fakulty Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

### **Aplikace metody přenosových funkcí pro stanovení mezní zatěžovací křivky mikropilot**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Metoda přenosových funkcí (MPF) je standardně používaný nástroj pro sestavení mezní zatěžovací křivky velkopřůměrových vrtaných pilot. V případě mikropilot s relativně malou osovou tuhostí však tato metoda poskytuje řadu výhod. Diskretizací mikropiloty na jednotlivé prvky a zohledněním jejich reálné tuhosti lze do analýzy zahrnout nerovnoměrnost svislého posunu a tudíž mobilizovaného plášťového tření podél kořene mikropiloty. Významnou roli zde sehrává stanovení tuhosti ideálního průřezu, ve které je zohledněn vliv vyztužení mikropiloty. V první části práce bude provedena stručná rešerše dostupných informací o využití MPF pro mikropiloty a případně jiné prvky hlubinného zakládání kromě pilot. V druhé části bude MPF využita formou inverzních analýz vybraných zatěžovacích zkoušek osově zatížených mikropilot. K tomu bude použit software vyvinutý v rámci Ústavu geotechniky.

#### **Cíle a výstupy bakalářské práce:**

Cílem bakalářské práce je provedení zpětných výpočtů vybraných zatěžovacích zkoušek mikropilot pomocí metody přenosových funkcí (mobilizačních křivek). Práce je zaměřena na osově zatížené prvky. Bude zhodnoceno, jak vhodná je tato metoda pro predikci mezní zatěžovací křivky mikropilot, tedy prvků s menší osovou tuhostí a tudíž větší nerovnoměrností v průběhu svislého posunutí v porovnání s velkopřůměrovými prvky hlubinného zakládání. Výstupem výpočtů budou dále předpokládané profily mezního plášťového tření, které budou dále srovnány s doporučeními z literatury a bude zhodnocen vliv injektáže.

## Seznam doporučené literatury a podklady:

- 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.
- BRUCE, D.A., DIMILLIO, A.F. and JURAN, I., 1997. Micropiles: the state of practice part 1: characteristics, definitions and classifications. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 1997, vol. 1, pp.25-35.
- HULLA, J.; TURČEK, P. Zakladanie stavieb. 2004.
- CHALMOVSKY, J. Využití metody přenosových funkcí pro predikci chování hlubinných základů v ČR. Souhrnná výzkumná zpráva, 2021.
- JURAN, I., BRUCE, D.A., DIMILLIO, A. and BENSLIMANE, A.. Micropiles: the state of practice. Part II: design of single micropiles and groups and networks of micropiles. Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Ground Improvement, 1999, vol. 3, pp.89-110.
- 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.
- Výstupy ze statických zatěžovacích zkoušek mikropilot.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku.

V Brně, dne 28. 11. 2022

L. S.

---

doc. Ing. Lumír Míča, Ph.D.

vedoucí ústavu

---

Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

vedoucí práce

---

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA, dr. h. c.

děkan

## **ABSTRAKT**

Tato bakalářská práce se zabývá využitím metody přenosových funkcí pro návrh mikropilot. Zkoušky mikropilot, systému GEWI a Ischebeck TITAN, zhotovených převážně v neogenních jílech byly v této práci základně vyhodnoceny a následně byly použity pro zpětnou analýzu mezní zatěžovací křivky a validaci doporučených hodnot pro vstupní parametry výpočtu predikce chování mikropiloty pomocí MPF v programu PMpLTO. Nakonec byla provedena a vyhodnocena parametrická studie zohledňující různé délky mikropiloty.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Geotechnika, metoda přenosových funkcí, mikropiloty, mezní zatěžovací křivka, plášťové tření, GEWI mikropiloty, mikropiloty Ischebeck TITAN, samozávrtné mikropiloty, zatěžovací zkouška, jíl kvartérní, jíl neogenní, zpětná analýza, parametrická studie, PMpLTO.

## **ABSTRACT**

This bachelor's thesis is about the use of load transfer method for micropiles design. Load tests of micropiles, GEWI system and Ischebeck TITAN system, bored mostly in neogene clays were evaluated. The obtained test results were subsequently utilized for inverse analysis of limit load curve and validation of recommended input parameters for the prediction of micropile behaviour using the load transfer method within the PMpLTO software. Lastly, a parametric study considering various micropile lengths was performed and evaluated.

## **KEY WORD**

Geotechnics, load transfer method, micropiles, limit load curve, shaft friction, GEWI micropiles, Ischebeck TITAN micropiles, self-drilling micropiles, load test, quaternary clay, neogene clay, inverse analysis, parametric study, PMpLTO.

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MAREŠ, Matěj. *Aplikace metody přenosových funkcí pro stanovení mezní zatěžovací křivky mikropilot*. Brno, 2023. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

## **PODĚKOVÁNÍ**

Rád bych poděkovat především vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Jurajovi Chalmovskému, Ph.D. za jeho odborné vedení práce, rady, připomínky a cenné informace, bez kterých bych tuto práci zpracovat nemohl. Chtěl bych mu také poděkovat za otevření dveří geotechniky, která dále profilovala mé studium. V neposlední řadě děkuji rodině a přátelům za stálou podporu, které se mi dostávalo nejen během psaní této práce, ale během celého studia a za to jim jsem vděčný.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Aplikace metody přenosových funkcí pro stanovení mezní zatěžovací křivky mikropilot* zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 26. 5. 2023

---

Matěj Mareš

autor



# OBSAH

1	ÚVOD, MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ	11
2	ZÁKLADNÍ POPIS METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ	12
2.1	METODA PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ	12
2.2	TVARY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ	15
2.2.1	HYPERBOLICKÁ PŘENOSOVÁ FUNKCE	15
2.3	MEZNÍ PLÁŠŤOVÉ TŘENÍ $q_{s,ult} - \beta$ METODA	15
2.4	VYUŽITÍ A VÝHODY METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ	17
2.5	PROGRAM PMpLTO	17
3	TECHNOLOGIE ZHOTOVENÍ ANALYZOVANÝCH MIKROPILOT	18
3.1	VRTANÉ MIKROPILOTY VYZTUŽENÉ GEWI TYČÍ	18
3.1.1	POPIS KONSTRUKCE GEWI MIKROPILOT	18
3.1.2	PRŮBĚH ZHOTOVENÍ	18
3.1.3	ROTAČNÍ VRTÁNÍ DUPLEX	19
3.1.4	VÝHODY TECHNOLOGIE	21
3.2	SAMOZÁVRTNÉ MIKROPILOTY ISCHEBECK TITAN	21
3.2.1	POPIS KONSTRUKCE MIKROPILOT ISCHEBECK	21
3.2.2	VRTNÁ KORUNKA	22
3.2.3	SOUTYČÍ	22
3.2.4	PRŮBĚH ZHOTOVENÍ	23
3.2.5	VÝHODY TECHNOLOGIE	24
4	POSLOUPNOST ANALÝZ – POUŽITÉ MODELY ÚNOSNOSTI	25
4.1	VARIANTA 0 (0M)	25
4.2	VARIANTA 1 (1M)	26
4.3	VARIANTA 2 (2A)	26
4.4	VARIANTA 3 (3M)	27
5	ANALYZOVANÉ ZKOUŠKY, VYHODNOCENÍ ZÁKLADNÍHO MONITORINGU	29
5.1	OSTRAVA	30
5.1.1	GEOLOGICKÝ PROFIL	31

5.1.2	MIKROPILOTA MP1	33
5.1.3	MIKROPILOTA MP2	40
5.2	VÍDEŇ	46
5.2.1	TECHNOLOGICKÁ SPECIFIKACE	46
5.2.2	GEOLOGICKÝ PROFIL	46
5.2.3	MIKROPILOTA IT1	49
5.2.4	MIKROPILOTA IT2	52
5.2.5	MIKROPILOTA IT3	55
6	VÝSLEDKY INVERZNÍCH VÝPOČTŮ A DÍLČÍ ZHODNOCENÍ	58
6.1	OSTRAVA	58
6.1.1	MIKROPILOTA MP1	58
6.1.2	MIKROPILOTA MP2	61
6.1.3	ZHODNOCENÍ	64
6.2	VÍDEŇ	65
6.2.1	MIKROPILOTA IT1	66
6.2.2	MIKROPILOTA IT2	67
6.2.3	MIKROPILOTA IT3	68
6.2.4	ZHODNOCENÍ	70
7	PARAMETRICKÁ STUDIE	71
8	ZÁVĚR	74
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76
10	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A VELIČIN	77
11	SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ	79
12	SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ	80
13	SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK	81

# 1 ÚVOD, MOTIVACE PRO ŘEŠENÍ

V této bakalářské práci je popsán výpočet chování mikropilot pomocí metody přenosových funkcí (MPF), použitý tvar přenosové funkce a její výhody a využití. Predikce pomocí MPF může fungovat v různých variantách výpočtu (0, 1, 2, 3 a to automatické nebo manuální), kterými disponuje program PMpLTO.

Dále jsou v práci popsány technologie vrtaných mikropilot vyztužených GEWI tyčemi a mikropilot systému Ischebeck TITAN. Popsány jsou jejich konstrukce, průběh zhotovení a výhody jednotlivých technologií.

Pro zmíněné druhy mikropilot byly dodány zatěžovací zkoušky (4 tahové a 1 tlaková) zhotovené převážně v jílovém prostředí kvartéru a neogénu, které jsou zde interpretovány a základně zhodnoceny. Mezní zatěžovací křivky (MZK) získané z těchto zkoušek byly následně použity pro zpětnou analýzu a predikci jejího chování. Výstupem analýz je přehled hodnot parametrů pro jednotlivé varianty výpočtu.

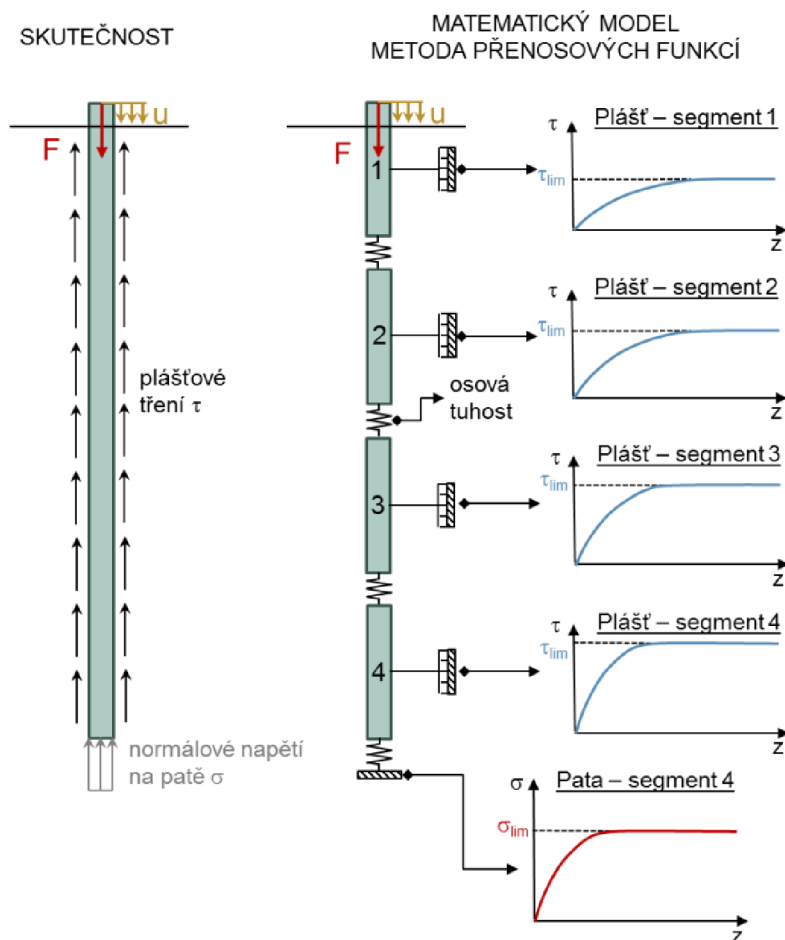
Pro jednu GEWI mikropilotu byla nakonec vypracována parametrická studie, která porovnává chování MZK při změně geometrických parametrů mikropiloty. Z této studie, a celkově z práce, by měly být vidět výhody návrhů pomocí metody přenosových funkcí oproti klasickým empirickým metodám.

## 2 ZÁKLADNÍ POPIS METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

### 2.1 METODA PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

Metoda přenosových funkcí spočívá v nahrazení interakce zemního prostředí a mikropiloty přenosovými funkcemi (mobilizačními křivkami). Na každý prvek tak připadají dva druhy přenosových funkcí, kdy jeden je určen pro patu piloty a je to závislost svislého posunutí paty mikropiloty  $s_b$  a normálového napětí mobilizovaného na patě  $q_b$ , zatímco druhý druh je určen pro plášť mikropiloty, a to je závislost mezi posunem piloty  $s_s$  a mobilizovaným plášťovým třením  $q_s$ .

Program používající MPF si mikropilotu rozčlení na libovolný počet segmentů (prvků), velikost se stanoví dle geologie a celkové délky prvku. Každému segmentu se přiřadí nezávislá přenosová funkce pro plášť, poslednímu segmentu (patě) bude přiřazena samostatná funkce pro patu. Tento proces lze vidět na Obrázek 2.1.



Obrázek 2.1 Schéma prvního kroku MPF, [1]

Práce algoritmu programu funguje v následujících krocích:

- 1 Předepsání malého posunutí v patě posledního segmentu  $s_b^n$ , kde  $n$  je pořadové číslo segmentu.
- 2 Výpočet mobilizovaného napětí  $q_b^n$  a síly  $P_b^n$  na patě posledního segmentu na základě zvolené přenosové funkce pro patu.
- 3 Zavedení předpokladu rovnosti posunu na patě, středu a v hlavě posledního segmentu. ( $s_b^n = s_c^n = s_t^n$ )
- 4 Výpočet mobilizovaného plášťového tření  $q_s^n$  na základě zvolené přenosové funkce pro plášť.
- 5 Výpočet síly ve středu segmentu  $P_c^n$  a hlavě segmentu  $P_t^n$  dle vztahů 2-1 a 2-2, kde  $D_s^n$  a  $L_s^n$  jsou průměr a délka daného segmentu mikropiloty.

$$P_c^n = P_b^n + 0,5\pi D_s^n L_s^n q_s^n \quad 2-1$$

$$P_t^n = P_b^n + \pi D_s^n L_s^n q_s^n \quad 2-2$$

- 6 Výpočet elastické deformace  $w_{el}^n$  segmentu, kde  $E_p A_s^n$  je osová tuhost segmentu  $n$

$$w_{el}^n = \frac{P_c^n L_s^n}{E_p A_s^n} \quad 2-3$$

- 7 Aktualizace posunutí  $s_c^n$  středového bodu segmentu na základě elastické deformace vypočtené v kroku 6.

$$s_c^n = s_c^n + 0,5w_{el}^n \quad 2-4$$

- 8 Aktualizace mobilizovaného plášťového tření  $q_s^n$  na základě aktualizovaného posunutí bodu segmentu a opakování kroků 5 až 8 dokud není rozdíl mezi  $s_c^n$  a  $s_c^n$  v požadované toleranci (např.  $10^{-6}$ )

- 9 Výpočet síly  $P_t^n$  a posunu  $s_t^n$  v hlavě segmentu

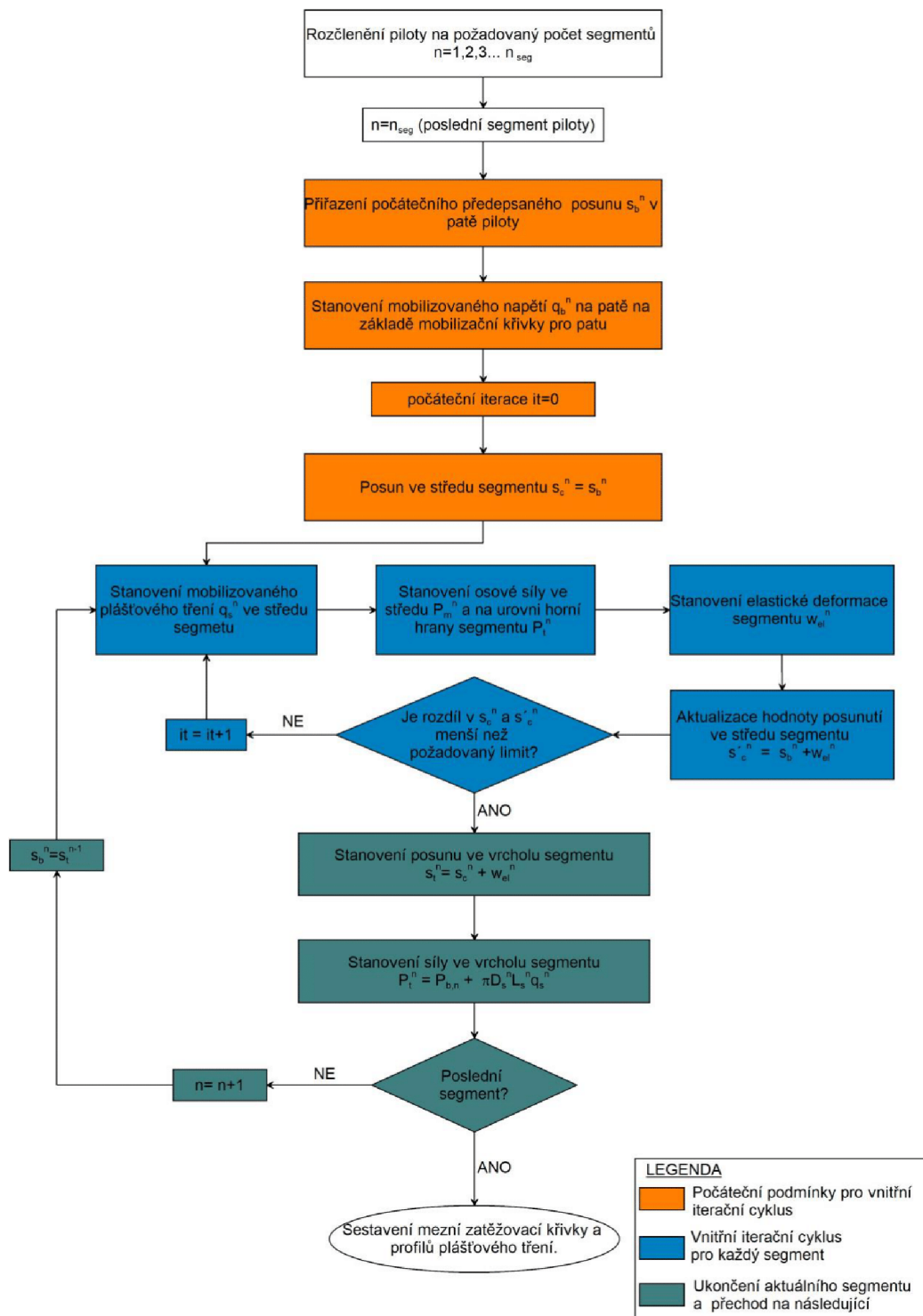
$$s_t^n = s_c^n + 0,5w_{el}^n \quad 2-5$$

$$P_t^n = P_b^n + \pi D_s^n L_s^n q_s^n \quad 2-6$$

- 10 Opakování kroků 2 až 9 pro všechny segmenty. Síla v hlavě  $P_t^0$  a posun v hlavě  $s_t^0$  segmentu představuje bod celkové mezní zatěžovací křivky (pata + plášť). Síla v patě  $P_b^n$  posledního segmentu  $n$  v závislosti na posunu  $s_t^0$  pak představuje bod mezní zatěžovací křivky paty.

- 11 Body 1 až 10 jsou opakovány pro další posunutí.

Na Obrázek 2.2 je znázorněn vývojový diagram procesu MPF.



Obrázek 2.2 Schéma práce MPF v jednom kroku, [1]

## 2.2 TVARY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

Přenosové funkce mohou mít rozdílné tvary, které závisí na druhu zemního prostředí a na hloubce, ve které se segment piloty nachází.

Nejčastěji používané tvary přenosových funkcí:

- Lineárně elastické, perfektně plastické a po částech lineární modely.
- Přenosové funkce odvozené z presiometrických zkoušek.
- Hyperbolické funkce – použity u analýz v této práci.
- Další nelineární přenosové funkce.

### 2.2.1 HYPERBOLICKÁ PŘENOSOVÁ FUNKCE

S využitím francouzské databáze zatěžovacích zkoušek byly sestaveny hyperbolické přenosové funkce 2-7 a 2-8 *Bohn et al. (2016)*, které jsou zobecněním *Fleming (1992)*.  $M_s$  je deformační parametr ovlivňující počáteční tuhost (směrnicí) mobilizační křivky pro plášť. Rozdílná je formulace pro patu, kde *Bohn et al. (2016)* nahrazuje modul pružnosti  $E_b$  deformačním parametrem  $M_b$ . Přenosové funkce jsou ekvivalentní, pokud platí vztah 2-9.

Tabulka 1 Rovnice hyperbolické přenosové funkce

TVAR T-Z KŘIVKY	ZMĚNA TUHOSTI	POČÁTEČNÍ TUHOST	
$q_s(s_s) = \frac{q_{s,ult} s_s}{M_s D_s + s_s}$	$\frac{dq_s}{ds_s} = \frac{q_{s,ult}}{M_s D_s + s_s} - \frac{q_{s,ult} s_s}{(M_s D_s + s_s)^2}$	$k_s = \frac{q_{s,ult}}{M_s D_s}$	2-7
$q_b(s_b) = \frac{q_{b,ult} s_b}{M_b D_b + s_b}$	$\frac{dq_b}{ds_b} = \frac{q_{b,ult}}{M_b D_b + s_b} - \frac{q_{b,ult} s_b}{(M_b D_b + s_b)^2}$	$k_b = \frac{q_{b,ult}}{M_b D_b}$	2-8

Doporučené hodnoty jsou pro  $M_b = 0,01$  a pro  $M_s = 0,0038$ . [1], [2]

$$M_b = 0,6 \frac{q_{b,ult}}{D_b^2 E_b} \quad 2-9$$

## 2.3 MEZNÍ PLÁŠŤOVÉ TŘENÍ $q_{s,ult}$ - $\beta$ METODA

V  $\beta$  metodě je mezní plášťové tření vztaženo k efektivnímu geostatickému napětí  $\sigma'_{OR}$  pomocí koeficientu  $\beta$ , kde  $K_s$  je součinitel bočního tlaku působícího na plášť piloty a  $\delta$  je třecí úhel na rozhraní pilota – zemina.

$$q_{s,ult} = \sigma'_{h_0} \tan \delta \quad 2-10$$

$$q_{s,ult} = \sigma'_{OR} K_s \tan \delta \quad 2-11$$

$$q_{s,ult} = \beta \sigma'_{OR} \quad 2-12$$

$$\beta = K_s \tan \delta \quad 2-13$$

*Burland (1973)* doporučuje pro třecí úhel konstrukce – zemina použít efektivní úhel vnitřního tření v kritickém stavu  $\varphi_{cv}$ . Pro normálně konsolidované zeminy tak lze teoretickou hodnotu koeficientu  $\beta$  zapsat vztahem 2-15. Pro typické hodnoty úhlu vnitřního tření v rozsahu  $20^\circ$  až  $30^\circ$  se tak teoretická hodnota koeficientu  $\beta$  pohybuje v rozmezí 0,24 až 0,29, což lze pokládat za relativně malý rozsah. Experimentálně zjištěné hodnoty získané ze zatěžovacích zkoušek pilot se pohybují v rozsahu 0,25 až 0,40.

$$K_s = K_0^{nc} = 1 - \sin \varphi_{cv} \quad 2-14$$

$$\beta = (1 - \sin \varphi_{cv}) \tan \varphi_{cv} \quad 2-15$$

Problematictější se stává stanovení součinitele bočního tlaku  $K_s$  pro překonsolidované soudržné zeminy. *Mayerhof (1976)* doporučuje pro vrtané piloty vztah  $K_s = 0,75 K_0^{oc}$ , kde  $K_0^{oc}$  je součinitel zemního tlaku v klidu pro překonsolidované zeminy. Ten je závislý na stupni překonsolidace  $OCR$  např. dle empirického vztahu  $K_0^{oc} = (1 - \sin \varphi_{cv}) OCR^{0,5}$ .

$$K_s = 0,75 K_0^{oc} = 0,75 (1 - \sin \varphi_{cv}) OCR^{0,5} \quad 2-16$$

*Dle Brown et al. (2010)* lze součinitel bočního tlaku  $K_s$  uvažovat totožný s  $K_0^{oc}$  dle následujícího vztahu:

$$K_s = K_0^{oc} = (1 - \sin \varphi_{cv}) OCR^{\sin \varphi_{cv}} \quad 2-17$$

*Vardanega et al. (2012)* vychází při stanovení součinitele bočního tlaku  $K_s$  z vlastní tíhy betonu působícího na stěny vrtu, kde  $\gamma_c$  je objemová tíha betonu,  $\gamma$  objemová tíha zeminy,  $z$  je hloubka a  $u$  je hydrostatický pórový tlak v hloubce  $z$ .

$$K_s = \frac{\gamma_c z - u}{\gamma z - u} \quad 2-18$$

*Burland (1973)* sestavil závislost mezi délkou piloty a průměrným mezním plášťovým třením pro vrtané piloty v překonsolidovaných londýnských jílech, na základě které stanovil hodnotu  $\beta$  faktoru v rozsahu 0,8 - 1,2. Tyto hodnoty



jsou výrazně vyšší ve srovnání s normálně konsolidovanými soudržnými zeminami, pravděpodobně v důsledku vyšší hodnoty  $K_0$ .

Jednotlicí vlastností všech výše popsanych vztahů je, že vodorovně napětí působící na pilotu se nemění v průběhu zatěžování. Zohledněním změny radiálního napětí v důsledku zhotovení piloty a následného zatěžování lze vztah 2-11 zobecnit do podoby 2-19. V případě vrtaných pilot jsou, např. dle *Mascarucci et al. (2014)*, změny radiálního napětí v důsledku instalace výrazně menší než v průběhu zatěžování. [1]

$$q_{s,ult} = (\sigma'_{n_0} + \Delta\sigma'_{n_c} + \Delta\sigma'_{n_l})\tan\delta \quad 2-19$$

## 2.4 VYUŽITÍ A VÝHODY METODY PŘENOSOVÝCH FUNKCÍ

Metoda přenosových funkcí se využívá pro hlavně pro osově zatížené piloty a mikropiloty. Metoda je založena na fyzikálních principech a uvažuje minimální počet empiricky získaných konstant, stává se tak z ní dobrý kompromis mezi empiricky založenými metodami, jelikož přináší přesnější a podloženější výsledky, a metodou konečných prvků (MKP), z důvodů nižší časové a hardwarové náročnosti. MPF zohledňuje tuhost piloty, která má vliv na mobilizaci plášťového tření a tvar mezní zatěžovací křivky MZK. Dalšími plasy MPF oproti empirickým metodám kromě přesnosti je větší množství výstupních dat. Kromě výsledného posunu v hlavě piloty a MZK pláště a paty piloty získáme také posun piloty v závislosti na hloubce, závislost plášťového tření pro dané zatížení a mezní plášťového tření na hloubce a závislost síly na hloubce (délce mikropiloty). [1]

## 2.5 PROGRAM PMpLTO

PMpLTO – Piles-Micropiles Load Transfer Optimalizaton. Program pro návrh a posouzení hlubinných základových prvků pracující na základě metody konečných prvků, který je vyvíjen na Ústavu geotechniky na Vysokém učení technickém v Brně (<https://geotech.fce.vutbr.cz/pmplto/>). Software využívá grafické rozhraní pro zadávání údajů o zkoumaném základovém prvku a poskytuje výsledky výpočtu zobrazených ve schématech a grafech. Vstupní údaje a výsledky výpočtu včetně schémat a grafů je možné exportovat do PDF, jako přehledný protokol o návrhu a posouzení piloty či mikropiloty. [3]

### 3 TECHNOLOGIE ZHOTOVENÍ ANALYZOVANÝCH MIKROPILOT

V bakalářské práci je analyzováno pět mikropilot, 2 mikropiloty jsou klasické vrtané a vyztuženy ocelovými GEWI tyčemi, zbylé 3 jsou vrtány pomocí ztratné korunky technologií ISCHEBECK TITAN.

#### 3.1 VRTANÉ MIKROPILOTY VYZTUŽENÉ GEWI TYČÍ

##### 3.1.1 POPIS KONSTRUKCE GEWI MIKROPILOT

GEWI mikropiloty dostaly svůj název podle jejich vyztužovacího prvku GEWI tyče. Tyče jsou vyrobeny z betonářské oceli B500B nebo B550B a mají na sobě nalisovaný závit, ten zajišťuje lepší soudržnost s cementovou zálivkou a po dokončení piloty se na něj osazují matice s roznášecí deskou. Prvek je zamýšlen pouze pro axiální namáhání. Na GEWI tyč je připevněna manžetová injektážní hadička, díky které mohou být mikropiloty injektovány, lze je také spojovat, aby se dosáhlo delších prvků. Tyče se vyrábí ve jmenovitých průměrech 16 až 75 mm. Tyče se usazují do pažených vrtů průměrů 150 až 300 mm vyinjektovaných cementovou suspenzí. [4], [5]

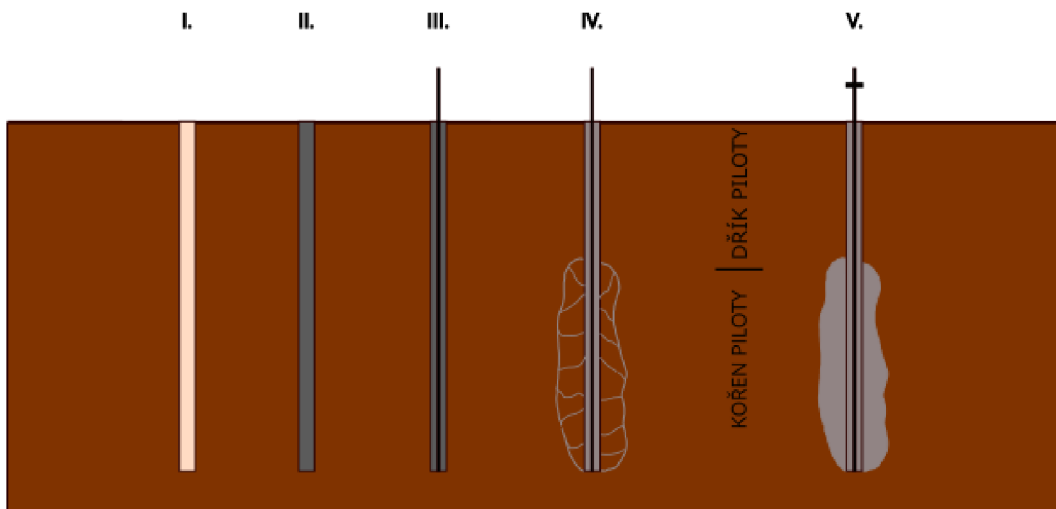


Obrázek 3.1 GEWI tyč osazena injektážní hadičkou, dostupné z: DIWIDAG micropiles, [https://www.ebsgeo.com/helical-piles/product-brochures/DYWIDAG\\_Micropiles.pdf](https://www.ebsgeo.com/helical-piles/product-brochures/DYWIDAG_Micropiles.pdf)

##### 3.1.2 PRŮBĚH ZHOTOVENÍ

Mikropiloty byly vyvrtány technologií rotačního vrtání duplex. Ve fázi I. se zhotoví vrt, kdy je zemina rozrušována vrtnou korunkou a vyplachována vodou nebo vzduchem ven z vrtu. Ve fázi II. se vrt vyplní primární cementovou zálivkou a ve fázi III. se do zálivky osadí vyztužovací ocelová GEWI tyč, na tyči je připevněna injektážní hadička a centrátoři pro zajištění centricity výztuže ve vrtu. Fáze IV. probíhá po zatuhnutí cementové zálivky, asi 24 hodin po zhotovení. V této fázi se injektuje kořenová délka mikropiloty. Injektuje se pomocí injektážní hadičky v jednotlivých etážích. Injektáží

popraská primární zálivka a dojde k rozptýlení injektážní suspenze v místě kořenové délky a vytvoření kořene, jak lze vidět ve fázi V., to má za následek výrazné navýšení únosnosti mikropiloty. [5]



Obrázek 3.2 Zhotovení vrtané mikropiloty vyztužené GEWI tyčí

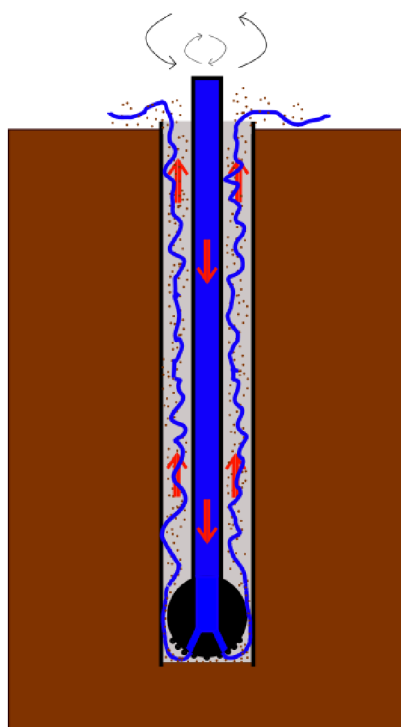
### 3.1.3 ROTAČNÍ VRTÁNÍ DUPLEX

Technologie rotačního vrtání spočívá v rozrušování zeminy pomocí rotací a přitlaku vrtné korunky. Vrtání je paženo spojovatelnými pažnicemi s roubíkovou korunkou, pažnice, stejně jako vrtné soutyčí, při zatláčení do zeminy rotují. Samotná vrtná korunka, opatřena roubíky nebo rozpojovacím křížem, má díry, do kterých je vnitřkem vrtné tyče vháněna voda nebo vzduch, které jsou zde použity jako medium pro výplach vrtu. Výplach potom prochází kolem korunky a prostorem mezi vrtným soutyčím a kolonou pažnic vynáší z vrtu rozrušenou zeminu ven. [6]

Tato metoda je velmi výkonná a dnes také nejčastěji používaná. Do pevnějších hornin ji lze použít i s přiklepem kladiva.



Obrázek 3.3 Vrtací stroj pro zhotovení mikropilot, dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/beretta-alfredo/product-59184-2225369.html>



Obrázek 3.4 Vrtací metoda rotační duplex

### 3.1.4 VÝHODY TECHNOLOGIE

- Vysoká flexibilita systému.
- Využití jak pro tlakem, tak i pro tahem namáhané mikropiloty.
- Možnost zkrácení délky výztuže kdykoliv a kdekoliv.
- Spojky neredukují únosnost systému.
- Vysoká duktilita (vhodné použití do zemětřesných oblastí).
- Možnost reinjektáže, která zvyšuje únosnost.

[5]

## 3.2 SAMOZÁVRTNÉ MIKROPILOTY ISCHEBECK TITAN

### 3.2.1 POPIS KONSTRUKCE MIKROPILOT ISCHEBECK

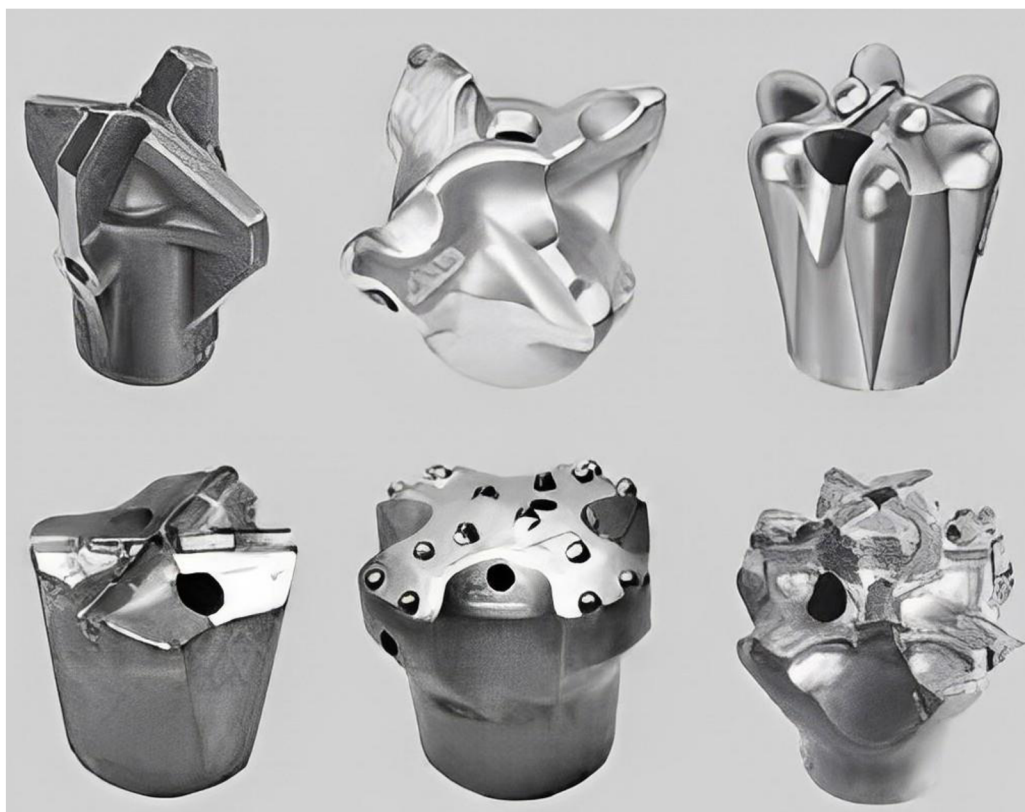
Samozávrtné mikropiloty jsou založeny na principu ztratné vrtné korunky, která je napojena na spojovaných závitových trubkách, které při vrtání plní funkci vrtného soutyčí a po dokončení instalace zůstanou v mikropilotě jako její samotná výztuž. Mikropiloty se soutyčím menších průměrů lze vrtat i ručně příklepovým vrtacím kladivem, mikropiloty větších délek a průměrů se již musí vrtat strojně, vrtacím strojem nebo bagrem opatřeným vrtacím adaptérem. [7]



Obrázek 3.5 Mikropilota Ischebeck TITAN, dostupné z: TITAN micropiles an Innovation prevails, <https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/>

### 3.2.2 VRTNÁ KORUNKA

Korunky jsou zde zamýšleny jako ztratné, to znamená, že na každou mikropilotu připadá jedna korunka, která v ní již zůstane. Korunka se vybírá podle typu vrtané zeminy. Vyrábí se křížové a roubíkové, v průměrech od 46 do 220 mm. Průměr závisí na typu korunky a průměru soutyčí. Od zvoleného průměru korunky a typu vrtané zeminy lze odhadnout, jaký bude průměr zhotoveného vrtu, který je zpravidla větší než průměr korunky, což je zapříčiněno nesoudržností zeminy, nedokonalou centricitou vrtání, a vháněním primární zálivky do vrtu pod tlakem.



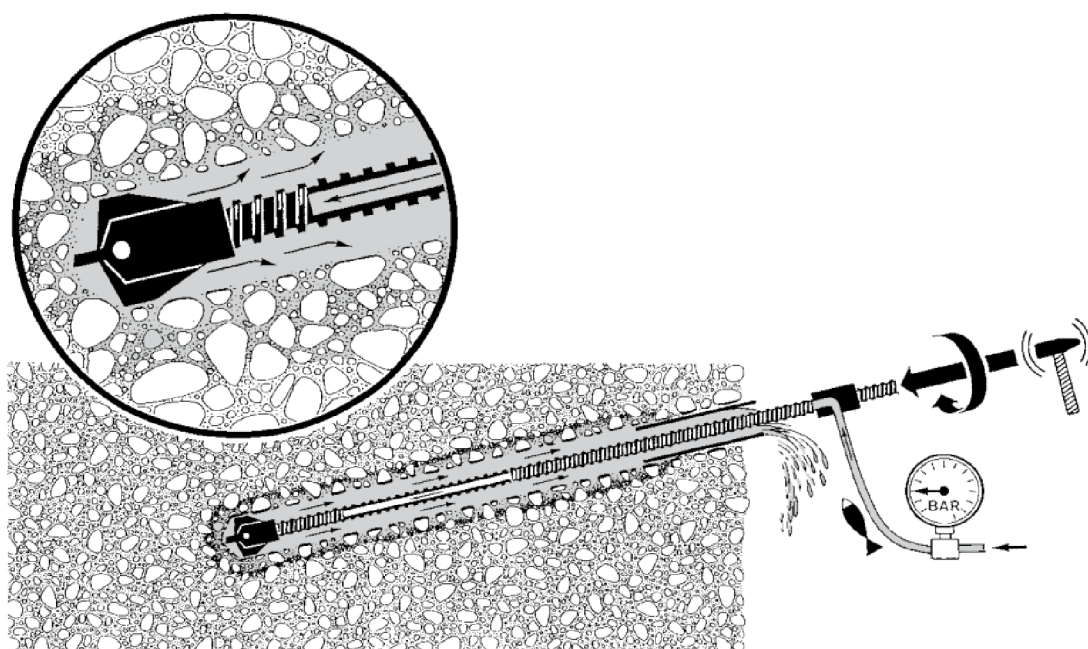
Obrázek 3.6 Ztratné vrtné korunky, dostupné z: Geotechnical systems – technical data, <https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/>

### 3.2.3 SOUTYČÍ

Vrtné soutyčí je rovněž jako korunka ztratné a po odvrtání v mikropilotě zůstane. Soutyčí bývá vyráběno v délce 3 m a lze jej prodlužovat spojkami, ty nemají negativní vliv na tuhost prvku. Po zhotovení mikropiloty, kdy plnilo funkci vrtného nástroje, funguje jako ocelová výztuž, podobně jako trubní nebo GEWI výztuž. Vyrábí se s vnitřními průměry od 16 do 103 mm a vnějšími od 30 do 127 mm.

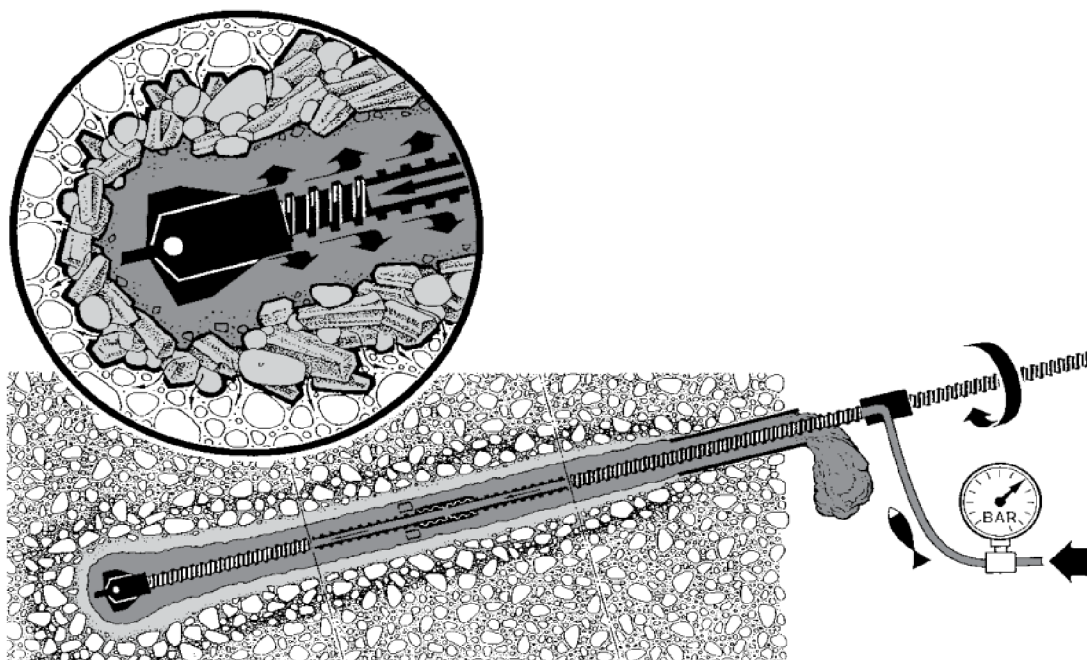
### 3.2.4 PRŮBĚH ZHOTOVENÍ

Zhotovení probíhá tak, že v I. fázi je korunka osazena na ocelové soutyčích. Ztrátná korunka má v sobě zabudovány díry, kterými vyvěrá napřed vyplachovací medium a po dokončení vrtu je dírami injektována cementová suspenze. Do korunky je výplach a suspenze přiváděna vnitřní částí soutyčích. Ve II. fázi je provedeno vrtání samotného vrtu.



Obrázek 3.7 Vrtání mikropiloty Ischebeck TITAN, dostupné z: TITAN micropiles an Innovation prevails, <https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/>

Ve III. fázi se pod tlakem přivádí do vrtu cementová suspenze, ta vyvěrá z korunky a od spodu vyplní celý vrt. Ve IV. fázi se už jen odpojí soutyčích od vrtného ústrojí a mikropilota se osadí maticemi a roznášecí deskou. Tyto mikropiloty se dále již neinjektují. [8]



Obrázek 3.8 Injektáž mikropiloty Ischebeck TITAN, dostupné z: TITAN micropiles an Innovation prevails, <https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/>

### 3.2.5 VÝHODY TECHNOLOGIE

Mikropiloty přes jejich vyšší cenu přináší řadu výhod.

- Vysoká rychlost práce.
- Mikropiloty se neinjektují, přesto dosahují významných únosností.
- Není zapotřebí dalších vrtacích nástrojů.
- Vrt není pažen, dochází tak ke zvýšení plášťového tření až o 20 %.

[7]



## 4 POSLOUPNOST ANALÝZ – POUŽITÉ MODELY ÚNOSNOSTI

Analýza mikropilot byla provedena v programu PMpLTO. Ač byly injektované vrтанé GEWI mikropiloty zhotoveny v homogenní zemině, musel být jejich injektáž zohledněna rozdělením zeminy (geologického profilu) na dvě části. Rozdělení zemin bylo zvoleno v pomezí dřívku a kořene mikropiloty. Pro dřík nebyly parametry zeminy nijak upravovány a v každém případě byla použita varianta výpočtu 1M. Pro kořenovou délku (druhá vrstva geologického profilu) byly parametry zeminy vhodně navýšeny, aby tak došlo k simulaci kořene mikropiloty. Dále byly pro kořenovou délku vyzkoušeny tři varianty výpočtu 0M, 2A, 3M. U samozávrtných mikropilot Ischebeck TITAN byl profil rozdělen buď na 2 nebo na 6 vrstev zeminy, a to podle rozdílných podmínek pro jednotlivé mikropiloty. Pro kvartérní jílovitou hlínu byla zvolena konstantně metoda 1M a pro vrstvu štěrku a neogenního jílu byly následně jako u mikropilot GEWI zvoleny varianty 0M, 2A a 3M.

Písmeno za označením varianty A znamená automatický dopočet hlavní proměnné, písmeno M značí manuální zadání hlavní proměnné přímo jako vstupu. Např. u varianty 1A je zadáván úhel vnitřního tření  $\varphi_{cv}$ , u varianty 1M je zadáván přímo  $\beta_{av}$  faktor.

### 4.1 VARIANTA 0 (0M)

Ve variantě 0 je mezní plášťové tření  $q_{s,ult}$  (USF – ultimate shaft friction) uvažováno jako konstantní. Faktor  $\beta$  je následně dopočítáván zpětně dle vztahu 4-1 převedeného na vztah 4-2. Jelikož je mezní plášťové tření  $q_{s,ult}$  s hloubkou konstantní, tak hodnota faktoru  $\beta$  s hloubkou klesá. Hodnoty USF mohou být brány z doporučených hodnot pro dané zeminy z literatury. Například dle Masopust (2015) [4] anebo Mišove a Klein, Inženýrské stavby (5/1986), zde můžeme použít hodnoty plášťového tření přímo pro mikropiloty nebo lze se inspirovat i hodnotami plášťového tření horninových kotev na portálu geokotvy.cz, který používá hodnoty z disertační práce Mišove, P., Konštrukcia predpätých horninových kotiev a ich únosnosť (1984), nebo lze využít hodnoty, které doporučují autoři programu GEO5 firmy fine.cz (<https://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/plastove-treni-korene-mikropiloty-01/>)  $USF = 130 - 190 \text{ kPa}$ .

Vstupní parametry do manuálního výpočtu:  $USF$

$$q_{s,ult} = \beta \sigma'_{or} \quad 4-1$$

$$\beta = \frac{q_{s,ult}}{\sigma'_{or}} \quad 4-2$$

## 4.2 VARIANTA 1 (1M)

Ve variantě 1 je uvažován stejný  $\beta$  faktor pro každý segment piloty, který bude dále označován jako „průměrný“ faktor  $\beta_{av}$ . Lze ho zapsat ve vztahu 4-3. Předpokládá se, že zemina v kontaktu s pláštěm piloty je vlivem zhotovení porušená, a tudíž je zde relevantní použití kritického úhlu vnitřního tření. Z hlediska principů mechaniky zemin je tento přístup vhodný pro normálně konsolidované soudržné zeminy (NC), ve kterých není součinitel bočního tlaku závislý na hloubce. Vztah 4-3 lze upravit do podoby 4-4. V podmínkách ČR je ale možné tento přístup využít také pro překonsolidované soudržné zeminy terciárního stáří, nad kterými se nachází kvartérní jílovitá hlína a změna koeficientu zemního tlaku v klidu již není tak výrazná.

$$\beta_{av} = K_s \tan \delta = K_s \tan \varphi_{cv} \quad 4-3$$

$$\beta_{av} = K \tan \delta = K_0^{nc} \tan \varphi_{cv} = (1 - \sin \varphi_{cv}) \tan \varphi_{cv} \quad 4-4$$

V aplikaci je možné vložit parametr  $\beta_{av}$  přímo nebo jej automaticky odvodit na základě vztahu 4-4. [1]

Vstupní parametry do manuálního výpočtu:  $\beta_{av}$

## 4.3 VARIANTA 2 (2A)

Ve variantě 2 je zohledněna závislost součinitele bočního zemního tlaku na hloubce. Tato závislost je důležitým aspektem chování překonsolidovaných soudržných zemin. Aplikovaný přístup ve variantě 2 vznikl dalším rozpracováním obdobné metodiky doporučované např. úřadem FHWA (obdoba ŘSD). Pro koeficient  $\beta$  platí vztah 4-5. Stupeň překonsolidace OCR (overconsolidation ratio) je definován jako poměr maximálního napětí v minulosti  $\sigma'_p$  a efektivního geostatického napětí v současnosti  $\sigma'_{or}$  4-6.

$$\beta = K_s \tan \delta = K_0^{oc} \tan \varphi_{cv} = (1 - \sin \varphi_{cv}) (OCR)^{\sin \varphi_{cv}} \tan \varphi_{cv} \quad 4-5$$

$$OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{or}} \quad 4-6$$

Nevýhodou parametru OCR je jeho závislost na hloubce. Pro každý segment piloty by tedy bylo potřeba definovat samostatnou hodnotu OCR. Vztah 4-5

byl proto přeformulován do podoby s využitím parametru POP (pre-overburden pressure) – rovnice 4-7. POP je definován jako rozdíl mezi  $\sigma'_p$  a  $\sigma'_{or}$  a je tudíž konstantní s hloubkou. [1]

$$\beta = K \tan \delta = K_0^{oc} \tan \varphi_{cs} = (1 - \sin \varphi_{cv}) \left( \frac{POP}{\sigma'_{or}} - 1 \right)^{\sin \varphi_{cv}} \tan \varphi_{cv} \quad 4-7$$

$$POP = \sigma'_p - \sigma'_{or} \quad 4-8$$

Vstupní parametry do automatického výpočtu:  $\varphi_{cv}$  a  $POP$

#### 4.4 VARIANTA 3 (3M)

Ve variantách 1 a 2 se předpokládá konstantní radiální napětí v průběhu zatěžování. Při měření napětí v okolí piloty při jejím zatěžování však bylo zjištěno, že dochází k nárůstu radiálního (horizontálního) napětí v důsledku dilatantního chování zeminy ve smykové zóně. Tento efekt je znám jako zamezená/omezená dilatace (constrained dilatancy). Při zatěžování piloty (vyvolání svislého posunu  $s_s$ ) má zemina ve smykové zóně na plášti piloty tendenci zvětšit v důsledku dilatace svůj objem a dochází tak ke vzniku radiálního posunu  $u_r$ . Radiálnímu posunu ale svou tuhostí brání okolní zemina za smykovou zónou, v důsledku čeho narůstá radiální napětí působící na plášť piloty. Nárůst radiálního napětí pak vede k nárůstu mezního plášťového tření  $q_{s,ult}$ . Je zdokumentováno, že tento efekt má zásadní vliv na mezní plášťové tření jak v nesoudržných zeminách, tak v překonsolidovaných přechodových zeminách charakteru písku jílovitého, siltu a jílu písčitého.

Ve variantě 3 je tento jev zahrnut. Mezní plášťové tření lze v tomto případě popsat pomocí vztahu 4-9, kde  $\Delta\sigma'_{hl}$  je nárůst radiálního napětí (RSI – radial stress increase) v důsledku zamezené dilatace. První část vztahu 4-9 tedy představuje plášťové tření plynoucí z počátečního stavu napjatosti, druhá část pak jeho nárůst v důsledku dilatace (resp. jejího zamezení) ve smykové zóně.

$$q_{s,ult} = \beta \sigma'_{or} + \Delta\sigma'_{hl} \tan \varphi_{cv} \quad 4-9$$

$$\Delta\sigma'_{hl} = 2G \frac{u_r}{r_p} = k_n u_r \quad 4-10$$

Nárůst radiálního napětí je definován vztahem 4-10, odvozeném na základě teorie expanze válcové dutiny, kdy  $G$  je smykový modul zeminy,  $u_r$  je radiální

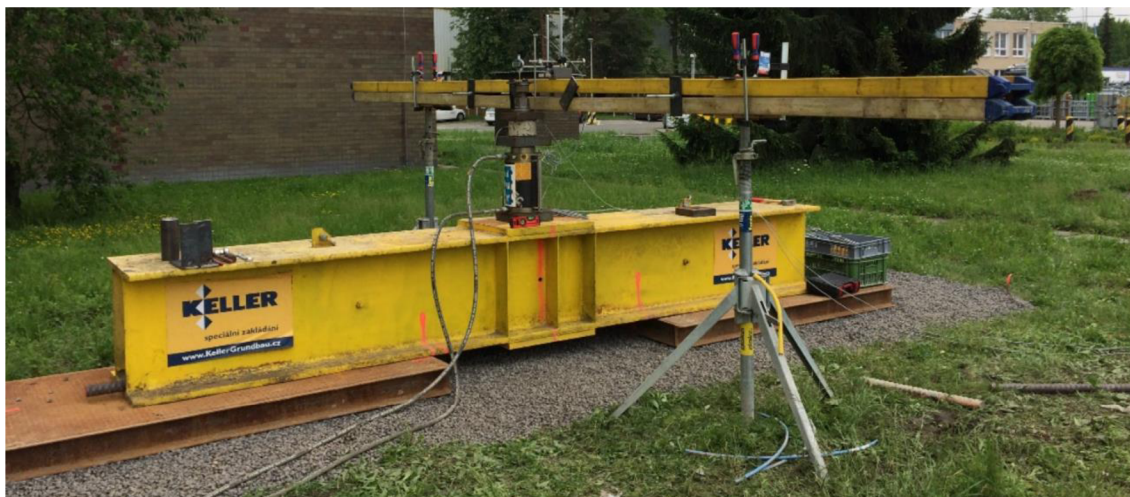
posun v důsledku dilatance ve smykové zóně a  $r_p$  je poloměr piloty. Normálová tuhost zemního prostředí  $k_n$  je tedy přímo úměrná smykovému modulu pružnosti a nepřímo úměrná průměru piloty. [1]

Ve variantě 3M, která byla následně v analýze použita se však nárůst radiálního napětí zadává manuálně, bez použití vzorce vstupů ze vztahu 4-10.

Vstupní parametry do manuálního výpočtu:  $\varphi_{cv}$  a  $RSI$

## 5 ANALYZOVANÉ ZKOUŠKY, VYHODNOCENÍ ZÁKLADNÍHO MONITORINGU

Všechny mikropiloty byly zatěžovány osově, 4 zkoušky tahové a 1 tlaková. Při tahových zkouškách byl hydraulický lis, který mikropilotu zatěžoval opřený o nosník, který přenášel reakční zatížení přímo do země.

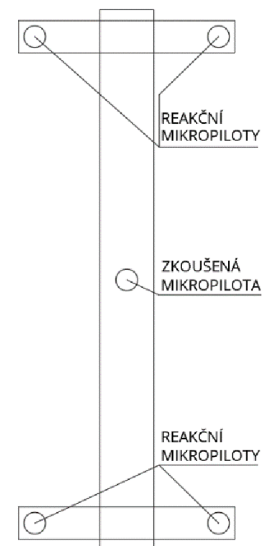


Obrázek 5.1 Tahová zkouška mikropiloty, dostupné z: Static load tests of piles and micropiles, Evaluation of monitoring results, fa Keller, VUT v Brně

V případě tlakové zkoušky mikropiloty byly reakce přenášeny přes nosník, o který byl opřen hydraulický lis, opřen o krajní nosníky a ty už přenášely reakce do reakčních mikropilot, které tedy byly zatěžovány tahem.



Obrázek 5.2 Tlaková zkouška mikropiloty, dostupné z: Technischer Bericht Pfahlprüfung, fa Keller



Obrázek 5.3 Schéma tlakové zkoušky

## 5.1 OSTRAVA

V Ostravě byly zkoušeny dvě vrtané GEWI mikropiloty, značené MP1 a MP2. Obě byly zkoušeny tahovou zkouškou. Charakteristické zatížení mikropilot bylo  $V_k = 300 \text{ kN}$ , návrhové zatížení  $V_d = 360 \text{ kN}$  a zkušební zatížení  $F_p = 550 \text{ kN}$ . Mikropiloty byly před započítím zatěžovací zkoušky předtíženy silou 30 kN (5 % zkušebního zatížení), následovalo 8 zatěžovacích kroků (90, 160, 230, 300, 360, 420, 480, 550 kN). Po zatěžovacím kroku 300 kN došlo k odtížení zpět na zatížení 30 kN, dále byly mikropiloty postupně zatíženy až na poslední zatěžovací krok 550 kN, kde došlo buď k ustálení posunů nebo porušení mikropiloty a následnému odtížení.

Tabulka 2 Posloupnost zatěžovacích stavů

	POPIS	ZATÍŽENÍ	TRVÁNÍ
1	Předtížení	30 kN	-
2	Krok 1	90 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
3	Krok 2	160 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
4	Krok 3	230 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
5	Krok 4	300 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
6	Odtížení 1	160 kN	5 min
7	Odtížení 2	30 kN	5 min
8	Krok 1	90 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
9	Krok 2	160 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
10	Krok 3	230 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
11	Krok 4	300 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
12	Krok 5	360 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
13	Krok 6	420 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
14	Krok 7	480 kN	<0,1mm/5 min nebo 15 min
15	Krok 8	550 kN	<0,1mm/10 min nebo 60 min
16	Odtížení 1	420 kN	5 min
17	Odtížení 2	300 kN	5 min
18	Odtížení 3	160 kN	5 min
19	Odtížení 4	30 kN	10 min

### 5.11 GEOLOGICKÝ PROFIL

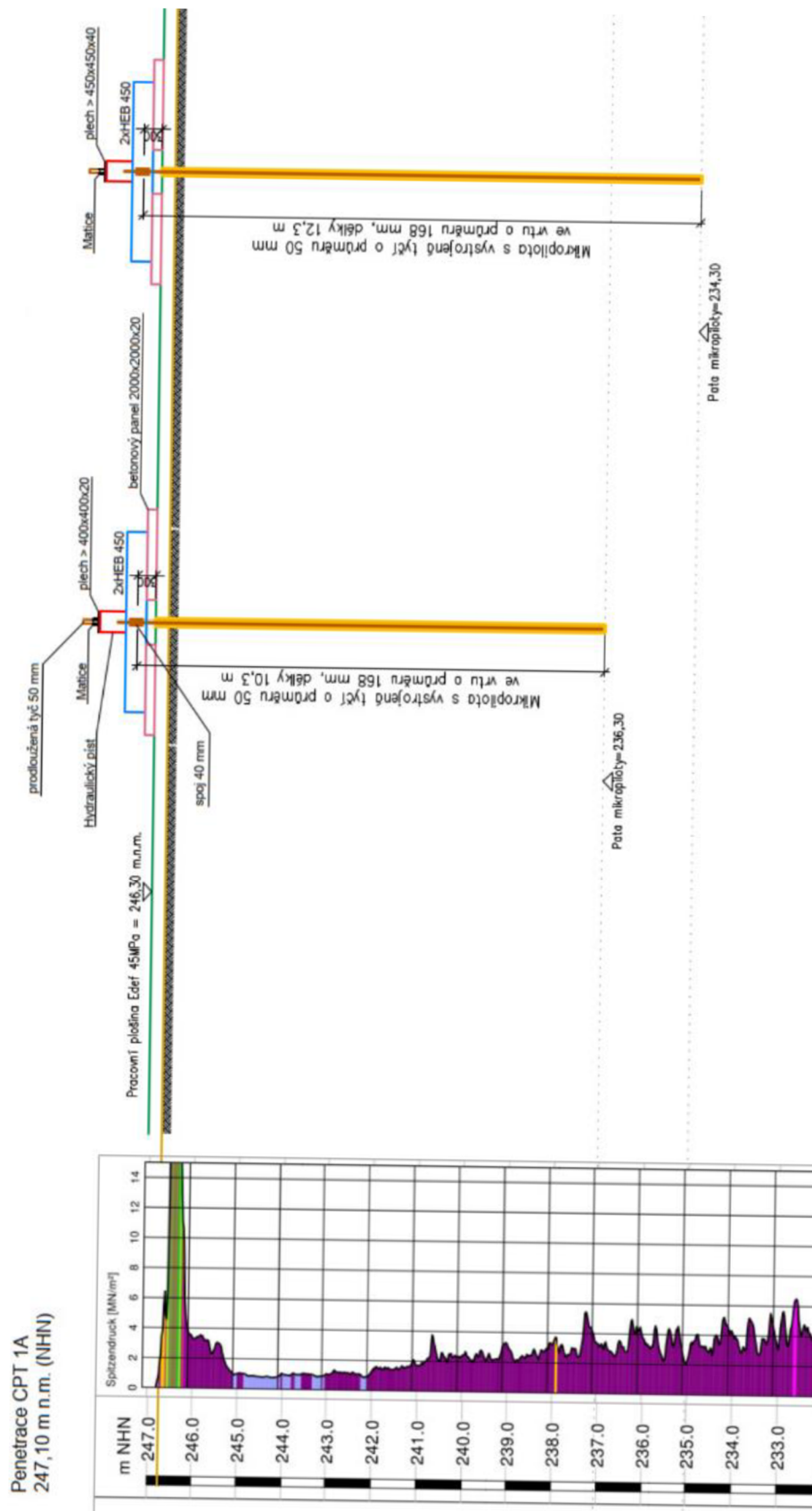
Geologický profil je shodný pro obě mikropiloty. Rovina 0,00 m je v nadmořské výšce 247,10 m n. m. První vrstva antropogenní navážky je v hloubce povrchu do 0,5 m, navazuje vrstva zeleno-hnědé kvartérní jílovité hlíny v hloubce od 0,5 do 8,0 m, poslední vrstva hnědého neogenního jílu se nachází v hloubce od 8,0 do 12,0 m, kde jsou zakončeny paty obou pilot.

Tabulka 3 Geologický profil mikropilot MP1 a MP2

HLOUBKA [m]		VRSTVA ZEMINY	KONZISTENCE	STÁŘÍ
OD	DO			
0,0	0,5	Navážka	-	Kvartér
0,5	8,0	Jílovitá hlína, zeleno-hnědá	Měkká	
8,0	12,0	Jíl, hnědý	Tuhá	Neogén

Pro oblast, kde byly zhotoveny mikropiloty, byla provedena statická penetrační zkouška CPT. Při této zkoušce se do zeminy konstantní rychlostí zatlačuje soutyčí osazené penetračním hrotem a je měřen odpor, kterého je dosaženo na hrotu. Odpor, který je z měření získán, je jakýmsi měřítkem kvality penetrované zeminy. [4]

Dle penetrační zkoušky lze vidět, že po změně prostředí z kvartérního jílu na jíl neogenní dochází k nárůstu odporu na hrotu. S nárůstem odporu by měla narůstat také kvalita zeminy a únosnost prvku, který je v ní zhotoven.



Obrázek 5.4 Výsledek statické penetrační zkoušky, dostupné z: Static load tests of piles and micropiles, Evaluation of monitoring results, fa Keller, VUT v Brně



### 5.1.2 MIKROPILOTA MP1

Mikropilota o délce 10,0 m s délkou dříku 5,0 m a kořenovou délkou 5,0 m. Kořen byl injektován ve dvou etážích, přičemž se jedna neprotrhla. Průměr vrtu je 168 mm. Vyztužení GEWI tyčí SAS 550 dn50 o délce 11,3 m. Na injektáž byl použit cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DEKTRADE.

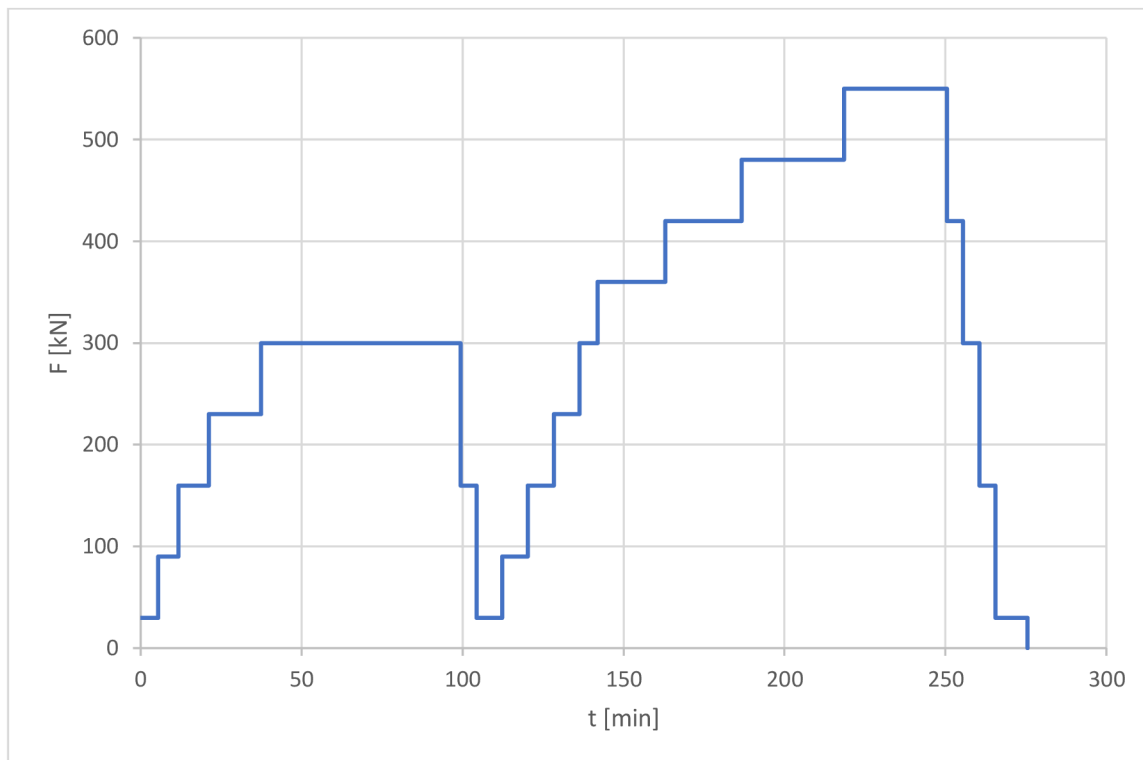
Tabulka 4 Specifikace mikropiloty MP1

MIKROPILOTA	HLOUBKA VRTU [m]	PRŮMĚR VRTU [mm]	DÉLKA TYČE [m]	DÉLKA KOŘENE [m]	DŘÍK PILOTY [m]	POČET INJEKČNÍCH ETÁŽÍ
MP1	10,0	168	11,3	5,0	5,0	2

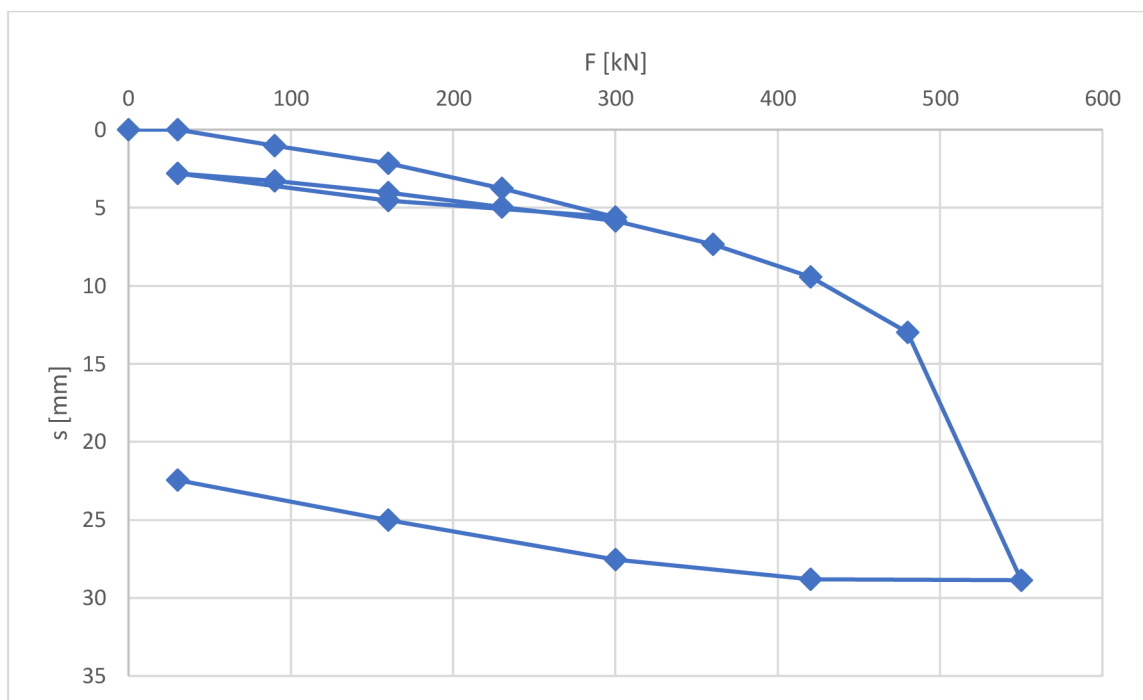
Tabulka 5 Injektáž mikropiloty MP1

ETÁŽ MP1	ČAS OD ZHOTOVENÍ [dny]	SPOTŘEBA [l]	TLAK [MPa]
1	1	20	4
2	1	NEPROTRŽENA	8

Průběh zatěžovacích kroků na mikropilotě MP1 je graficky znázorněn v Graf 1, kde  $F$  je síla v zatěžovacím kroku a  $t$  je doba trvání zatěžovacího kroku. Celá zkouška tak probíhala přibližně 4,5 hodiny.

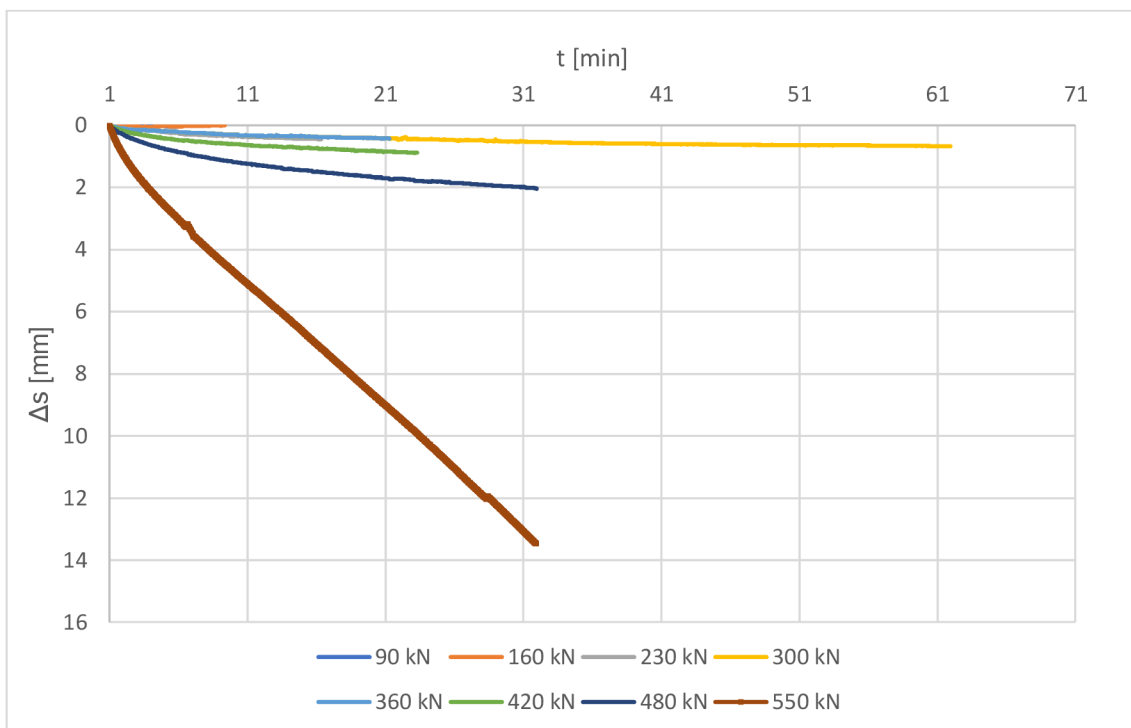


Graf 1 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě MP1, t/F



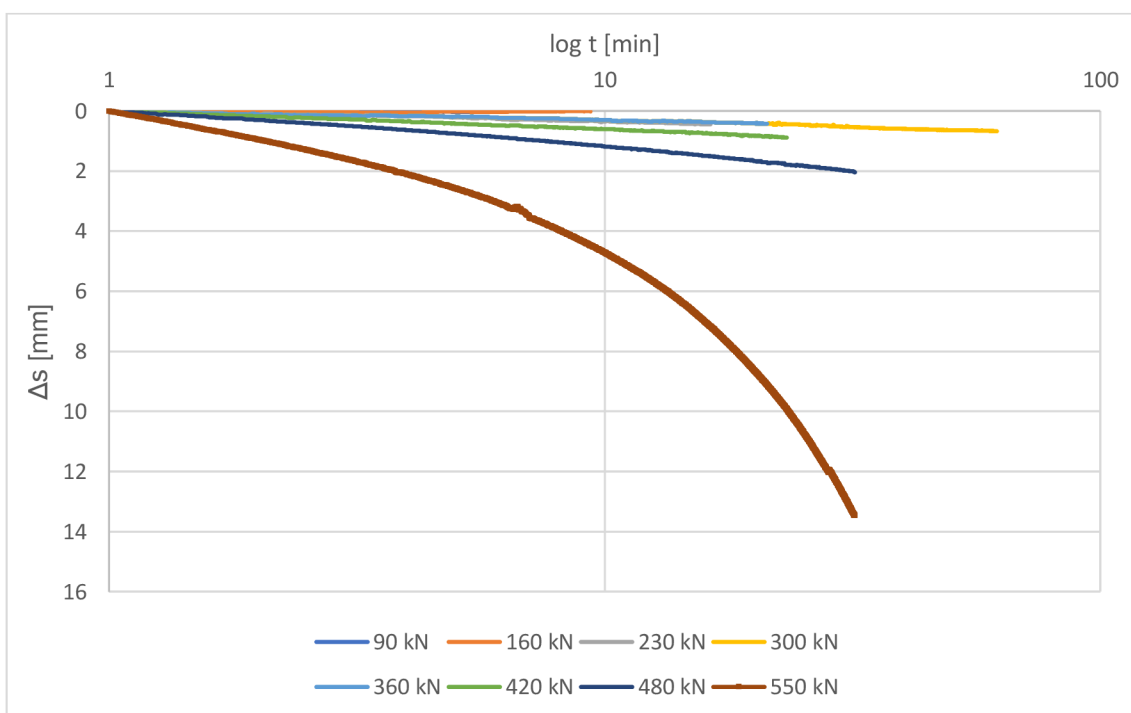
Graf 2 Zatěžovací křivka mikropiloty MP1, F/s

V Graf 2 je zatěžovací křivka získaná ze zatěžovací zkoušky i s odlehčovací větví. Závislost posunu  $s$  na daném zatížení  $F$ .



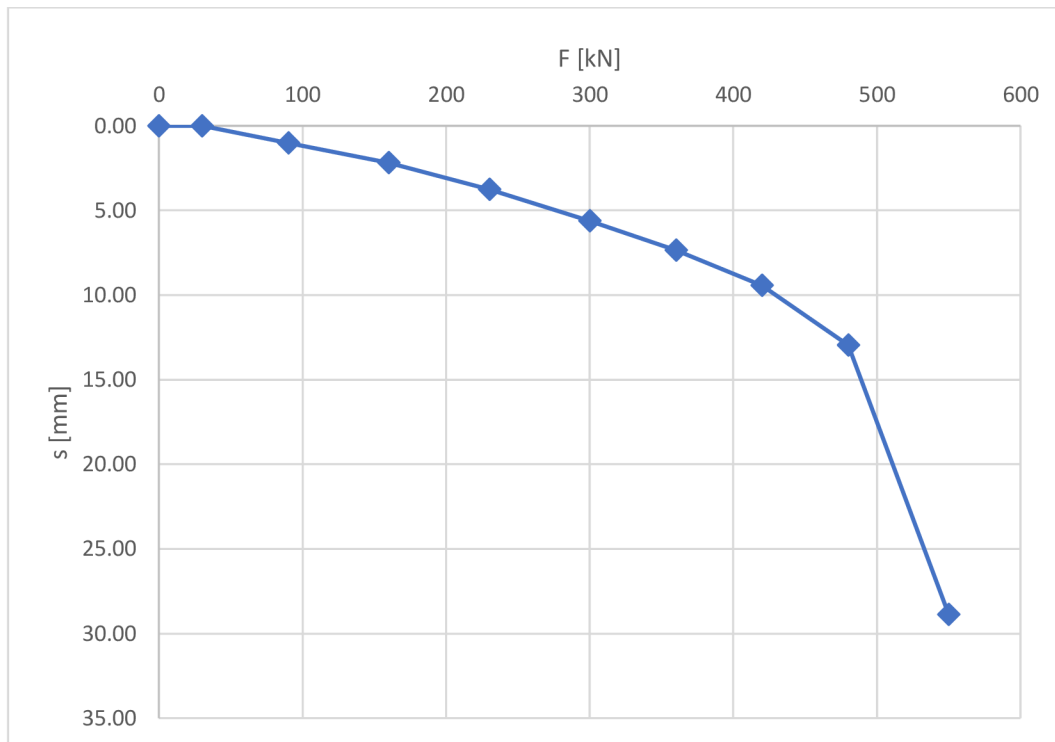
Graf 3 Přírůstek posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích mikropiloty MP1,  $t/\Delta s$

Sedání v jednotlivých zatěžovacích krocích je zobrazeno v Graf 3, kde je zobrazena závislost posunu v daném zatěžovacího kroku na čase. V Graf 4 je čas vynesena v logaritmském měřítku. V Graf 4 lze lépe sledovat ustálení posunů v zatěžovacím kroku.



Graf 4 Přírůstek posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích mikropiloty MP1,  $\log t/\Delta s$

Po odečtení finálních posunů v zatěžovacích krocích jsem sestavil naměřenou mezní zatěžovací křivku mikropiloty, která bude následně použita pro zpětnou analýzu s programem PMpLTO.

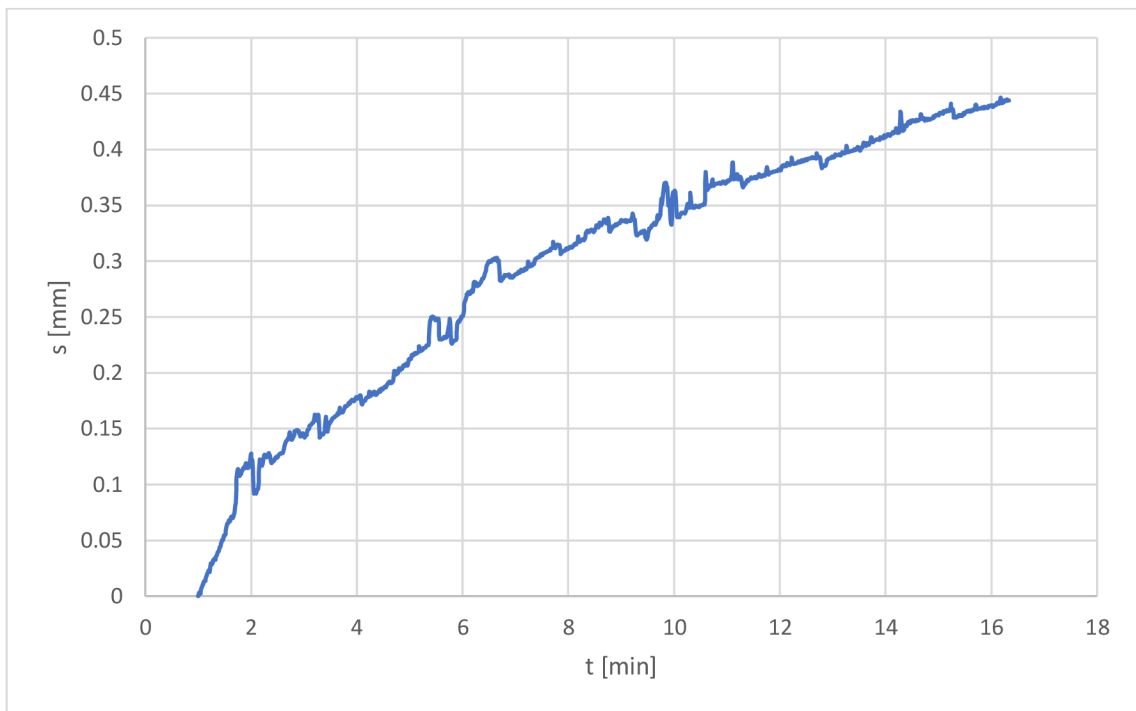


Graf 5 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP1, F/s

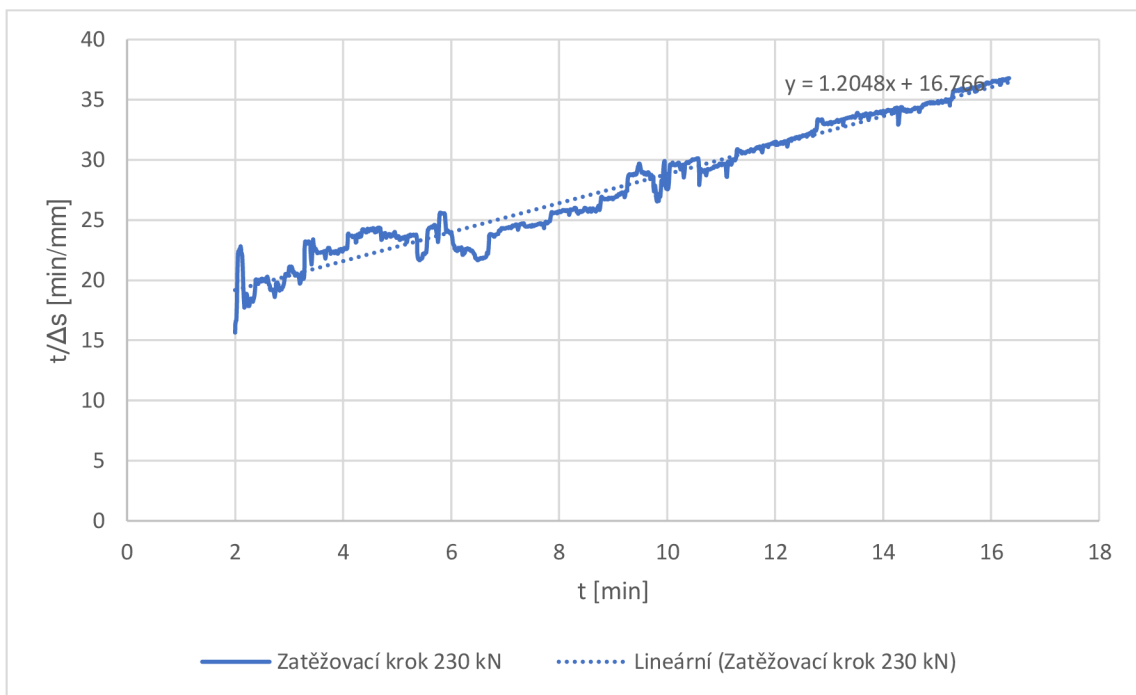
Z Graf 3 a Graf 4 můžeme usuzovat, že i přes splnění trvání zatěžovacího kroku ještě nedošlo k ideálnímu ustálení posunů. A při zatěžovacím kroku 500 kN už došlo k porušení mikropiloty, můžeme jeho finální sedání uvažovat mnohem větší, než bylo naměřeno.

U zatěžovacích kroků 230, 360, 420 a 480 kN jsem se rozhodl průběh sedání extrapolovat, aby byla doba trvání kroku minimálně 60 minut, jako je v kroku 300 kN. Za předpokladu, že závislost času  $t$  na přírůstku sedání  $\Delta s$  má hyperbolický průběh, jsem Graf 6 převedl na závislosti času  $t$  na času poděleného přírůstkem sedání  $t/\Delta s$  znázorněno v Graf 7.

Pro příklad je zde uvedena extrapolace zatěžovacího kroku 230 kN.



Graf 6 Zatěžovací krok 230 kN,  $t/\Delta s$

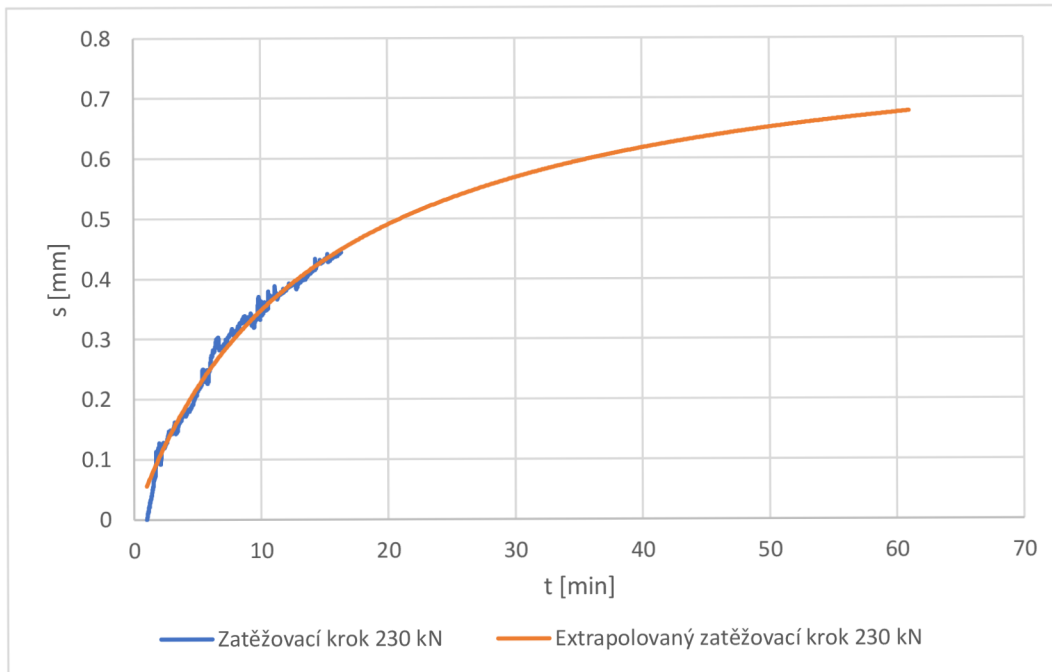


Graf 7 Zatěžovací krok 230 kN,  $t/(t/\Delta s)$

Proložením křivky lineární funkcí získáme směrnici hyperboly 5-1, která idealizuje průběh přírůstku sedání  $\Delta s$  v čase  $t$ . V tomto případě je  $a = 16,766$  a  $b = 1,205$ . S touto směrnici již můžeme hyperbolu zatěžovacího kroku extrapolovat, jak lze vidět v Graf 8.

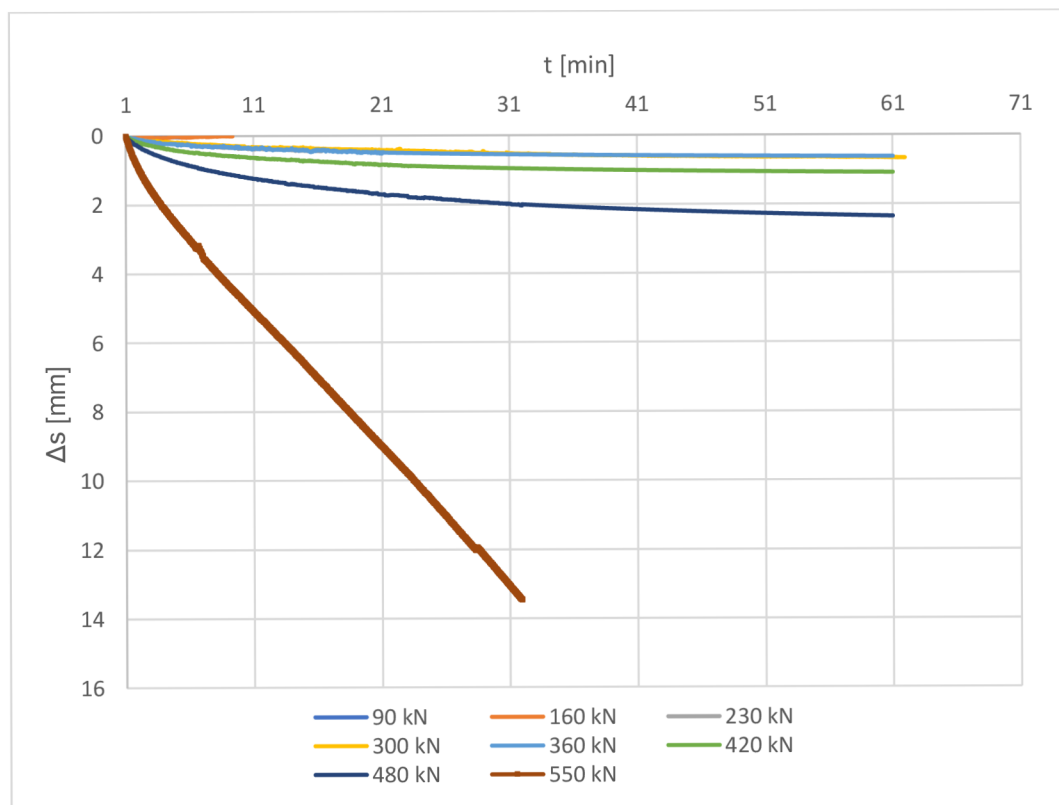
$$\Delta s = \frac{t}{a + bt}$$

5-1

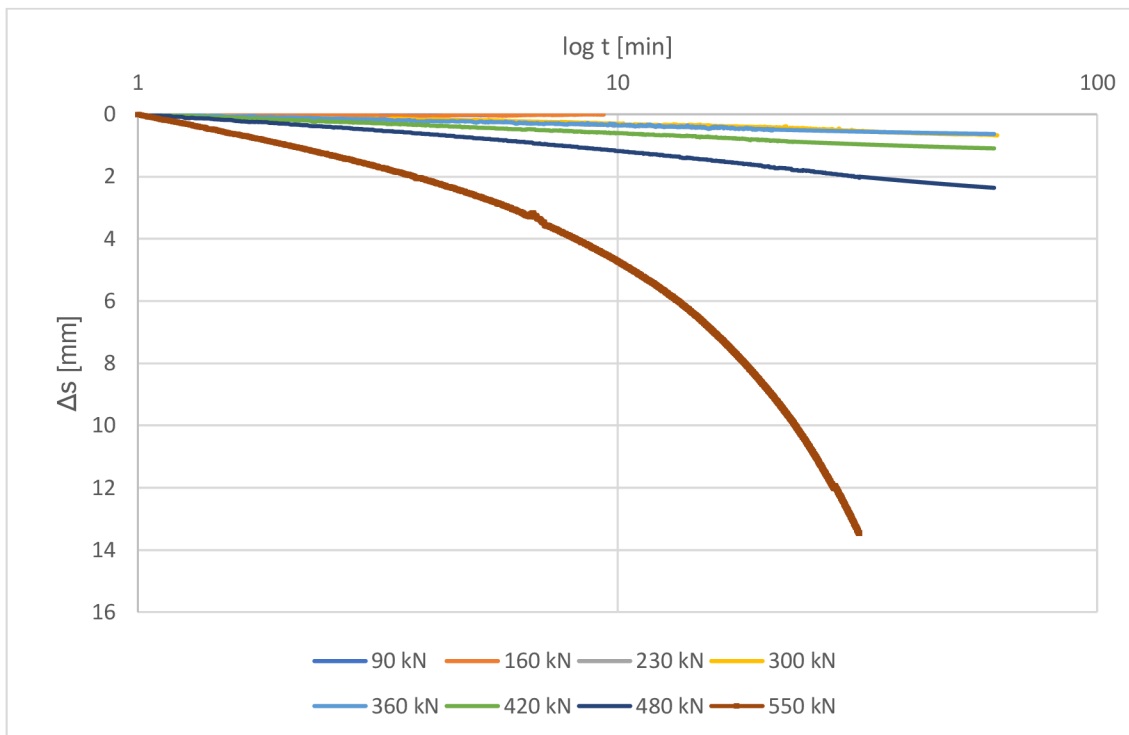


Graf 8 Extrapolovaný zatěžovací krok 230 kN,  $t/\Delta s$

Takto extrapolujeme i další zmíněné kroky.



Graf 9 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP1,  $t/\Delta s$

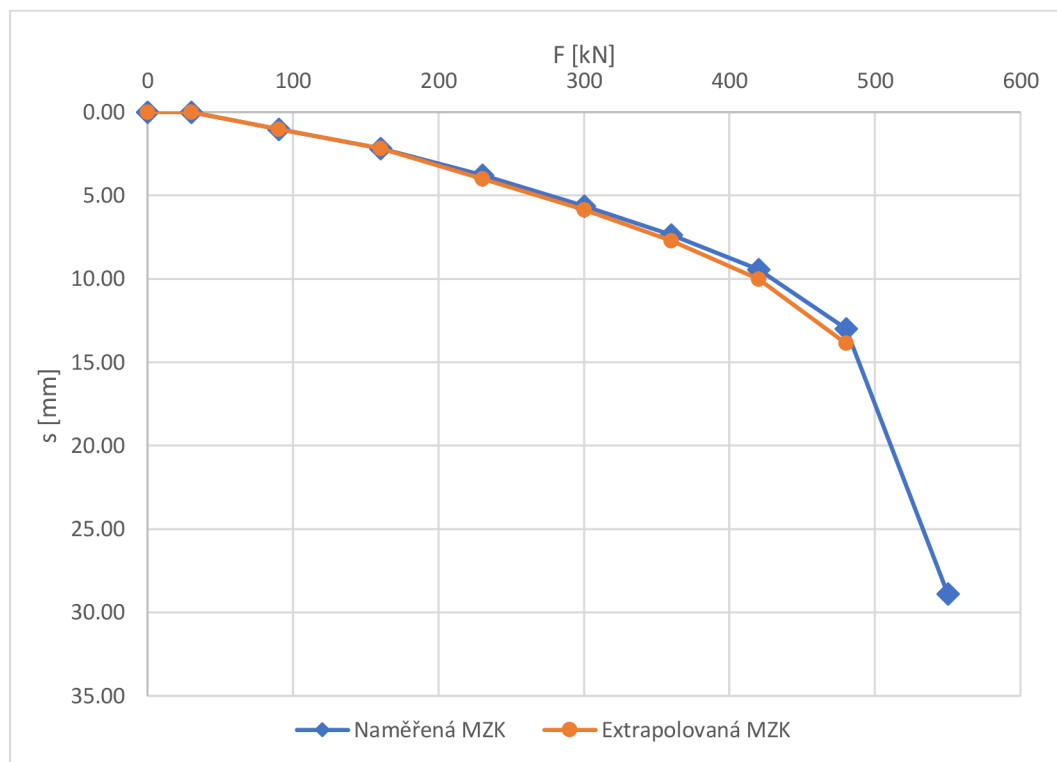


Graf 10 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP1,  $\log t/\Delta s$

Z extrapolovaných přírůstků můžeme sestavit extrapolovanou mezní zatěžovací křivku MZK. V extrapolované MZK (Graf 11) můžeme vidět, že extrapolací byl v zatěžovacím kroku 480 kN získán posun téměř o 1 mm větší než u naměřené MZK. Pokud se v posledním zatěžovacím kroku zaměříme na to, že mikropilota již dosáhla 1MS a k ustálení posunu by už ani po extrapolaci nedošlo, tak pro zpětnou analýzu můžeme poslední zatěžovací krok buď úplně vynechat anebo výrazně zvětšit jeho posun.

Tabulka 6 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP1

F [kN]	s [mm]	s <sub>extra</sub> [mm]
0	0,00	0,00
30	0,00	0,00
90	1,02	1,02
160	2,17	2,17
230	3,76	3,99
300	5,61	5,84
360	7,34	7,71
420	9,43	10,01
480	12,97	13,86
550	28,87	-



Graf 11 Extrapolovaná mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s

### 5.1.3 MIKROPILOTA MP2

Mikropilota o délce 12,0 m s délkou dříku 7,0 m a kořenovou délkou 5,0 m. Kořen byl injektován ve třech etážích, přičemž se i u této mikropiloty jedna etáž neprotrhla. Průměr vrtu je 168 mm. Vyztužení GEWI tyčí SAS 550 dn50 o délce 13,3 m. Na injektáž byl použit cement CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, DEKTRADE.

Tabulka 7 Specifikace mikropiloty MP2

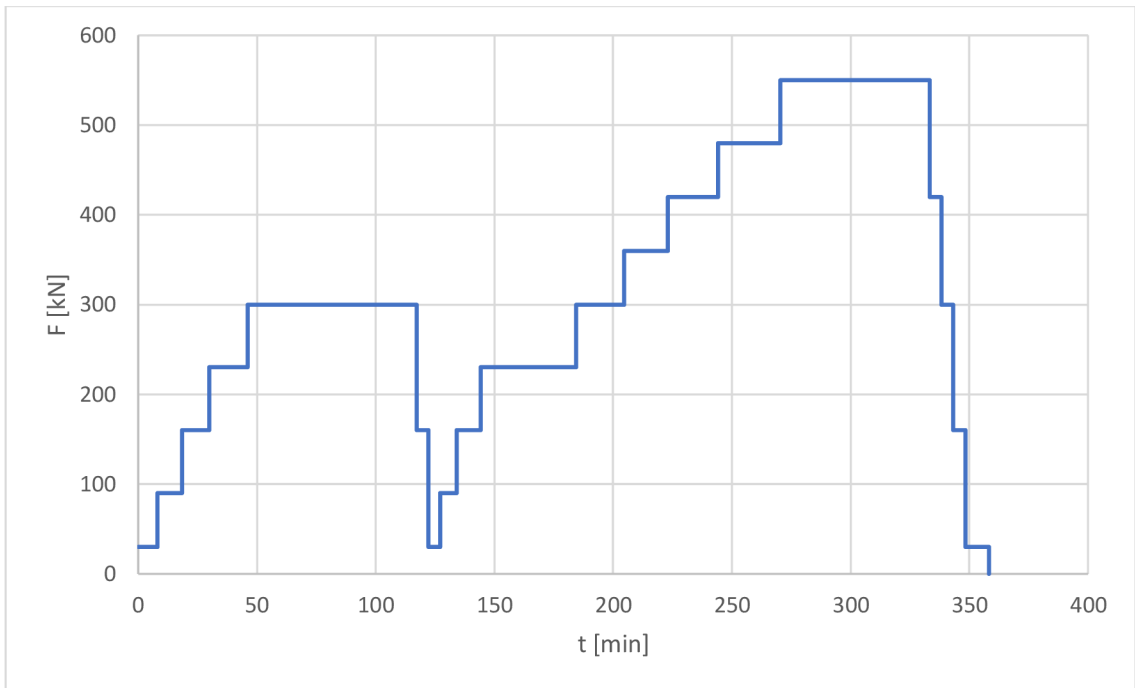
MIKROPILOTA	HLOUBKA VRTU [m]	PRŮMĚR VRTU [mm]	DÉLKA TYČE [m]	DÉLKA KOŘENE [m]	DRÍK PILOTY [m]	POČET INJEKČNÍCH ETÁŽÍ
MP2	12,0	168	13,3	7,0	5,0	3

Tabulka 8 Injektáž mikropiloty MP2

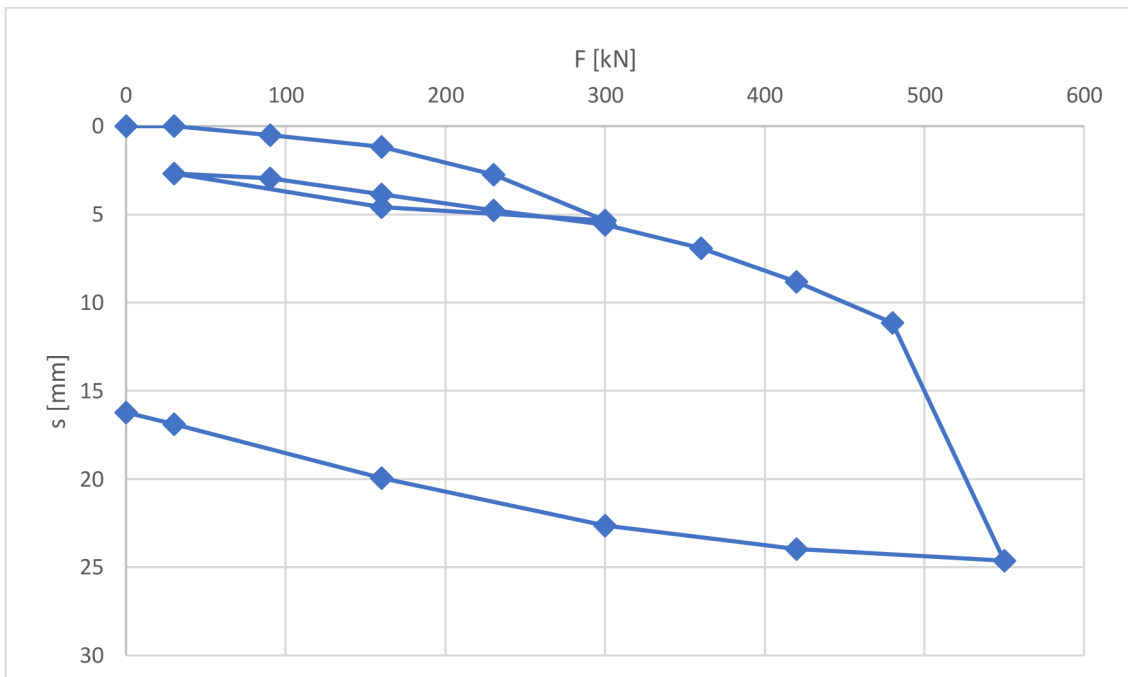
ETÁŽ MP2	ČAS OD ZHOTOVENÍ [dny]	SPOTŘEBA [l]	TLAK [MPa]
1	1	20	4
2	1	NEPROTRŽENA	8
3	1	20	4



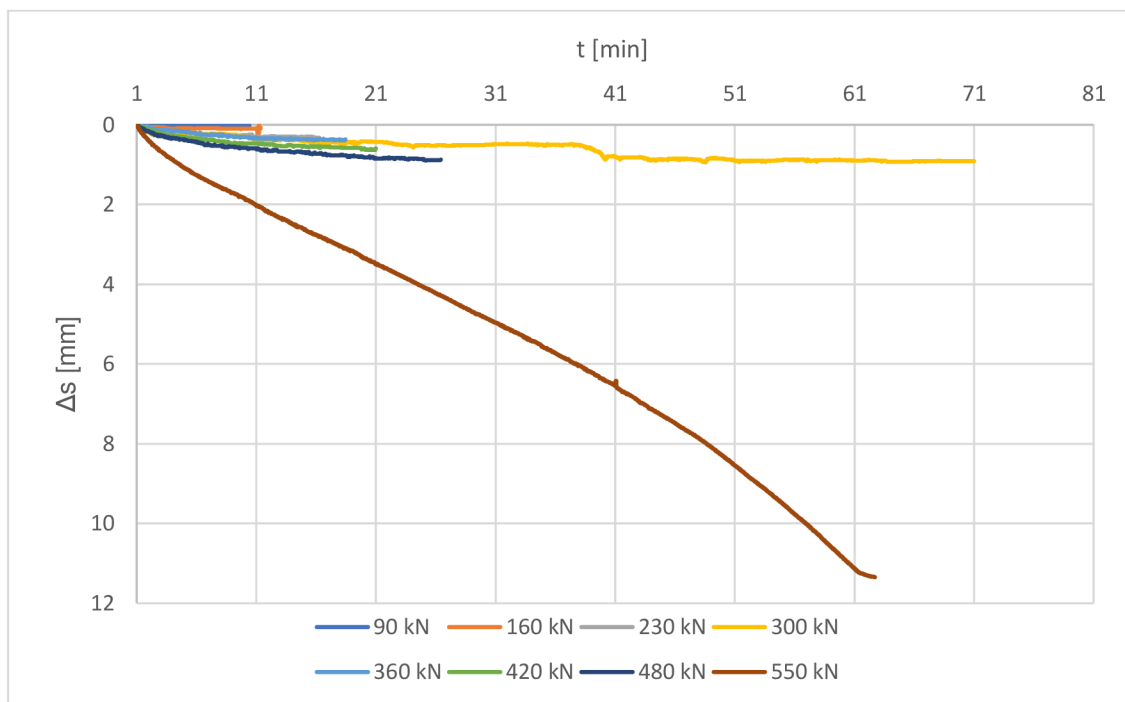
Průběh zatěžovacích kroků na mikropilotě MP1 je graficky znázorněn v Graf 12, kde  $F$  je síla v zatěžovacím kroku a  $t$  je doba trvání zatěžovacího kroku. Celá zkouška tak probíhala přibližně 6 hodin. V Graf 13 je znázorněn finální posun mikropiloty v daném zatěžovacím kroku a z toho získaná zatěžovací křivka mikropiloty i s odtěžovacími větvemi.



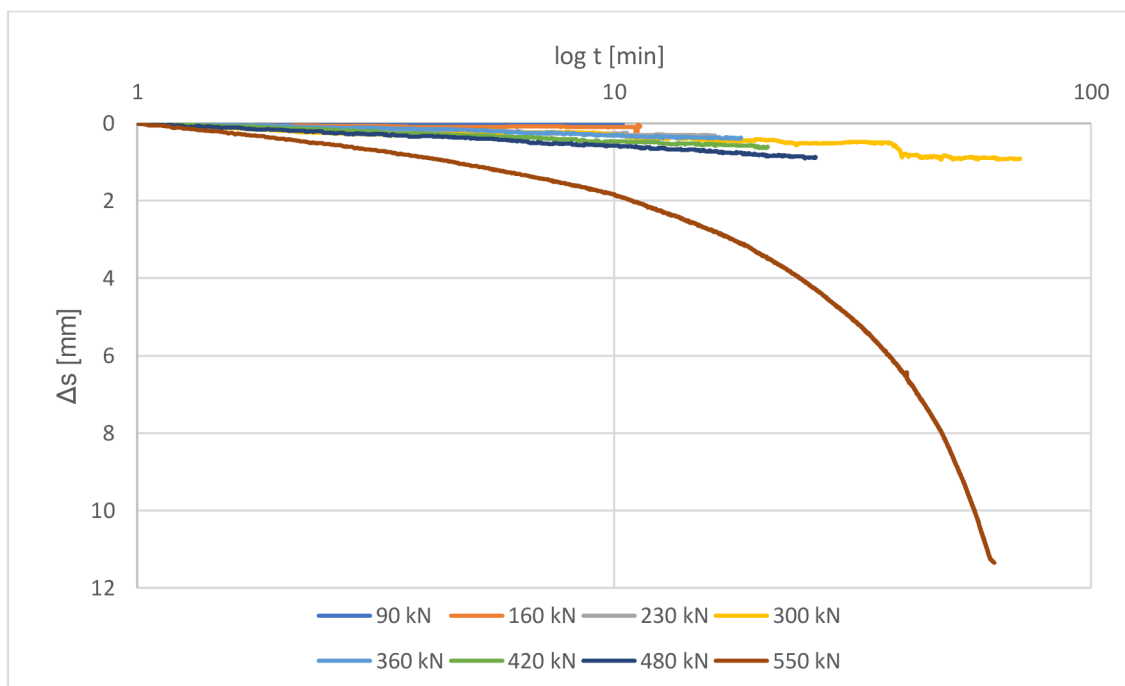
Graf 12 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě MP2, t/F



Graf 13 Zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s

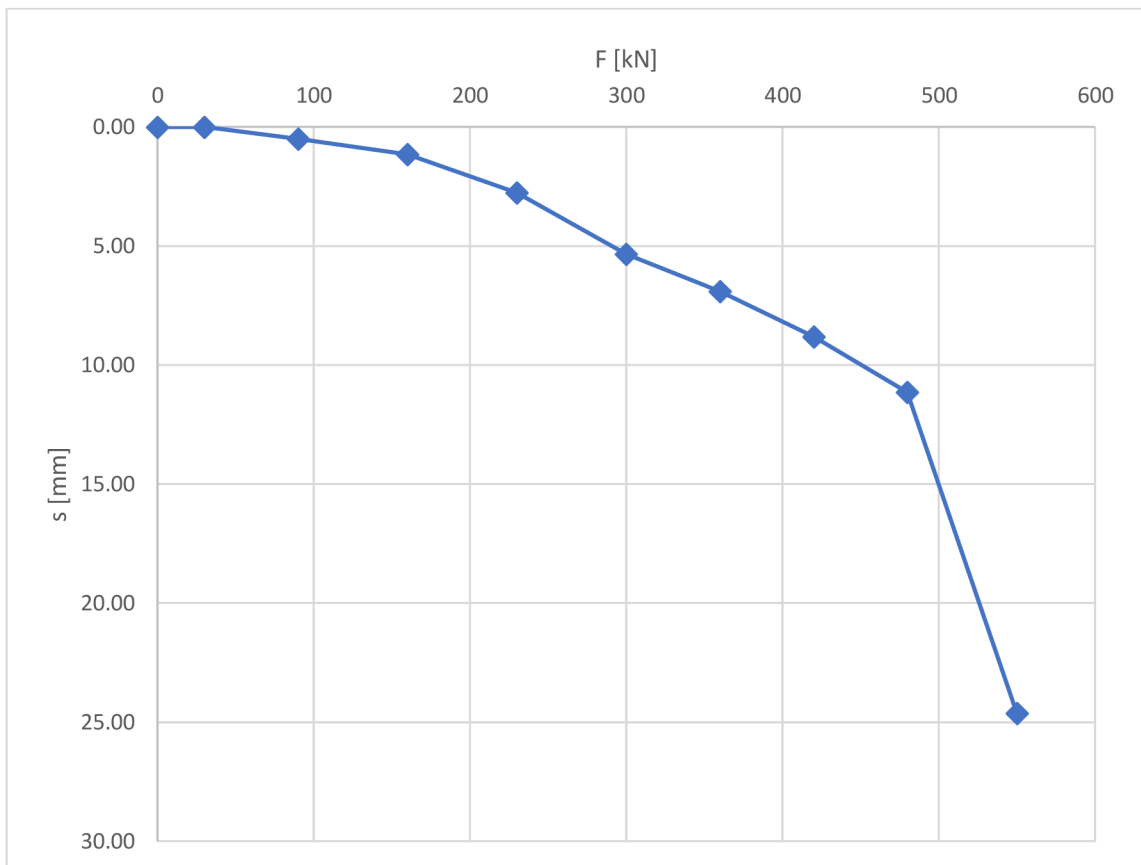


Graf 14 Přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích mikropiloty MP2,  $t/\Delta s$



Graf 15 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty MP2,  $\log t/\Delta s$

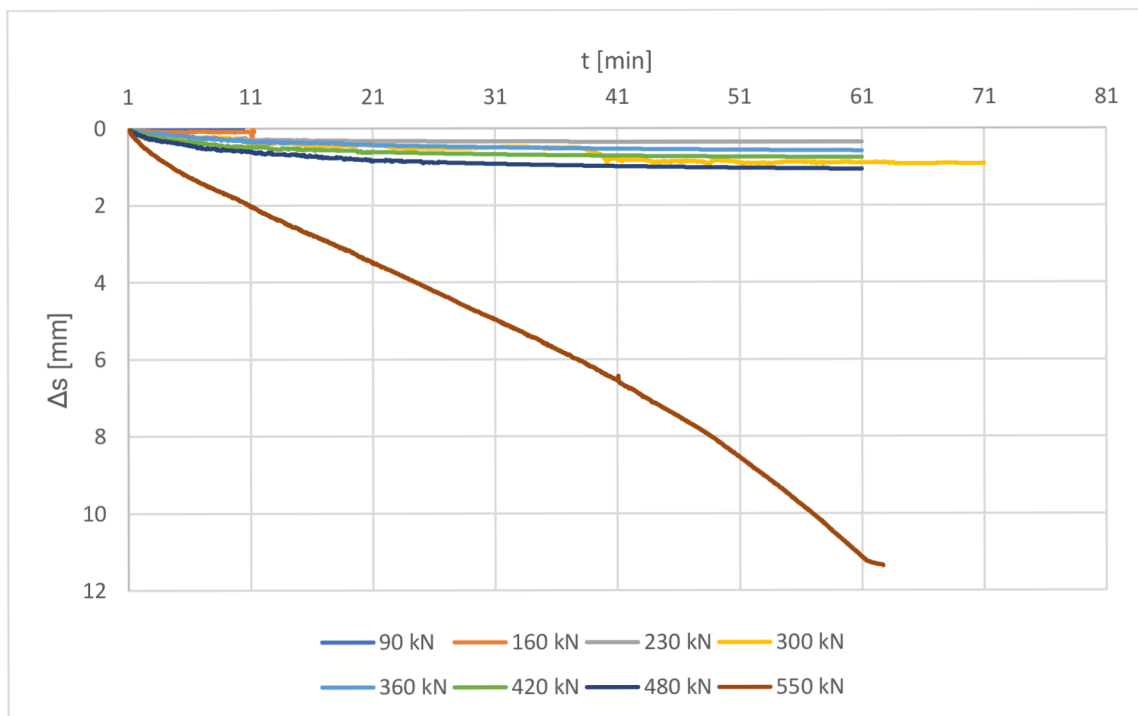
Po odečtení finálních posunů v zatěžovacích krocích jsem sestavil naměřenou mezní zatěžovací křivku mikropiloty, která bude následně použita pro zpětnou analýzu s programem PMpLTO.



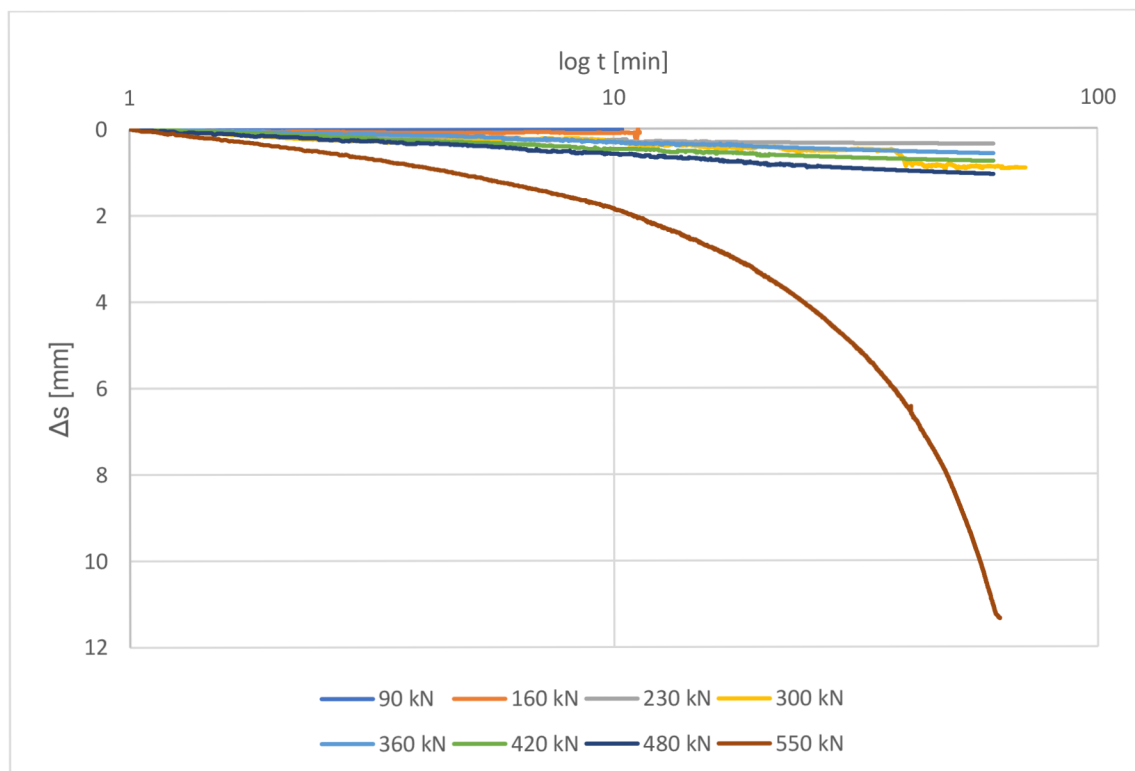
Graf 16 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s

V Graf 14 a Graf 15 je vidět průběh přírůstků posunů v každém zatěžovacím kroku mikropiloty MP2. Stejně jako u mikropiloty MP1 se i přes dodržení trvání zatěžovacích kroků přírůstky posunů ideálně neustálily. V kroku 300 kN můžeme okolo 40. minuty vidět náhlý skok posunu o 0,3 mm, což mohlo dle svědectví ze zatěžovací zkoušky být zapříčiněno povětrnostními podmínkami a mohlo tak dojít k posunu hodiněk měřících posuny mikropiloty.

Díky těmto zjištěním jsem zatěžovací kroky 230, 360, 420 a 480 kN stejně jako u mikropiloty MP1 v kapitole 5.1.2 extrapoloval, aby jejich trvání mělo stejně jako krok 300 kN minimálně 60 minut. V kroku 300 kN jsem provedl úpravu o již zmíněný skok posunu o 0,3 mm.



Graf 17 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP2,  $t/\Delta s$

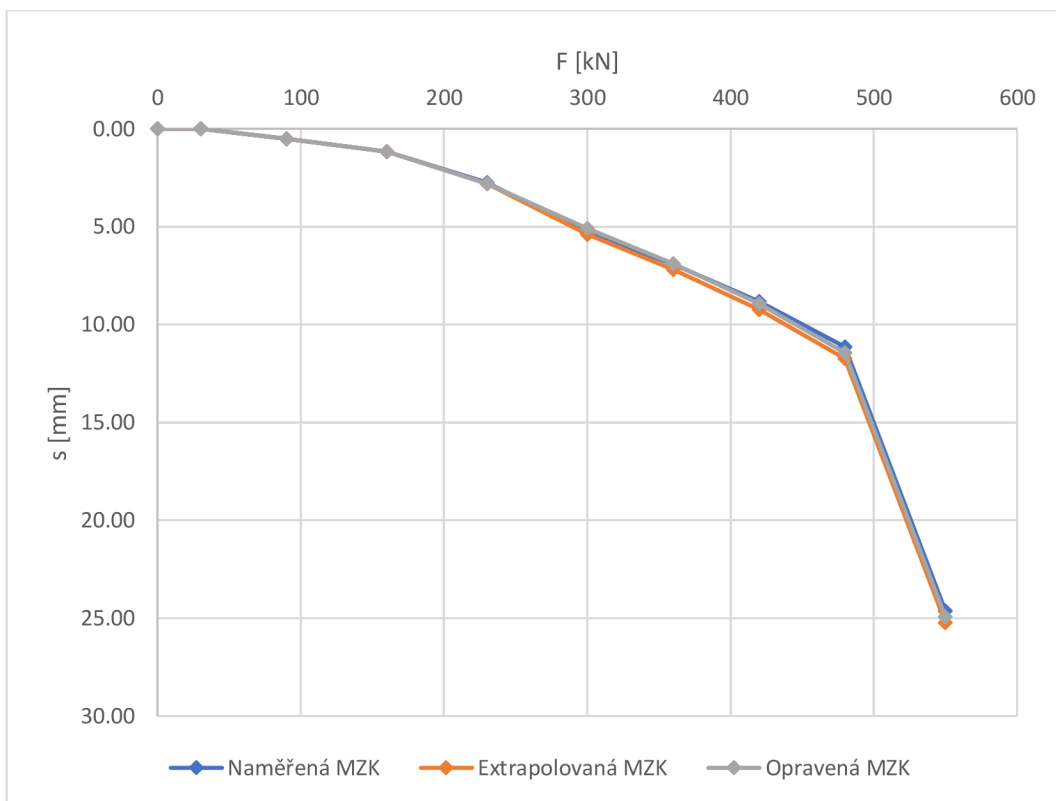


Graf 18 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP2,  $\log t/\Delta s$

Z extrapolovaných přírůstků můžeme sestavit extrapolovanou mezní zatěžovací křivku MZK mikropiloty MP2. Extrapolovaná MZK byla ještě upravena o skokový přírůstek v zatěžovacím kroku 300 kN.

Tabulka 9 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2

F [kN]	s [mm]	S <sub>extra</sub> [mm]	S <sub>extra, opraveno</sub> [mm]
0	0,00	0,00	0,00
30	0,00	0,00	0,00
90	0,51	0,51	0,51
160	1,16	1,16	1,16
230	2,76	2,80	2,80
300	5,34	5,38	5,08
360	6,92	7,18	6,88
420	8,82	9,24	8,94
480	11,15	11,75	11,45
550	24,63	25,23	24,93



Graf 19 Extrapolovaná a opravená mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s

V posledním zatěžovacím kroku bylo dodrženo jeho trvání, ale dle trendu přírůstku posunů můžeme odhadovat, že stejně jako mikropilota MP1 by u mikropiloty MP2 došlo ke kolapsu. V případě mikropiloty MP2 po extrapolaci dosahujeme rozdílu v předposledním zatěžovacím kroku 480 kN o 0,6 mm.

## 5.2 VÍDEŇ

### 5.2.1 TECHNOLOGICKÁ SPECIFIKACE

Ve Vídni byly zkoušeny tři mikropiloty Ischebeck TITAN. Dvě byly zkoušeny tahovou zkouškou, třetí byla zkušena tlakovou zkouškou.

Všechny mikropiloty byly zhotoveny v délce 13,5 m, vyztuženy ztravným soutyčím Ischebeck TITAN 73/35 mm (vnější průměr/vnitřní průměr). Vrtány byly ztravnou korunkou průměru 175 mm, která vytvořila průměr dřívku piloty 200 mm. Na injektáž byl použit cement CEM II 42,5 R. Charakteristické zatížení mikropilot bylo  $F_{c,k} = 500 \text{ kN}$  a zkušební zatížení  $P_p = 1000 \text{ kN}$ .

Tabulka 10 Specifikace mikropilot Ischebeck TITAN

MIKROPILOTA	HLOUBKA VRTU [m]	PRŮMĚR VRTU [mm]	DÉLKA TYČE [m]
IT1	13,5	200	15,0
IT2	13,5	200	15,0
IT3	13,5	200	15,0

Tabulka 11 Posloupnost zatěžovacích kroků

	POPIS	ZATÍŽENÍ	TRVÁNÍ
1	Předtížení	100 kN	30 min
2	Krok 1	200 kN	30 min
3	Krok 2	300 kN	60 min
4	Krok 3	400 kN	60 min
5	Krok 4	500 kN	120 min
6	Odtížení 1	100 kN	60 min
7	Krok 5	250 kN	60 min
8	Krok 6	500 kN	60 min
9	Krok 7	700 kN	60 min
10	Krok 8	900 kN	60 min
11	Krok 9	1000 kN	120 min
12	Krok 10, do porušení, max 1300 kN	Po 100 kN	Po 60 min

### 5.2.2 GEOLOGICKÝ PROFIL

Pro mikropiloty Ischebeck TITAN jsou dva geologické profily. Mikropiloty IT1 (tahová) a IT3 (tlaková) mají více vrstvený geologický profil. V hloubce 0,0 až

3,0 m se nachází vrstva kvartérního jílovité hlíny, následuje vrstva štěrku v hloubce 3,0 až 4,0 m, opět vrstva jílovité hlíny v hloubce 4,0 až 5,0 m, druhá vrstva štěrku v hloubce 5,0 až 5,5 m, poslední vrstva jílovité hlíny v hloubce 5,5 až 6,0 m a profil je zakončen neogenním jílem v hloubce 6,0 až 13,5 m.

Tabulka 12 Geologický profil mikropilot IT1 a IT3

HLOUBKA [m]		VRSTVA ZEMINY	STÁŘÍ
OD	DO		
0,0	3,0	Jílovitá hlína	Kvartér
3,0	4,0	Štěrka	
4,0	5,0	Jílovitá hlína	
5,0	5,5	Štěrka	
5,5	6,0	Jílovitá hlína	
6,0	13,5	Jíl	Neogén

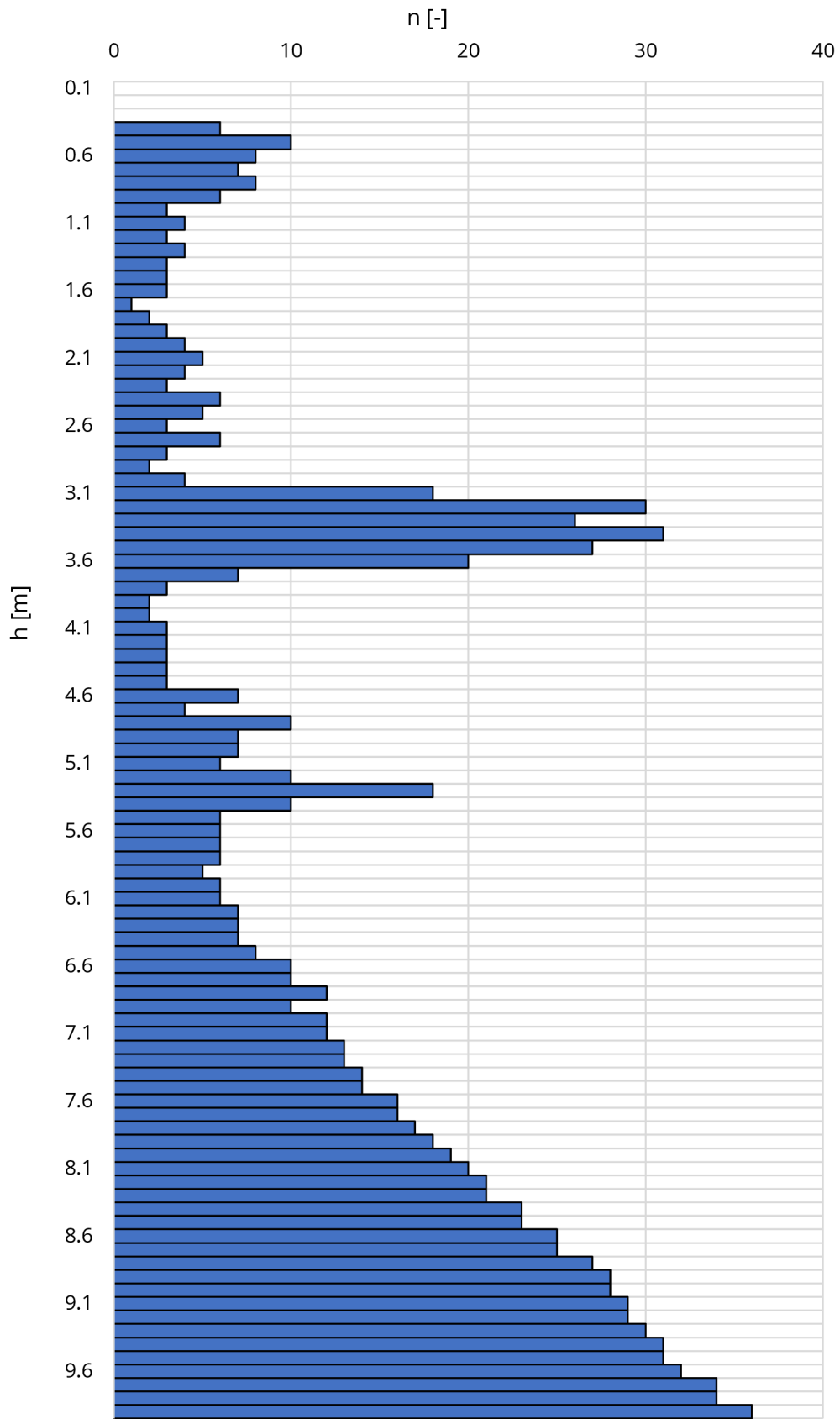
Mikropilota IT2 (tahová) má geologický profil, ve kterém nefigurují štěrkové vrstvy, zjednodušený. Kvartérní jílovitá hlína se nachází v hloubce 0,0 až 6,0 m, navazuje na něj vrstva neogenního jílu v hloubce 6,0 až 13,5 m.

Tabulka 13 Geologický profil mikropiloty IT2

HLOUBKA [m]		VRSTVA ZEMINY	STÁŘÍ
OD	DO		
0,0	6,0	Jílovitá hlína	Kvartér
6,0	13,5	Jíl	Neogén

Geologický profil byl odhadnut dle geologických poměrů ve Vídni a pomocí dynamické penetrační zkoušky DPT (Graf 20).

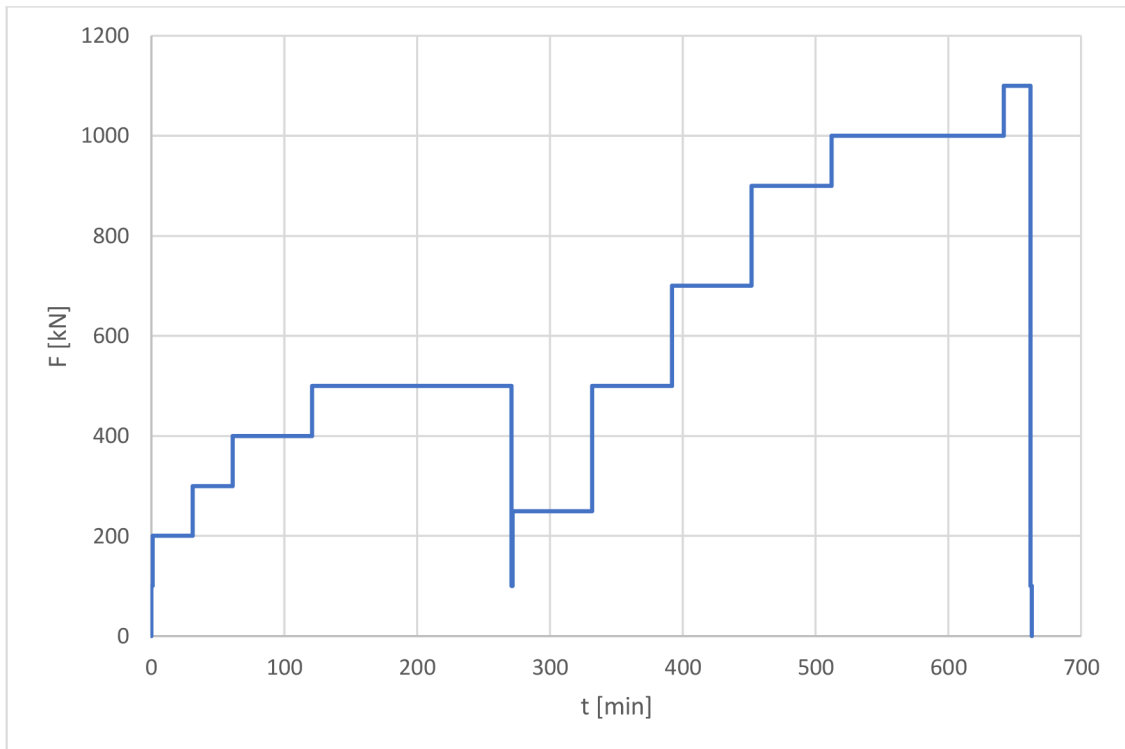
Dynamická penetrační zkouška je založena na zaznamenávání počtu rázů nutných pro zaboření hrotu penetračního soutyčí o 10 cm. Rázy byly vyvozovány závažím o hmotnosti 50 kg padajícím z výšky 1,0 m. Z počtu úderů (n) lze usuzovat některé globální vlastnosti zemin, s vyšším počtem nutných rázů můžeme usuzovat, podobně jako tomu je u statické penetrace CPT, kvalitu zeminy. Dynamická penetrační zkouška by však měla být jako doprovodná zkouška například ke statické penetrační zkoušce nebo jádrovému vrtání. Již jen upřesňuje a potvrzuje již známý geologický profil. [4]



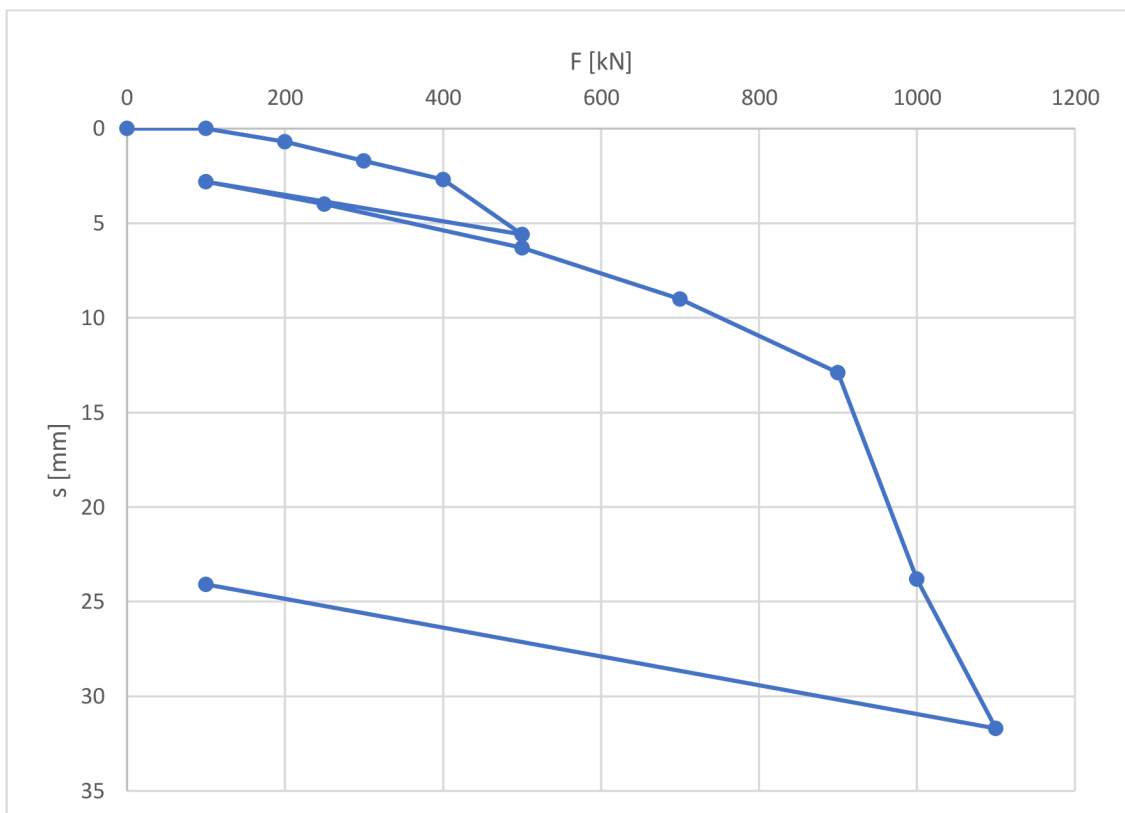
Graf 20 Záznam dynamické penetrace mikropilot Ischebeck TITAN



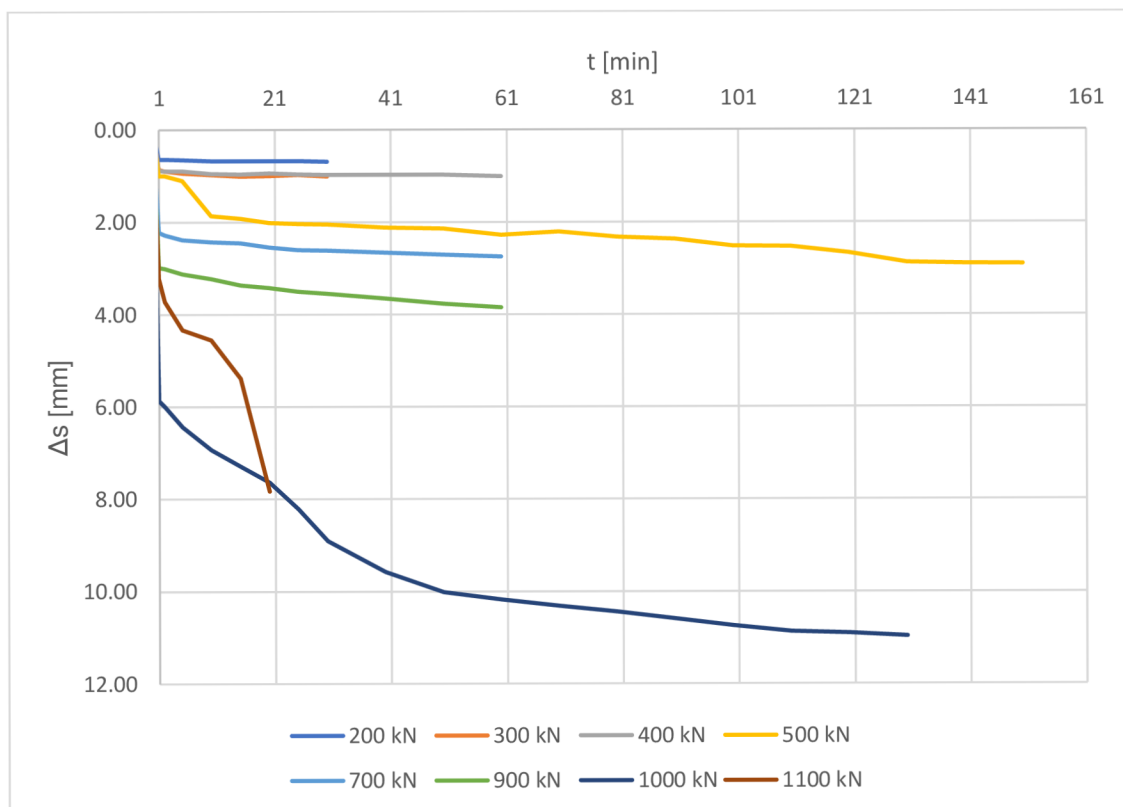
### 5.2.3 MIKROPILOTA IT1



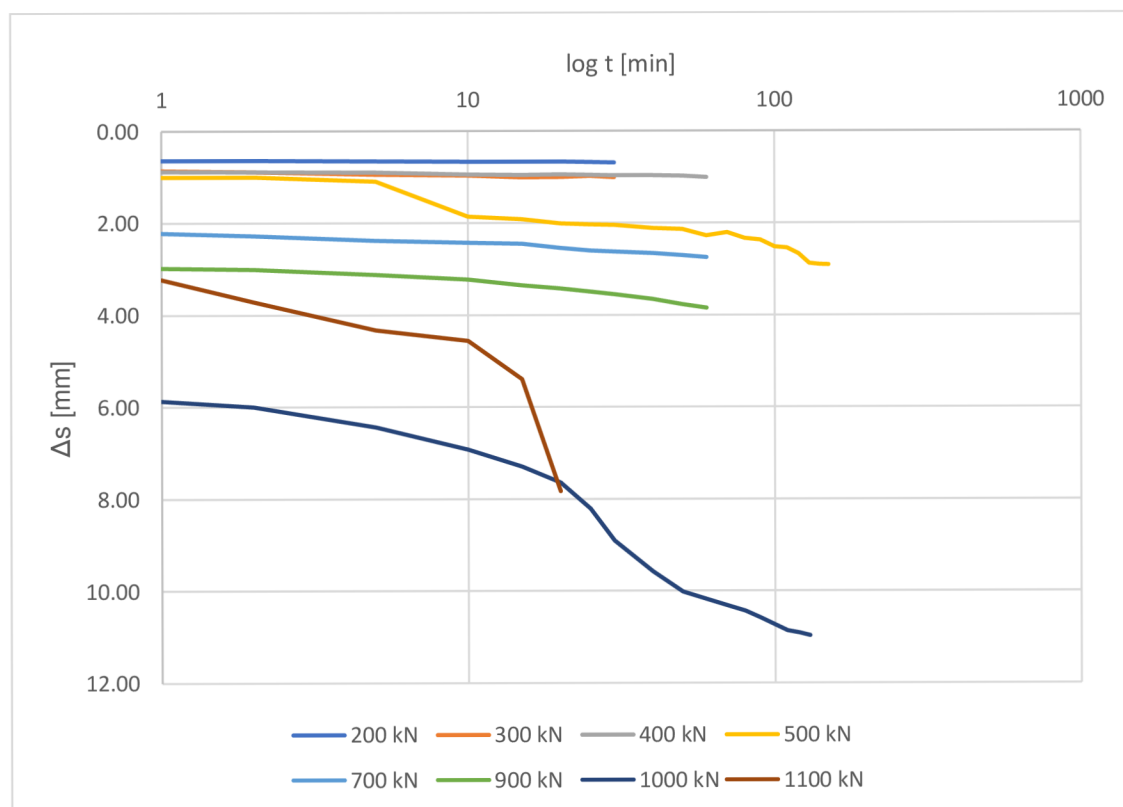
Graf 21 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě IT1, t/F



Graf 22 Zatěžovací křivka mikropiloty IT1, F/s



Graf 23 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT1,  $t/\Delta s$

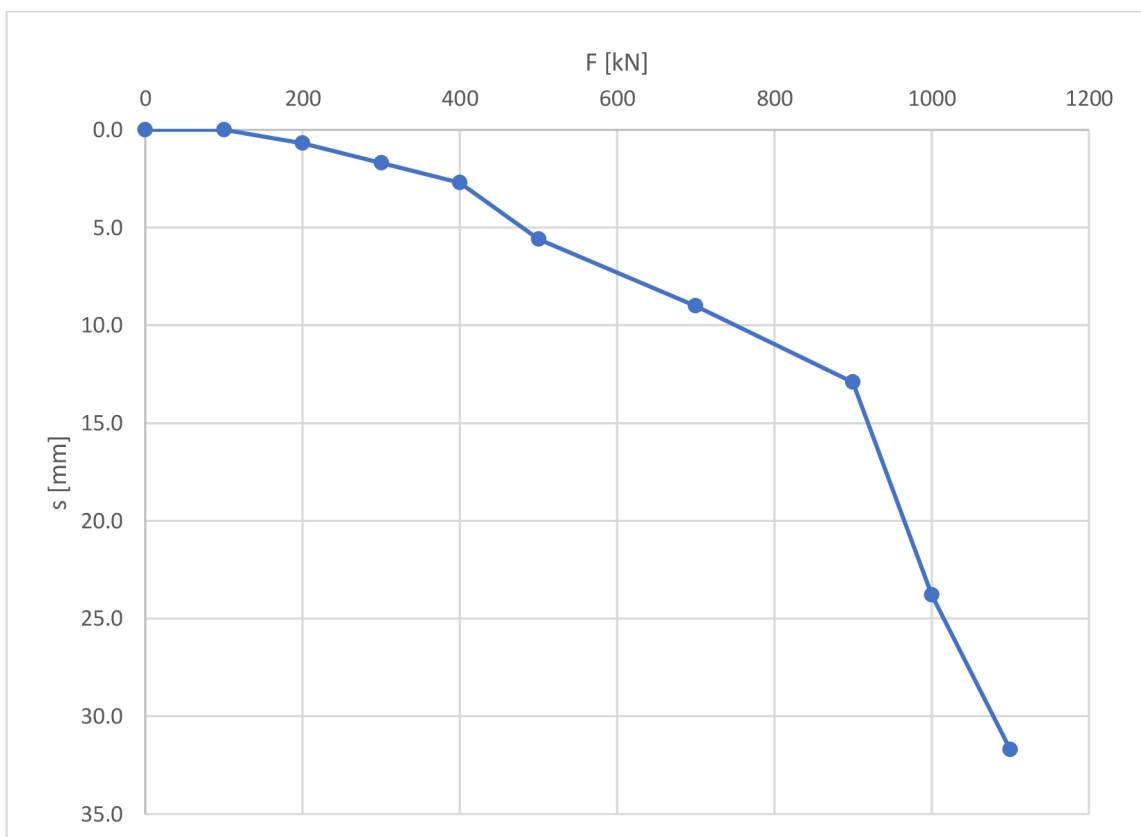


Graf 24 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT1,  $\log t/\Delta s$

Z naměřených posunů byla zkonstruována mezní zatěžovací křivka dále použitá ve zpětné analýze v programu PMpLTO.

Tabulka 14 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT1

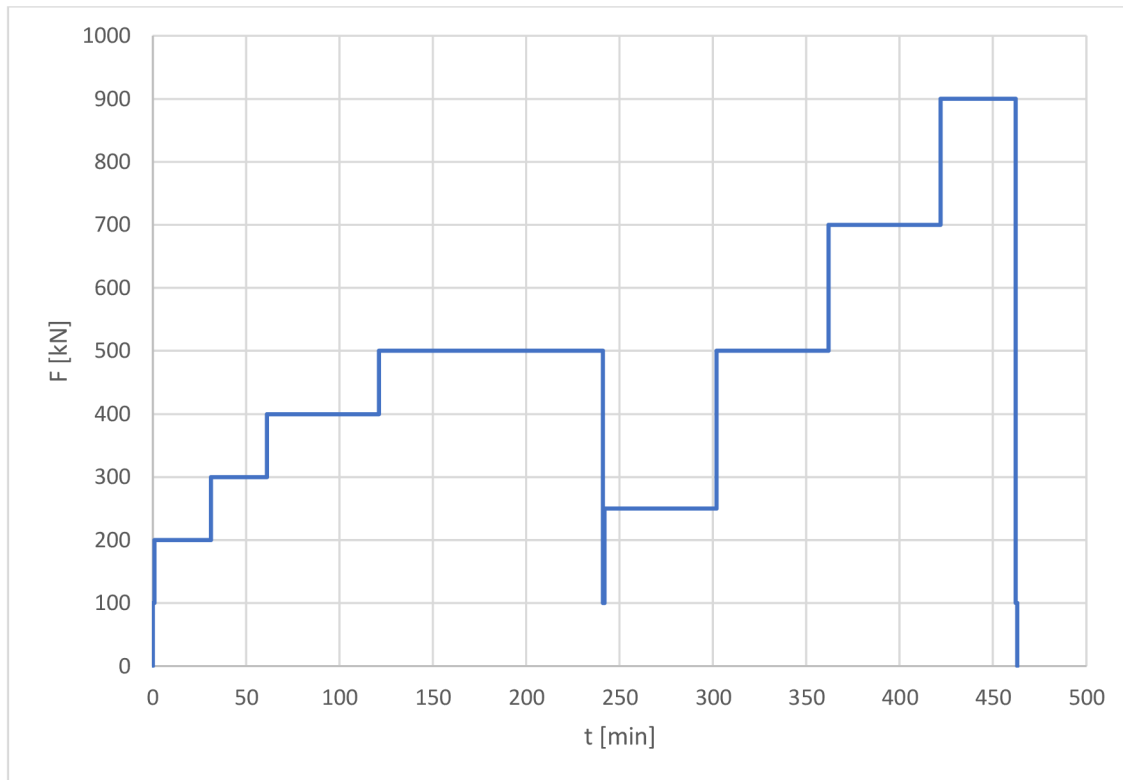
F [kN]	s [mm]
0	0,0
100	0,0
200	0,7
300	1,7
400	2,7
500	5,6
700	9,0
900	12,9
1000	23,8
1100	31,7



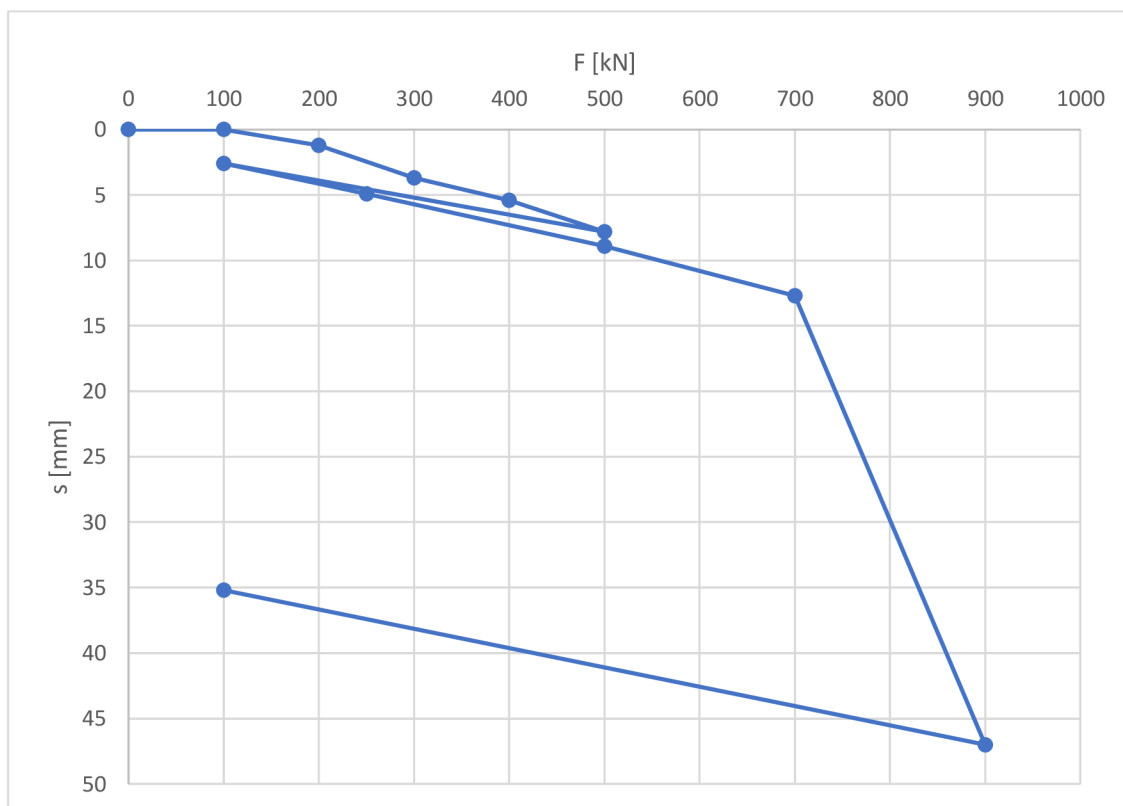
Graf 25 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT1, F/s

Mikropilota byla zatěžována tahem celkem 11 hodin. Únosnost piloty byla stanovena na 900 kN s ustáleným posunem 12,9 mm. Při následném zatěžování až na krok 1100 kN dosáhla 1MS.

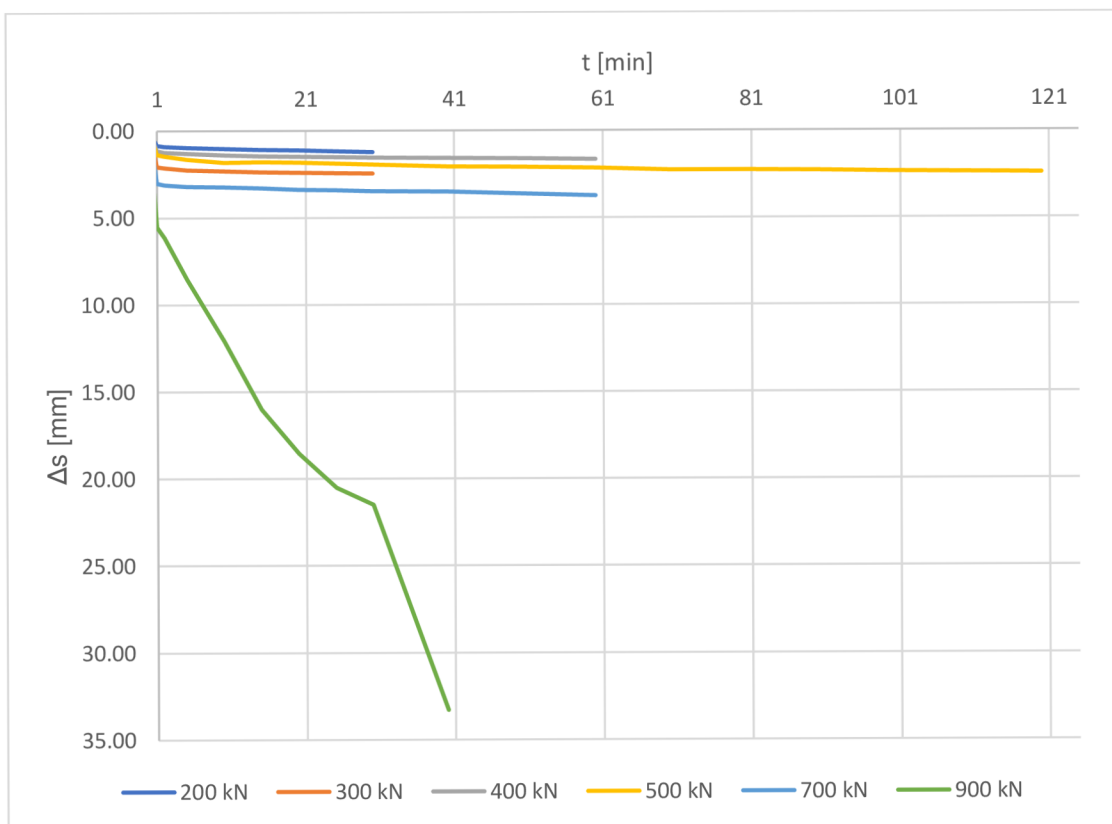
## 5.2.4 MIKROPILOTA IT2



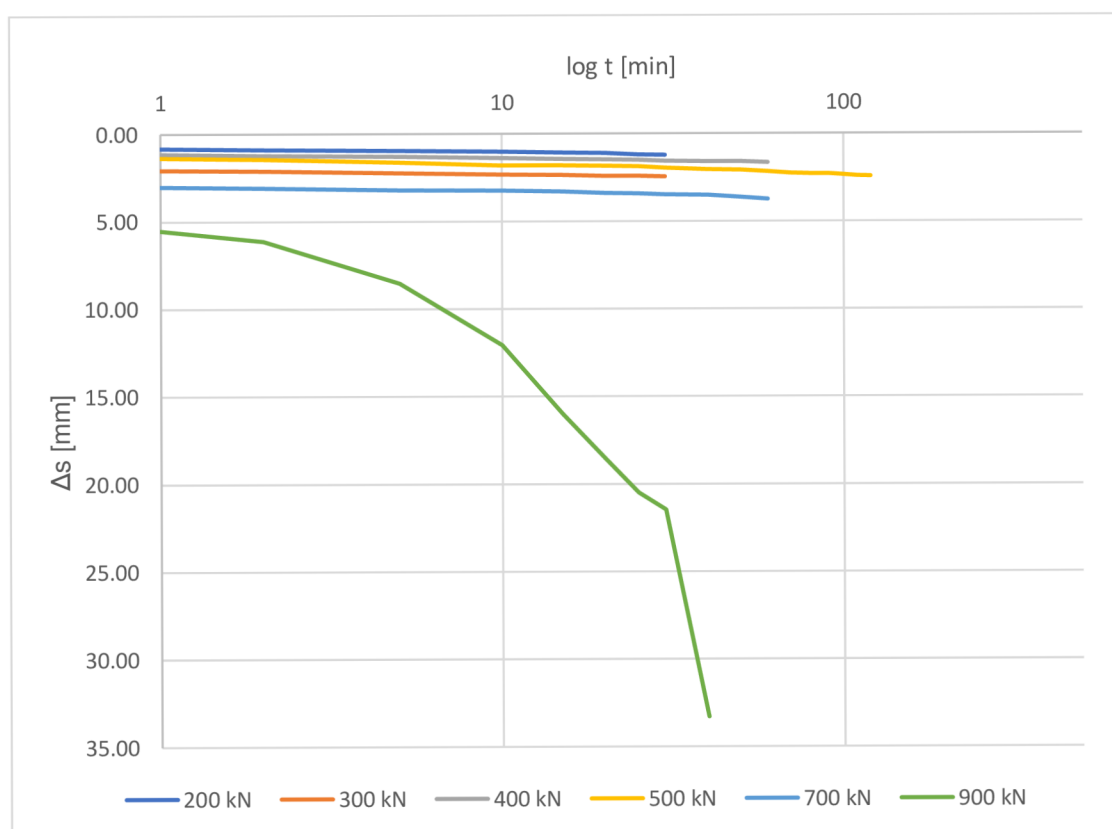
Graf 26 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě IT2, t/F



Graf 27 Zatěžovací křivka mikropiloty IT2, F/s



Graf 28 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT2,  $t/\Delta s$

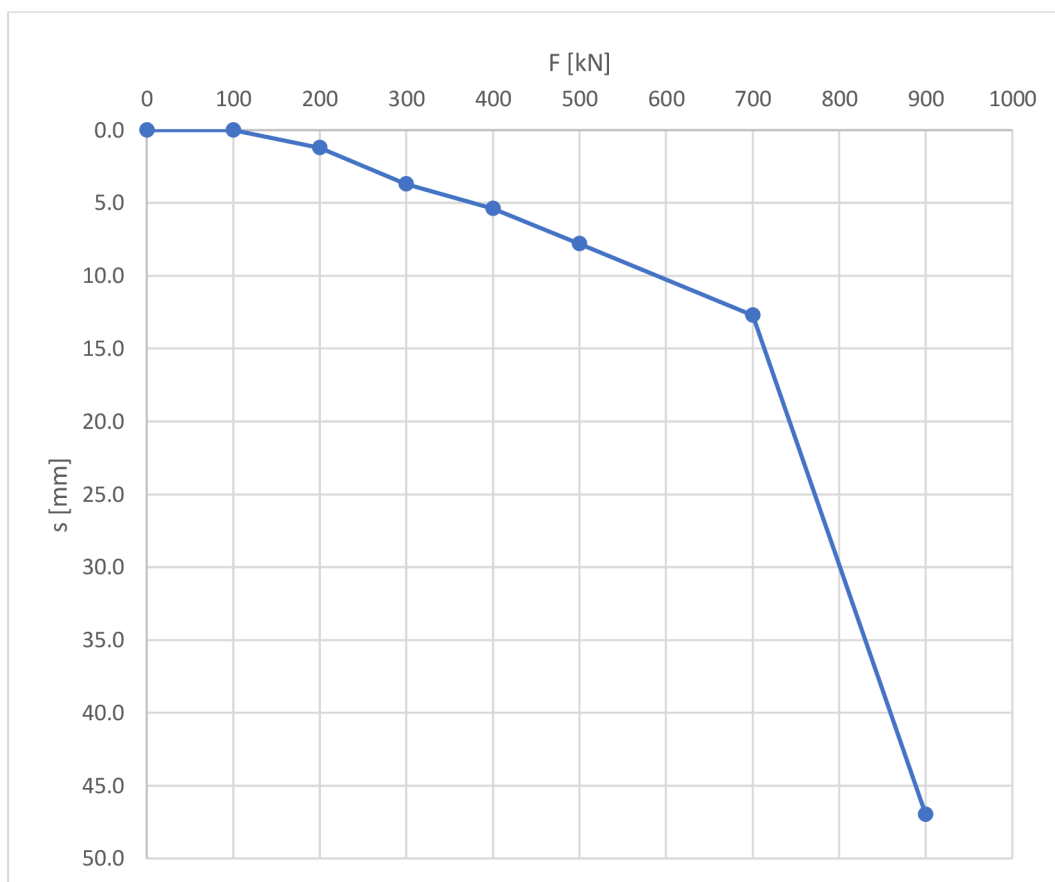


Graf 29 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT2,  $\log t/\Delta s$

Z naměřených posunů byla zkonstruována mezní zatěžovací křivka dále použitá ve zpětné analýze v programu PMpLTO.

Tabulka 15 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT2

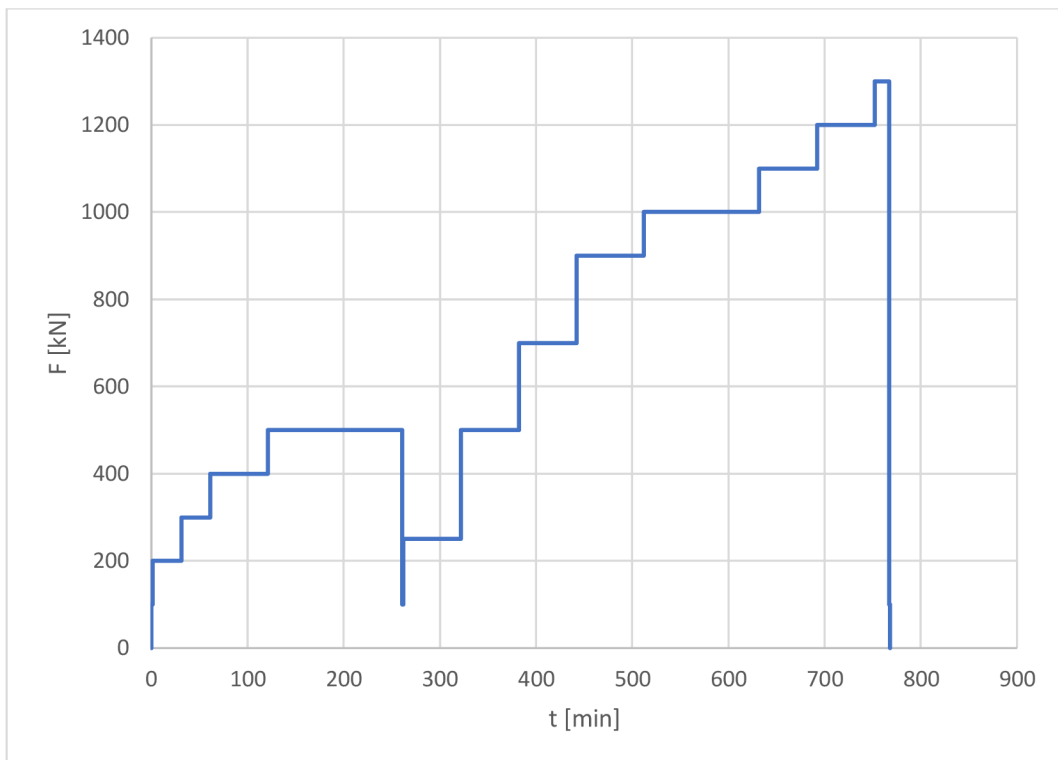
F [kN]	s [mm]
0	0,0
100	0,0
200	1,2
300	3,7
400	5,4
500	7,8
700	12,7
900	47,0



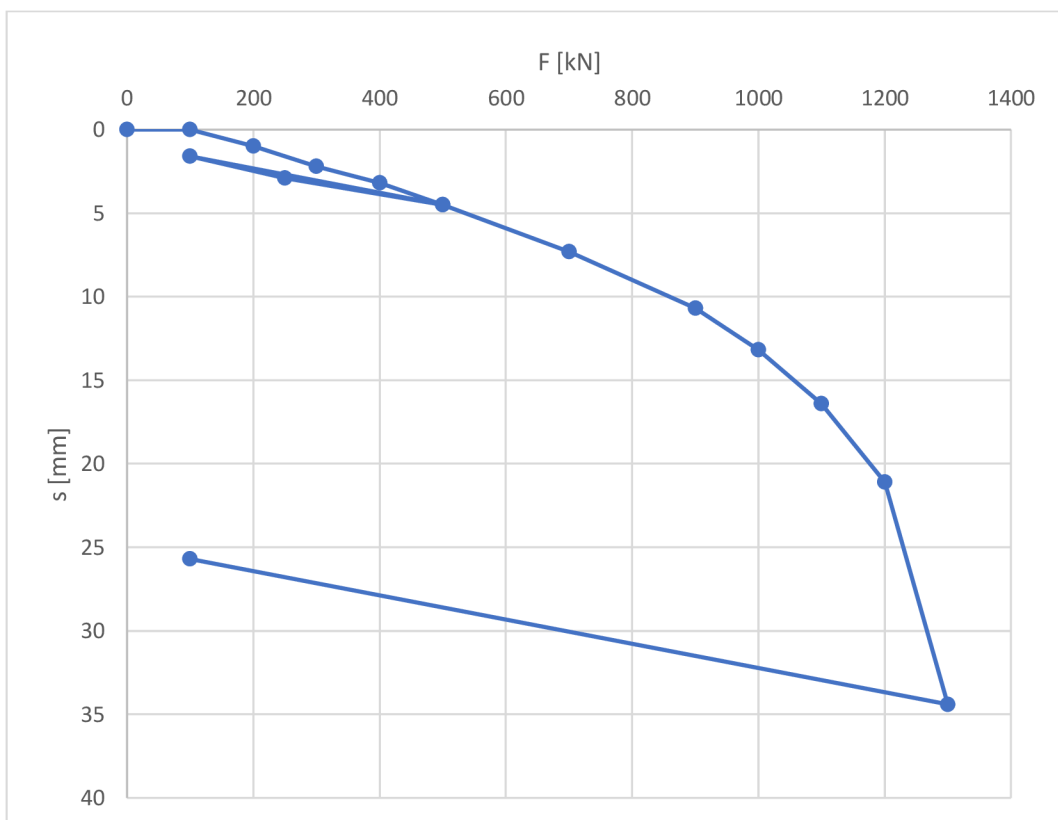
Graf 30 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT2, F/s

Mikropilota byla zatěžována tahem celkem 12,5 hodin. Při zatěžovacím kroku 900 kN dosáhla 1MS, její únosnost tedy byla stanovena na 700 kN s ustáleným posunem 12,7 mm.

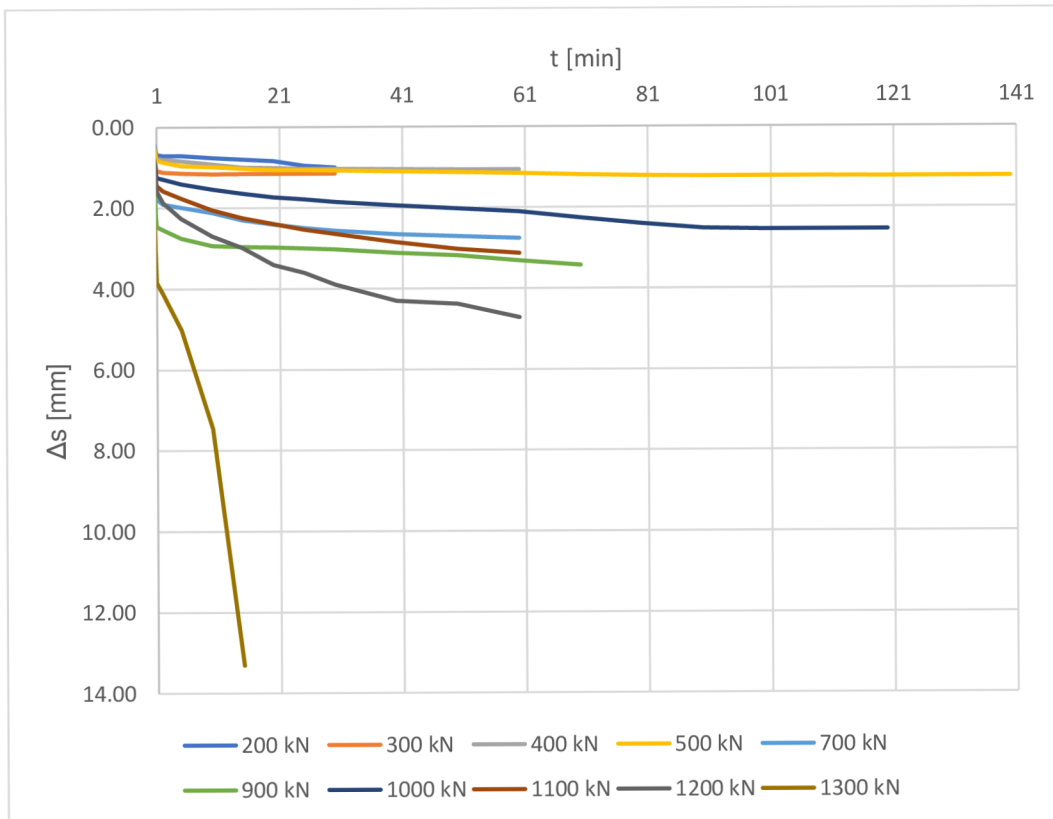
## 5.2.5 MIKROPILOTA IT3



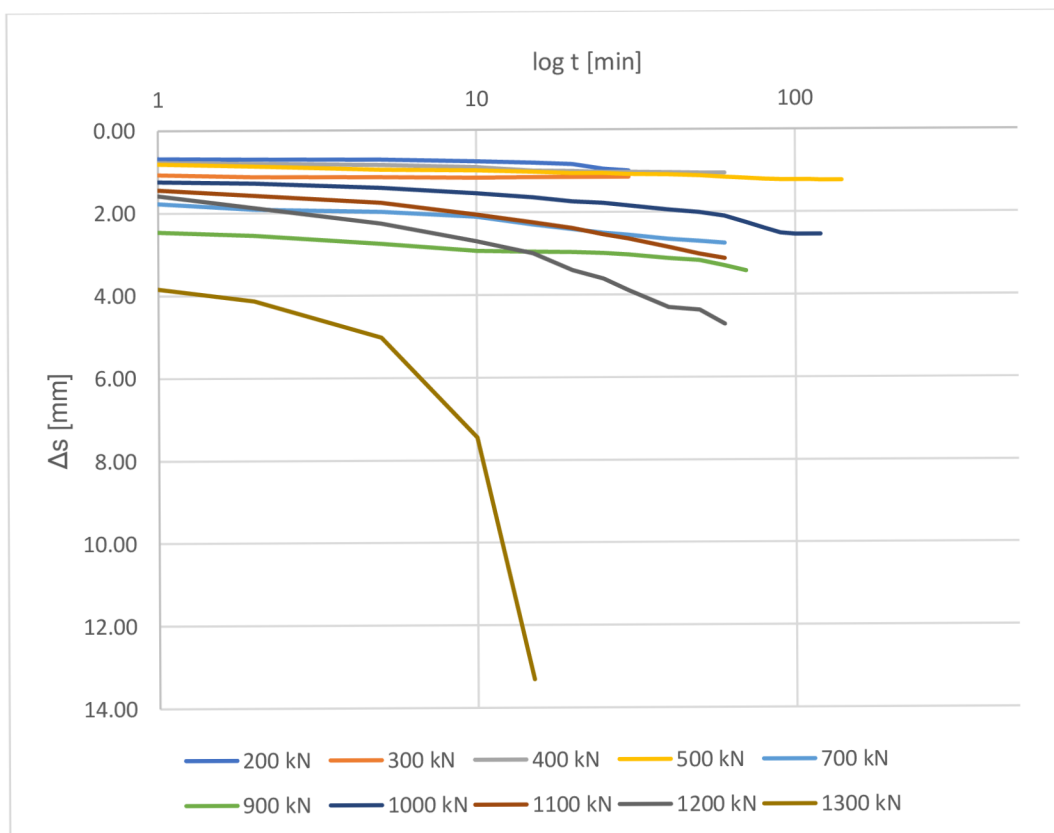
Graf 31 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě IT3, t/F



Graf 32 Zatěžovací křivka mikropiloty IT3, F/s



Graf 33 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT3,  $t/\Delta s$



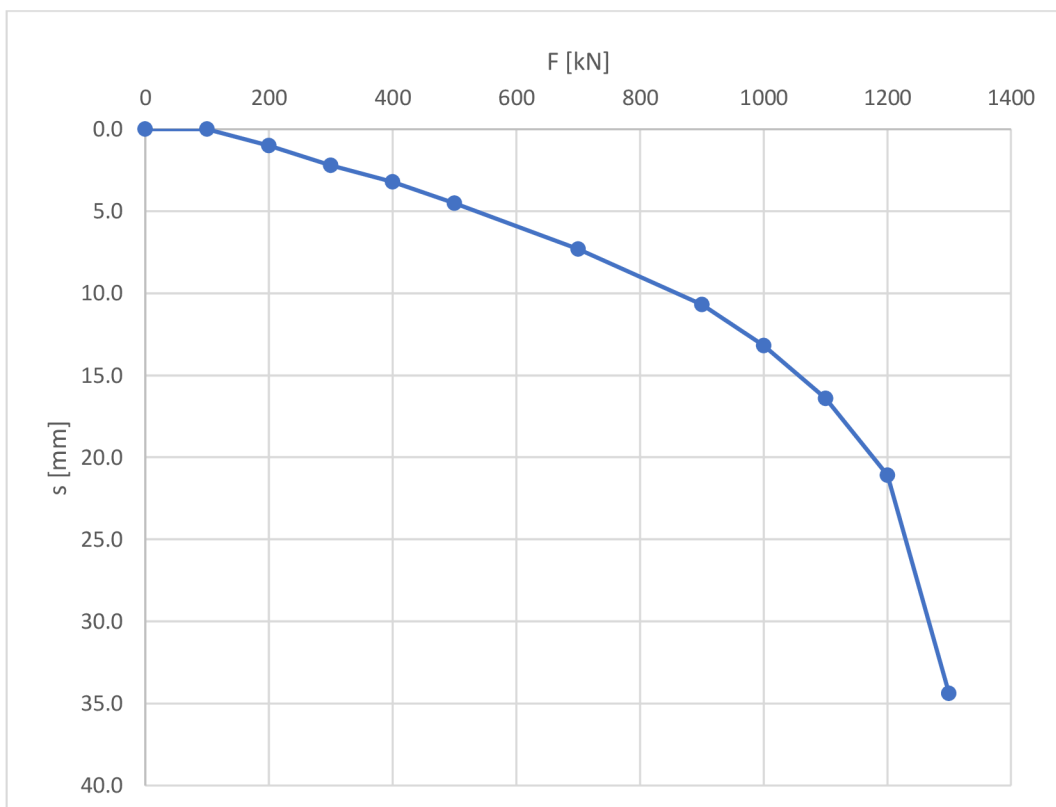
Graf 34 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT3,  $\log t/\Delta s$



Tabulka 16 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT3

F [kN]	s [mm]
0	0,0
100	0,0
200	1,0
300	2,2
400	3,2
500	4,5
700	7,3
900	10,7
1000	13,2
1100	16,4
1200	21,1
1300	34,4

Tabulka 17 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT3, F/s

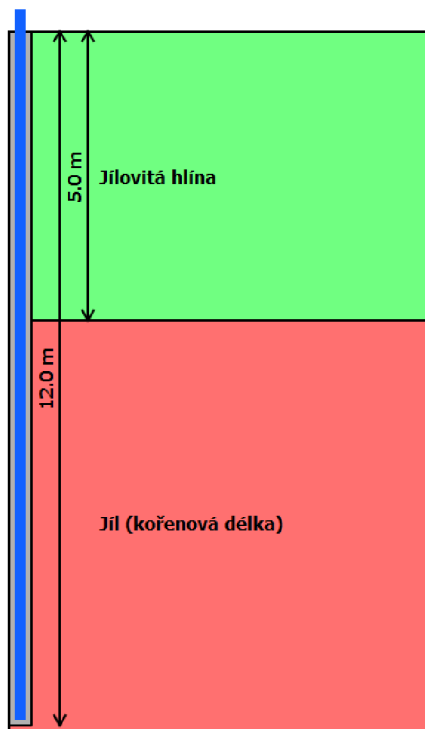


Mikropilota byla zatěžována tahem celkem 12,5 hodin. Prošla zkušebním zatížením 1000 kN. Únosnost piloty byla stanovena na 1100 kN s ustáleným posunem 16,4 mm. Při následném zatěžování až na krok 1300 kN mikropilota dosáhla 1MS.

## 6 VÝSLEDKY INVERZNÍCH VÝPOČTŮ A DÍLČÍ ZHODNOCENÍ

### 6.1 OSTRAVA

V Obrázek 6.1 je znázorněn geologický profil v programu PMpLTO pro mikropiloty MP1 a MP2.



Tabulka 18 Schéma geologického profilu

ZEMINA	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Jílovitá hlína	19	20
Jíl (kořenová délka)	19	20

Obrázek 6.1 Schéma geologického profilu

#### 6.1.1 MIKROPILOTA MP1

##### 6.1.1.1 ANALÝZA DLE VARIANTY OM

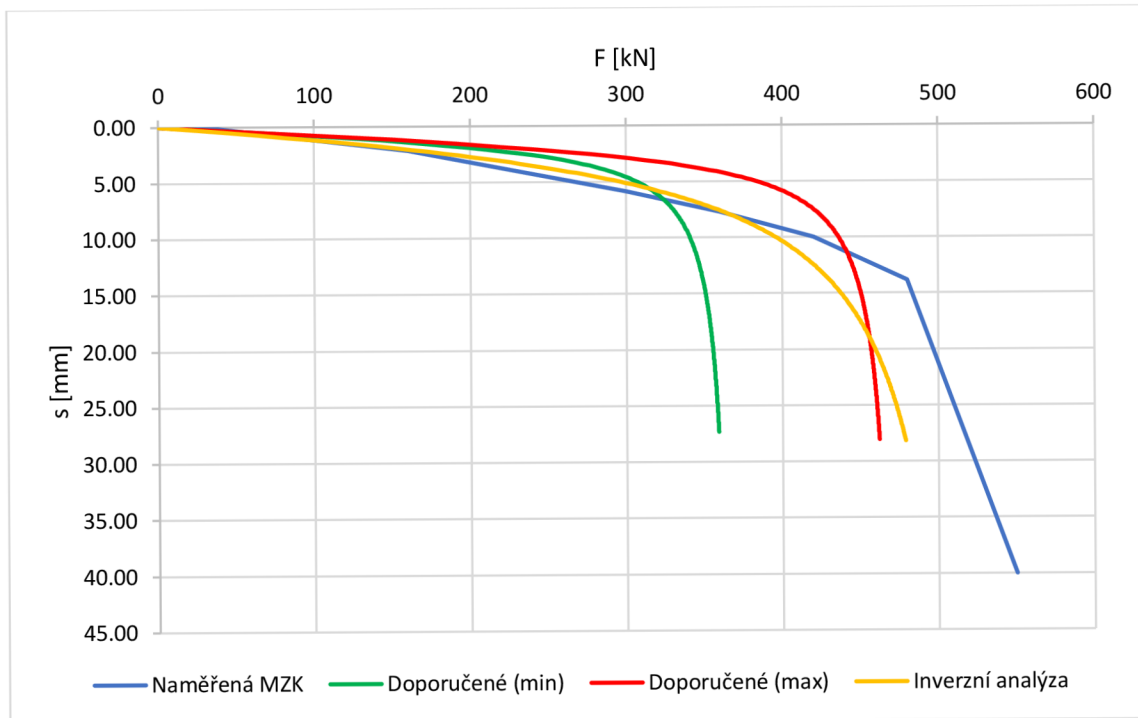
Doporučené hodnoty mezního plášťového tření  $USF$  se pohybují mezi 130 a 170 kPa, doporučená hodnota parametru  $M_s$  je 0,0038.

Tabulka 19 Parametry OM, MP1

	ZEMINA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	$USF$ [kPa]
<b>DOPORUČENÉ (MIN)</b>	Jílovitá hlína	0,0038	0,2	-
	Jíl (kořenová délka)		-	130
<b>Doporučené (MAX)</b>	Jílovitá hlína		0,2	-
	Jíl (kořenová délka)		-	170
<b>INVERZNÍ ANALÝZA</b>	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-
	Jíl (kořenová délka)		-	190

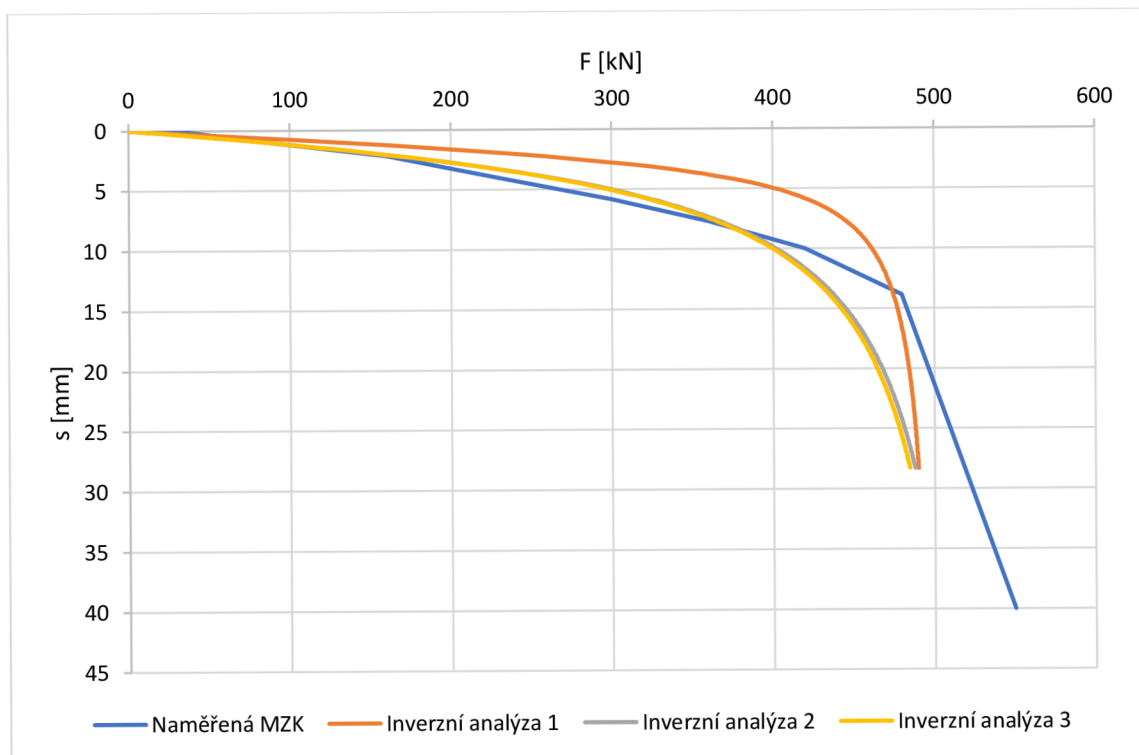
Nejvěrněji však naměřenou MZK kopíruje křivka s parametry  $M_s = 0,015$  a  $USF = 190 \text{ kPa}$  jak lze vidět v Graf 35. Z toho lze usoudit, že pro dosažení

stejné únosnosti, při přípustném posunu 20 mm, s menší tuhostí musíme navýšit plášťové tření.



Graf 35 Inverzní analýza 0M, MP1, F/s

### 6.1.1.2 ANALÝZA DLE VARIANTY 2A



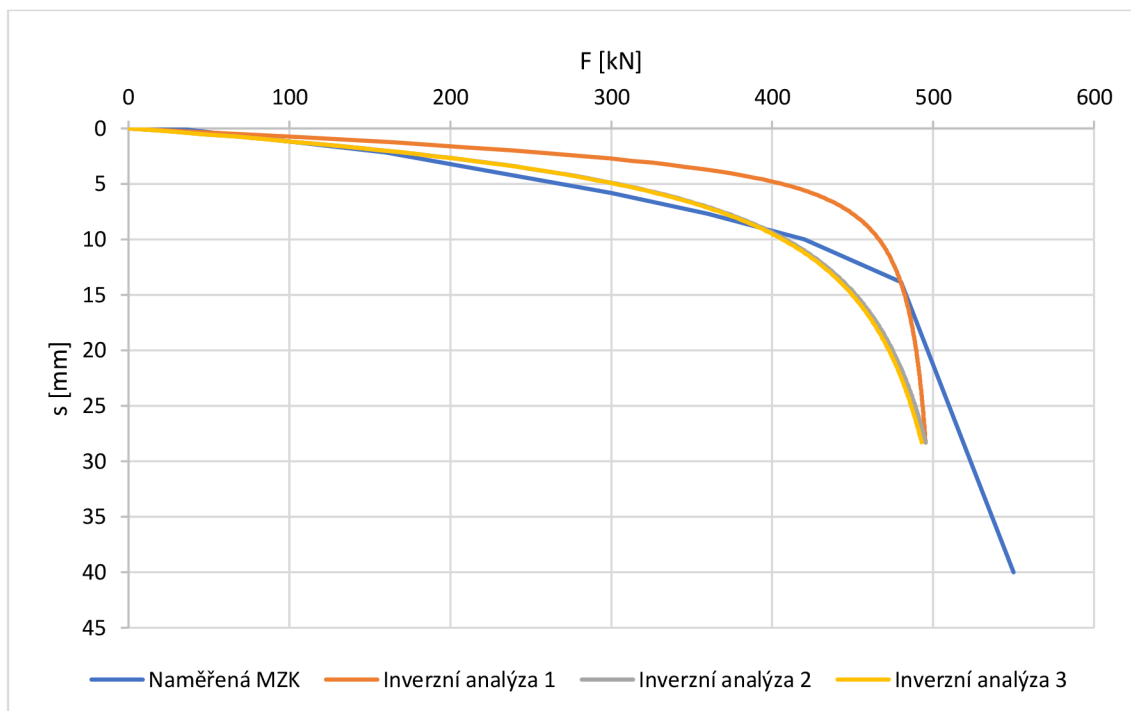
Graf 36 Inverzní analýza 2A, MP1, F/s

Přístup k analýze variantou 2A obsahuje úskalí zohlednění injektované kořenové délky mikropiloty v parametrech  $\varphi$  a  $POP$ . Jak v případě varianty 0M, tak i ve variantě 2A se neosvědčilo použití doporučeného parametru tuhosti  $M_s = 0,0038$ . Nejlépe lze naměřenou křivku proložit křivkou s parametrem  $M_s = 0,015$  a jednou z kombinací parametrů  $\varphi$  a  $POP$ , kdy je jeden z těchto parametrů navýšen, jak je zaznamenáno v Tabulka 20.

Tabulka 20 Parametry 2A, MP1

	ZEMINA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	$\varphi$ [°]	POP [kPa]
INVERZNÍ ANALÝZA 1	Jílovitá hlína	0,0038	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	5500
INVERZNÍ ANALÝZA 2	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	6500
INVERZNÍ ANALÝZA 3	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	30	3000

### 6.1.1.3 ANALÝZA DLE VARIANTY 3M



Graf 37 Inverzní analýza 3M, MP1, F/s

Analýza variantou 3M potřebuje stejně jako varianta 2A zohlednit injektovanou kořenovou délku vstupními parametry. Zde jsou tedy parametry  $\varphi$  a  $RSI$  jako u varianty 2A kombinovány a dochází k navýšení

jednoho z nich. Parametr tuhosti  $M_s = 0,015$  opět vycházel přesněji než doporučená hodnota. Kombinace parametrů lze vidět v Tabulka 21.

Tabulka 21 Parametry 3M, MP1

	ZEMINA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	$\varphi$ [°]	RSI [kPa]
<b>INVERZNÍ ANALÝZA 1</b>	Jílovitá hlína	0,0038	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	310
<b>INVERZNÍ ANALÝZA 2</b>	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	340
<b>INVERZNÍ ANALÝZA 3</b>	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	30	270

## 6.1.2 MIKROPILOTA MP2

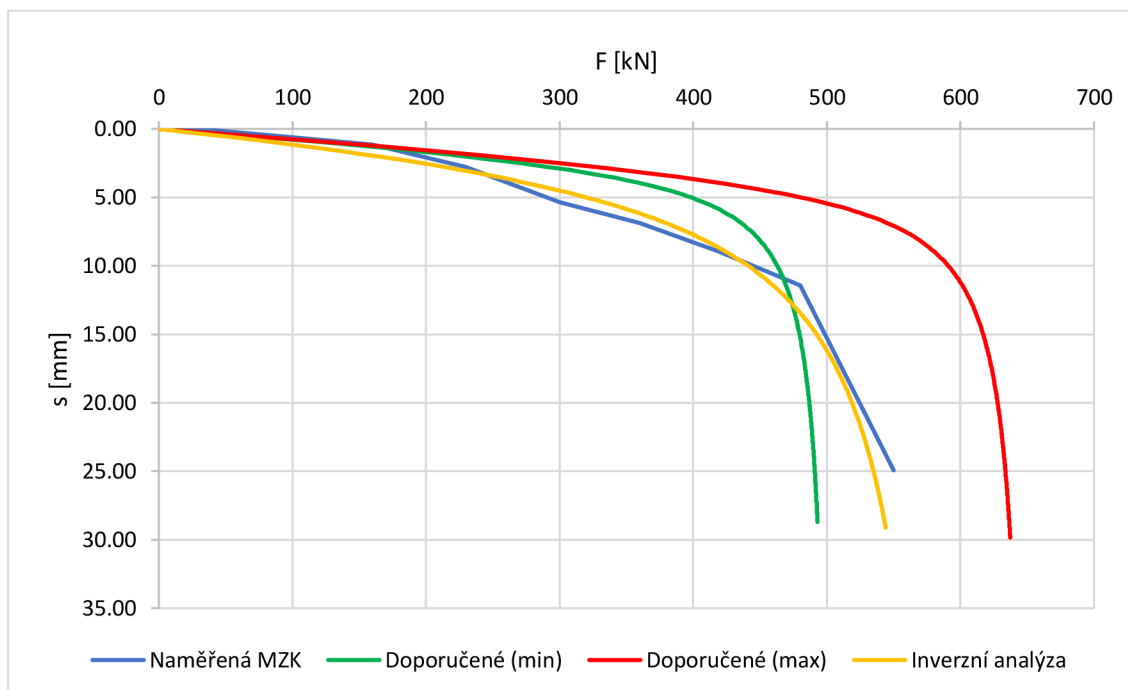
### 6.1.2.1 ANALÝZA DLE VARIANTY OM

Doporučené hodnoty plášťového tření  $USF$  se pohybují mezi 130 a 170 kPa, doporučená hodnota parametru  $M_s$  je 0,0038.

Tabulka 22 Parametry OM, MP2

	ZEMINA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	USF [kPa]
<b>DOPORUČENÉ (MIN)</b>	Jílovitá hlína	0,0038	0,2	-
	Jíl (kořenová délka)		-	130
<b>DOPORUČENÉ (MAX)</b>	Jílovitá hlína		0,2	-
	Jíl (kořenová délka)		-	170
<b>INVERZNÍ ANALÝZA</b>	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-
	Jíl (kořenová délka)		-	155

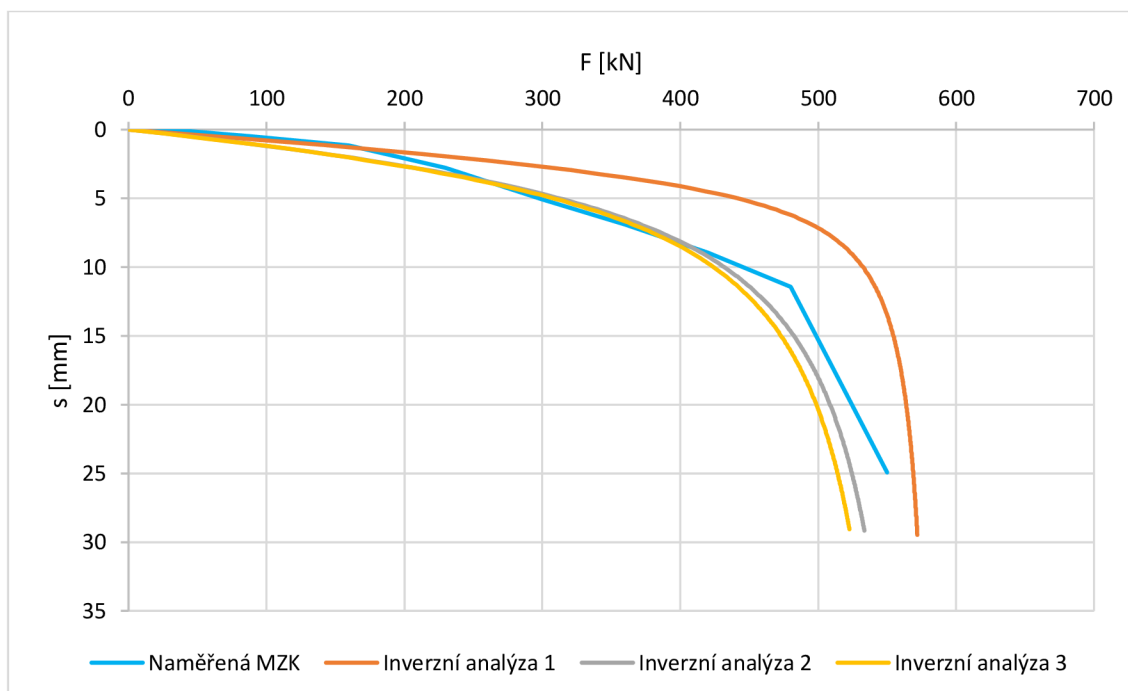
Nejvěrněji však naměřenou MZK kopíruje křivka s parametry  $M_s = 0,015$  a  $USF = 155 \text{ kPa}$  jak lze vidět v Graf 38.



Graf 38 Inverzní analýza 0M, MP2, F/s

Naměřená MZK lze dostatečně vystihnout křivkou s doporučenými minimálními hodnotami plášťového tření, ale doporučený parametr  $M_s$  je pro tuto MZK stále příliš vysoký a MZK GEWI mikropilot se v této zkoušce chovala měkčeji, než udávají doporučené hodnoty.

### 6.1.2.2 ANALÝZA DLE VARIANTY 2A



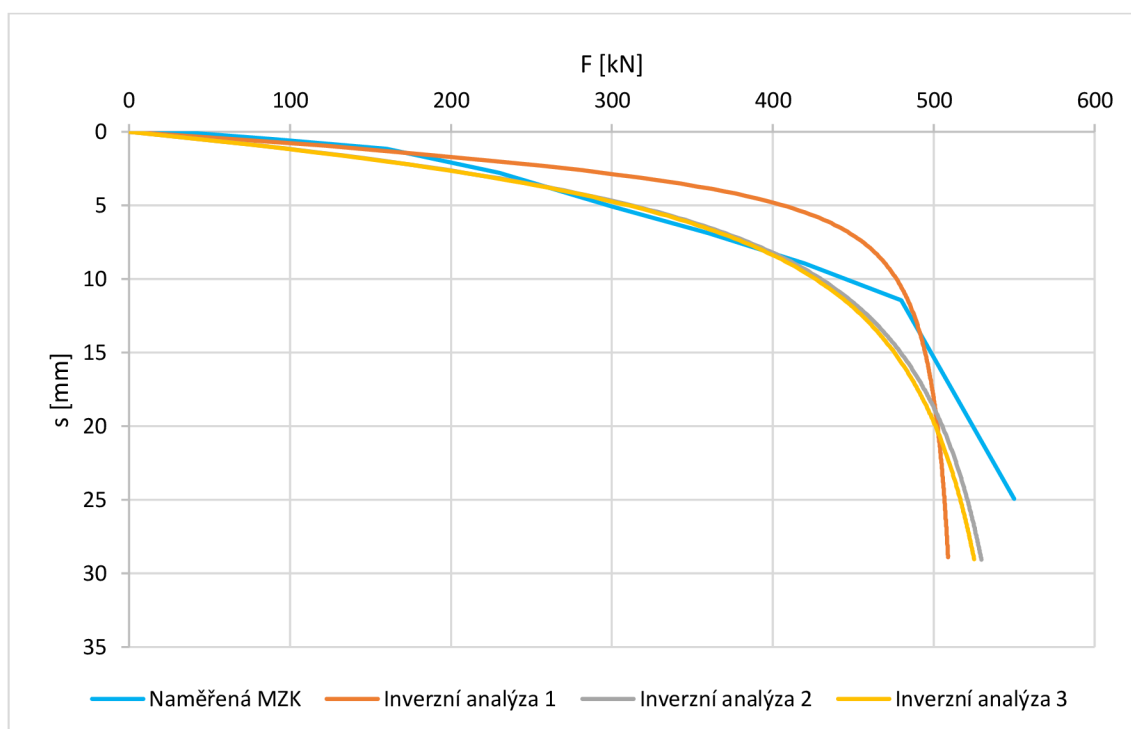
Graf 39 Inverzní analýza 2A, MP2, F/s

Při použití doporučených parametrů, jako u MP1 lze vidět, že predikce mikropiloty vychází poměrně nadhodnocené. Opět vychází parametr tuhosti nejvhodněji  $M_s = 0,015$ , ovšem při další kombinaci parametrů  $\varphi$  a  $POP$  vychází parametr  $POP$  v polovičních hodnotách oproti hodnotám pro MP1.

Tabulka 23 Parametry 2A, MP2

	ZEMINA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	$\varphi$ [°]	POP [kPa]
INVERZNÍ ANALÝZA 1	Jílovitá hlína	0,0038	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	3000
INVERZNÍ ANALÝZA 2	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	3000
INVERZNÍ ANALÝZA 3	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	30	1500

### 6.1.2.3 ANALÝZA DLE VARIANTY 3M



Graf 40 Inverzní analýza 3M, MP2, F/s

Analýza mikropiloty MP2 dle varianty 3M se vůči mikropilotě MP1 liší ve všech proloženích v parametru  $RSI$  o cca 100 kPa. Parametr  $M_s = 0,015$  byl v tomto případě zase vhodnější než doporučená hodnota tohoto parametru.

Tabulka 24 Parametry 3M, MP2

	ZEMINA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	$\varphi$ [°]	RSI [kPa]
INVERZNÍ ANALÝZA 1	Jílovitá hlína	0,0038	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	195
INVERZNÍ ANALÝZA 2	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	25	230
INVERZNÍ ANALÝZA 3	Jílovitá hlína	0,015	0,2	-	-
	Jíl (kořenová délka)		-	30	180

### 6.1.3 ZHODNOCENÍ

V Tabulka 25 jsou shrnuty nejlépe vycházející hodnoty pro každou variantu výpočtu predikce MZK GEWI mikropilot.

Tabulka 25 Shrnutí nejvhodnějších hodnot parametrů

ZEMINA	Varianta	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	$\varphi$ [°]	USF [kPa]	POP [kPa]	RSI [kPa]
Jílovitá hlína	1A	0,015	0,2	-	-	-	-
Jíl (kořenová délka)	0M		-	-	155-190	-	-
	2A		-	25	-	3000-6500	-
			-	30	-	1500-3000	-
	3M		-	25	-	-	230-340
			-	30	-	-	180-270

Z analýz bylo zjištěno, že doporučený parametr  $M_s = 0,0038$  nebyl vhodný a křivka MZK se chovala měkčeji s využitím parametru  $M_s = 0,015$ .

Z použitých variant predikcí vychází nejlépe varianta 0M, kde křivka nejlépe kopíruje naměřenou MZK a hodnoty plášťového tření  $USF$  mají nejenom v rámci jedné mikropiloty, ale v rámci obou mikropilot nejmenší rozptyl hodnot, což je ve stejné geologii a podobných délkách žádaný efekt. Hodnoty mezního plášťového tření  $USF$  se pohybovaly mezi 155 a 190 kPa, tyto hodnoty se také nacházejí v doporučených hodnotách, které jsou zmíněny v kapitole 4.1. Varianta 2A se pro tyto zkoušené mikropiloty tolik neosvědčila, hodnoty měly mezi pilotami významné rozptyly a parametry  $POP$  díky zohlednění injektované kořenové délky nabývaly vysokých a nereálných



hodnot. Varianta 3M také u obou pilot dosahuje poměrně velkých rozdílů, ale predikované hodnoty *RSI* by mohly zohledňovat vliv injektáže kořenové délky.

## 6.2 VÍDEŇ

V Obrázek 6.2 je znázorněn geologický profil v programu PMpLTO pro mikropiloty IT1 a IT3.

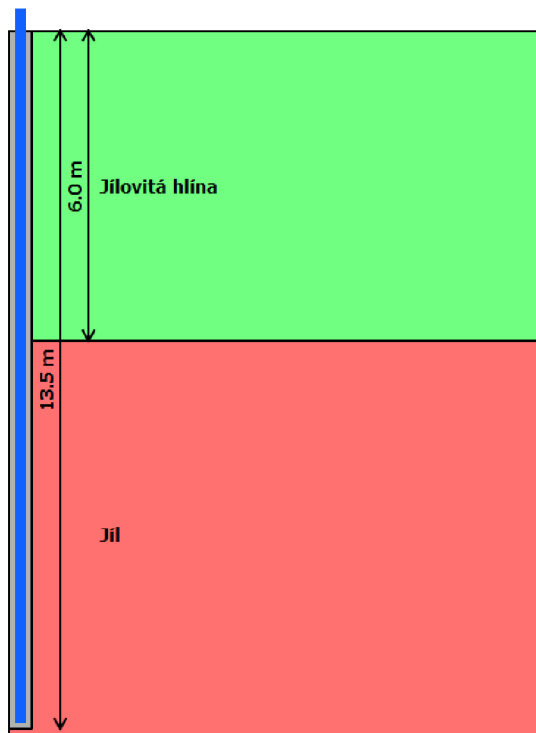


Tabulka 26 Schéma geologického profilu IT1 a IT3

ZEMINA	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Jílovitá hlína	18	20
Štěrk	19	21
Jílovitá hlína	18	20
Štěrk	19	21
Jílovitá hlína	18	20
Jíl	18	20

Obrázek 6.2 Schéma geologického profilu IT1 a IT3

U mikropiloty IT2 nejsou uvažovány štěrkové vrstvy, takže je i schéma geologického profilu upraveno na dvě vrstvy jílu.

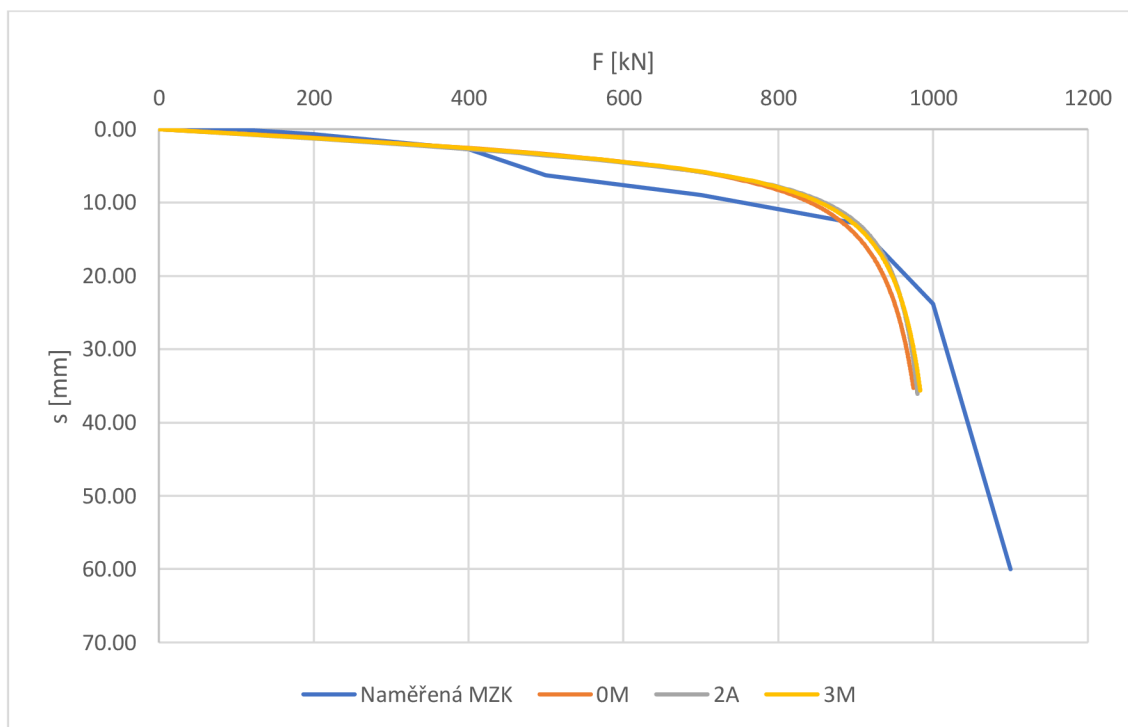


Tabulka 27 Schéma geologického profilu IT2

ZEMINA	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	$\gamma_s$ [kN/m <sup>3</sup> ]
Jílovitá hlína	18	20
Jíl	18	20

Obrázek 6.3 Schéma geologického profilu IT2

### 6.2.1 MIKROPILOTA IT1



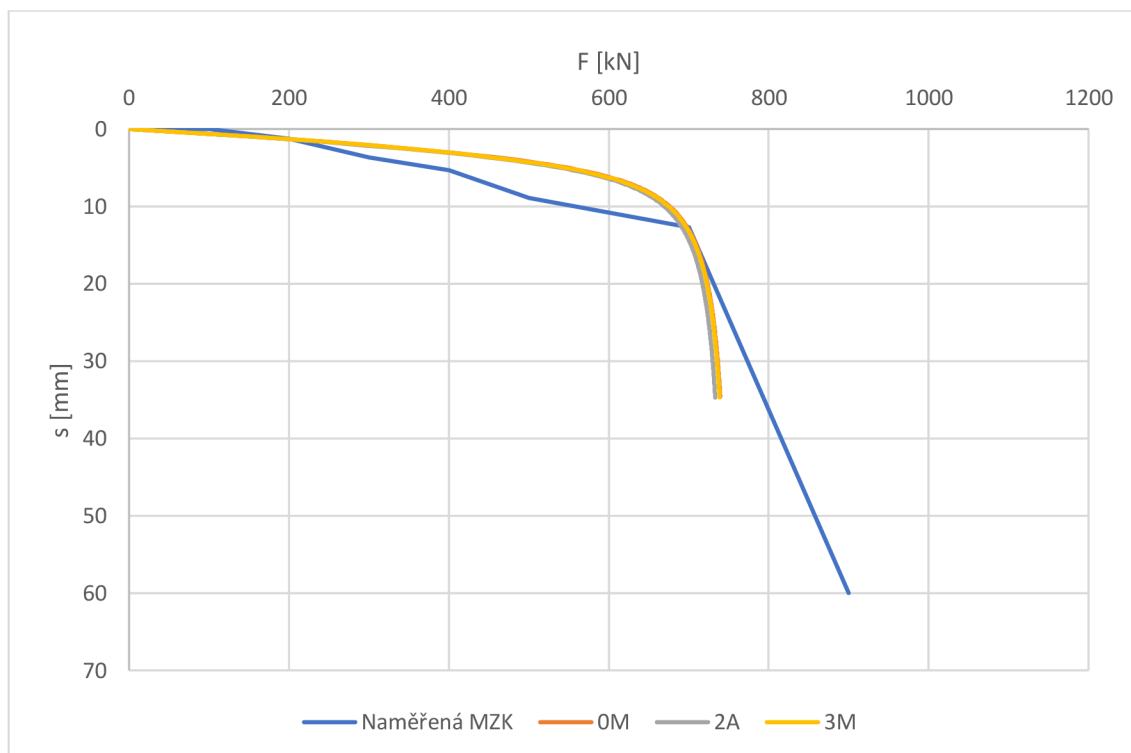
Graf 41 Inverzní analýza IT1

Všechny varianty výpočtu se ukázaly, že se správnými parametry věrohodně kopírují průběh MZK. Pro štěrkovou vrstvu byl použit parametr tuhosti křivky  $M_s = 0,02$ , pro jílovité vrstvy byla použita doporučená hodnota  $M_s = 0,0038$ . Hodnoty plášťového tření  $USF$  vycházejí dle doporučených hodnot. Hodnota předtížení stanovená pro neogenní jíl je  $POP = 4250 \text{ kPa}$ . Hodnoty navýšení radiálního tlaku jsou  $RSI = 300 \text{ kPa}$  pro štěrk a  $RSI = 250 \text{ kPa}$  pro neogenní jíl.

Tabulka 28 Parametry IT1

ZEMINA	VARIANTA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	USF [kPa]	$\varphi$ [°]	POP [kPa]	RSI [kPa]
Jílovitá hlína	1M	0,0038	0,25	-			
Štěrk	0M	0,02	-	300	-		
	2A			-	-		
	3M			-	35	-	300
Jíl	0M	0,0038	-	150	-		
	2A			-	25	4250	-
	3M			-	25	-	250

## 6.2.2 MIKROPILOTA IT2



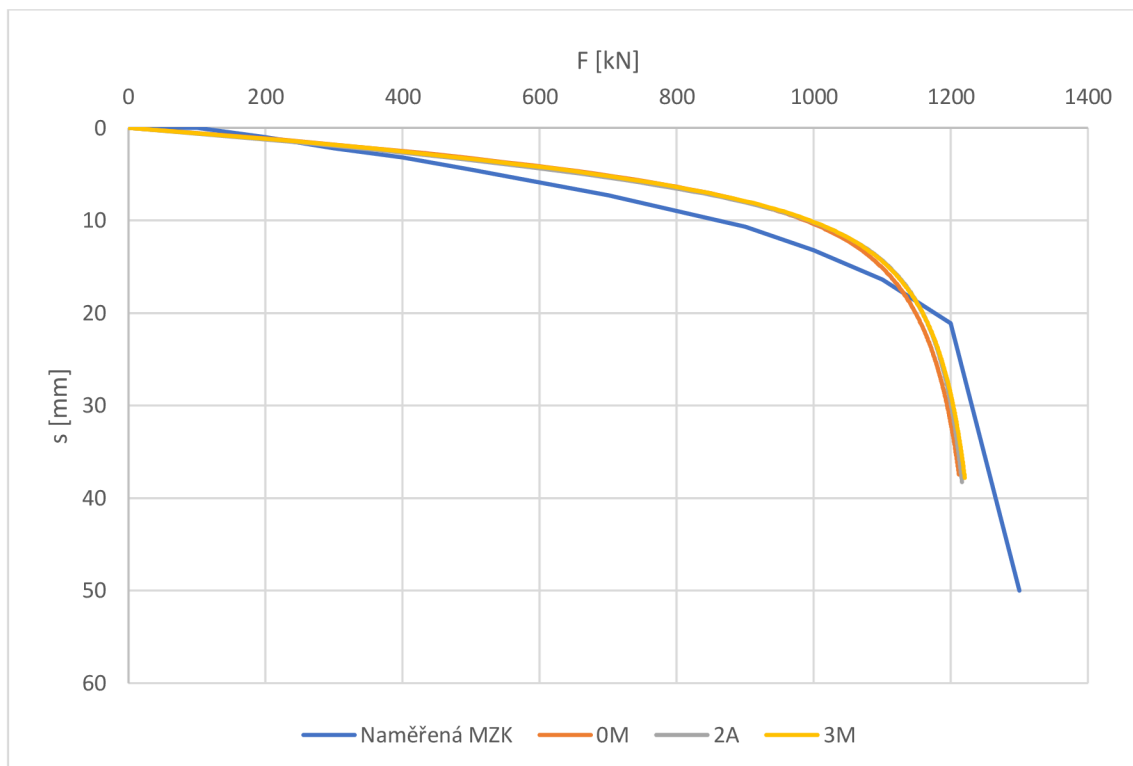
Graf 42 Inverzní analýza IT2

U mikropiloty IT2 byla naměřena menší únosnost než u mikropiloty IT1. Tento jev byl zřejmě zapříčiněn absencí štěrkových vrstev. Hodnoty parametrů pro zeminy predikované MZK jsou až na případ varianty 2A, kde je hodnota  $POP = 2500 \text{ kPa}$  dosahovala pouze poloviční hodnoty, velmi podobné s hodnotami pro IT1. Stejně jako u IT1 všechny varianty výpočtu věrohodně kopírují průběh naměřené MZK.

Tabulka 29 Parametry IT2

ZEMINA	VARIANTA	Ms [-]	$\beta$ [-]	USF [kPa]	$\varphi$ [°]	POP [kPa]	RSI [kPa]
Jílovitá hlína	1M	0,0038	0,25	-			
Jíl	0M	0,0038	-	150	-		
	2A			-	25	2500	-
	3M			-	-	-	220

### 6.2.3 MIKROPILOTA IT3



Graf 43 Inverzní analýza IT3

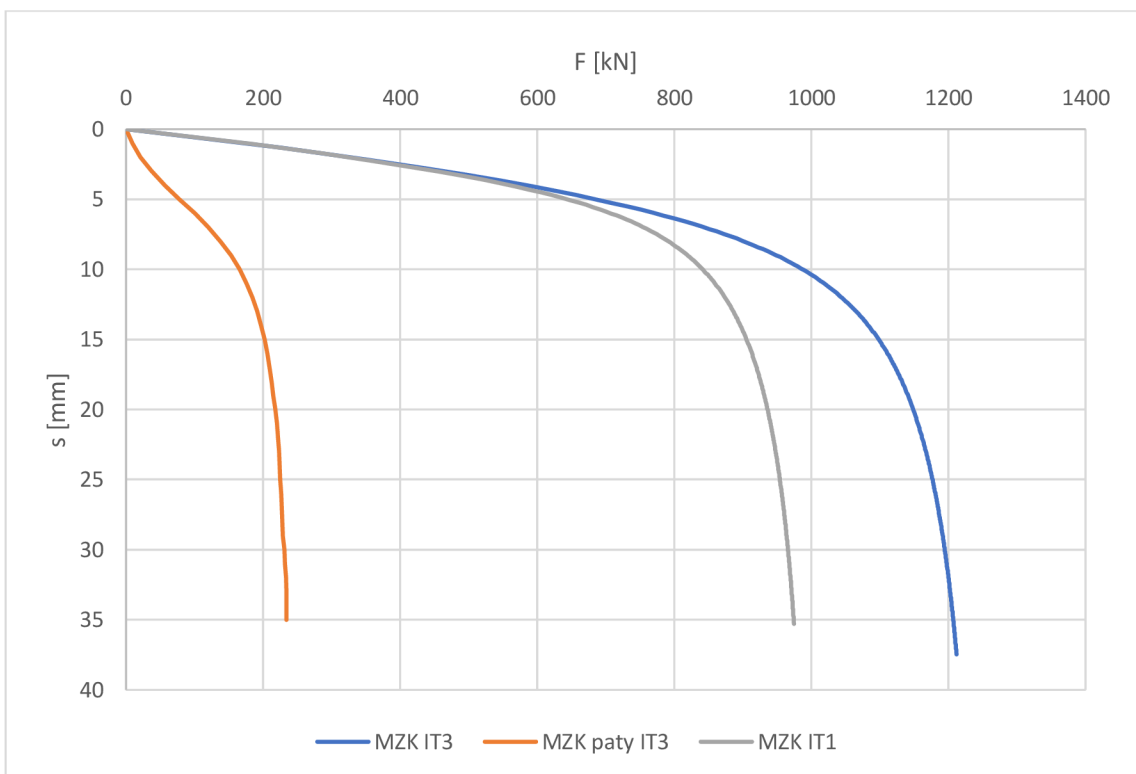
Pro tlakovou zkoušku byly použity stejné parametry zeminy, jako pro mikropilotu IT1. Dále je nutno doplnit parametry pro únosnost paty mikropiloty – mezní napětí na patě  $\sigma_b = 8000 \text{ kPa}$  a počáteční tuhost křivky pro patu  $M_b = 0,01$ . Hodnota napětí 8 MPa, ač se zdá vysoká, je zmíněna

i v oficiálních dokumentech k mikropilotám firmy Ischebeck. Tato hodnota odpovídá spodní hranici zemin s tuhou konzistencí. [8]

Tabulka 30 Parametry IT3

ZEMINA	VARIANTA	Ms [-]	$\beta$ [-]	USF [kPa]	$\varphi$ [°]	POP [kPa]	RSI [kPa]
Jílovitá hlína	1M	0,0038	0,25	-			
Štěrk	0M	0,02	-	300	-		
	2A			-			
	3M			35	-	300	
Jíl	0M	0,0038	-	150	-		
	2A			-	25	4250	-
	3M			-	-	-	250

U mikropilot IT1 a IT3 můžeme předpokládat, že když jsou zhotoveny ve stejné geologii, stejné délky a technologie, tak tření na plášti bude shodné. Z toho, že jedna mikropilota je zatěžována tlakem a druhá tlakem, můžeme pozorovat rozdíl v únosnosti, kde tlakovému zatížení odolává i pata mikropiloty.



Graf 44 Rozdíl v únosnosti při tlakovém a tahovém zatížení

## 6.2.4 ZHODNOCENÍ

Parametry tuhosti křivky v případě mikropilot Ischebeck TITAN vycházely dle doporučených hodnot  $M_s = 0,0038$  pro jíly a  $M_s = 0,02$  pro štěrky.

Hodnoty plášťového tření  $USF$  vycházejí dle doporučených hodnot.  $USF = 150 \text{ kPa}$  pro neogenní jíly a  $USF = 300 \text{ kPa}$  pro štěrky.

Parametry  $POP$  a  $RSI$  vycházejí v s podobnými hodnotami jako u GEWI mikropilot. U mikropilot Ischebeck TITAN lze hodnoty  $POP$  a  $RSI$ , na rozdíl od GEWI mikropilot, kde jsou hodnoty přisuzovány injektáži, přisoudit vlivu injektáže primární zálivky, která je do vrtu vháněna pod tlakem.

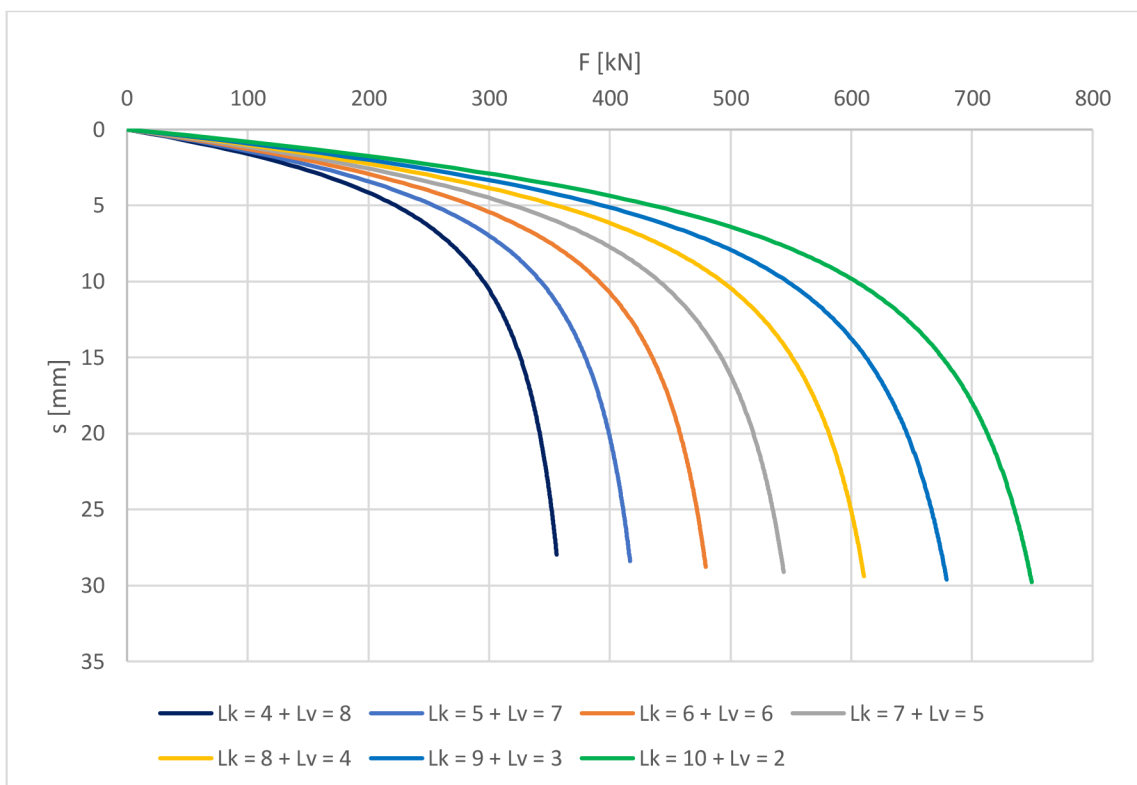
V Tabulka 31 jsou shrnuty hodnoty parametrů použitých pro predikce MZK mikropilot Ischebeck TITAN.

Tabulka 31 Shrnutí nejvhodnějších hodnot parametrů

ZEMINA	VARIANTA	$M_s$ [-]	$\beta$ [-]	USF [kPa]	$\varphi$ [°]	POP [kPa]	RSI [kPa]
Jílovitá hlína	1M	0,0038	0,25	-			
Štěrky	0M	0,02	-	300	-		
	2A			-	-		
	3M			-	35	-	300
Jíl	0M	0,0038	-	150	-		
	2A			-	25	2500-4250	-
	3M			-	-	-	220-250

## 7 PARAMETRICKÁ STUDIE

Pro mikropilotu MP2 a analýzu dle varianty 0M byla vypracována parametrická studie, kde bylo zkoumáno, k jakým změnám chování MZK dojde v případě, že by byl změněn poměr délek kořene ( $L_k$ ) vůči délce dříku piloty ( $L_v$ ) (mikropilota si zachová svou původní délku), v případě, že by byla měněna délka kořene při zachování původní délky dříku a v případě, že byla měněna délka dříku při zachování původní délky kořene (celá mikropilota má proměnnou délku).

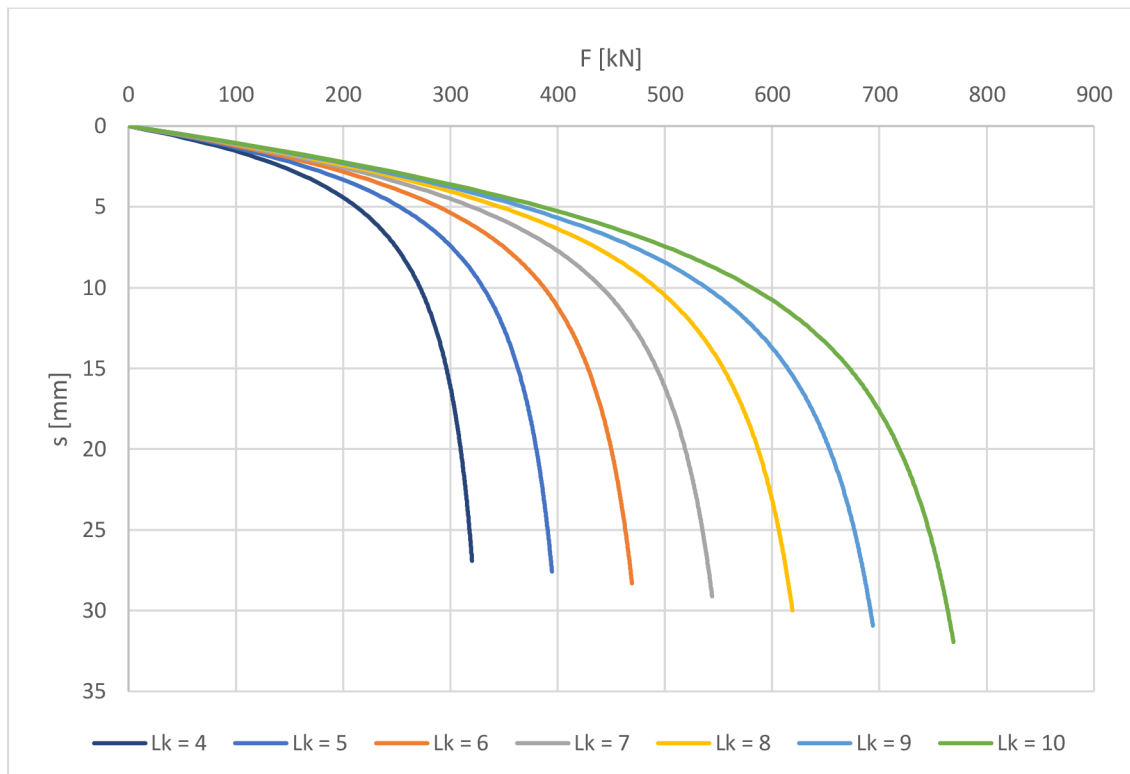


Graf 45 Porovnání MZK při změně poměru délky dříku a kořene

V Graf 45 můžeme vidět vypočtené MZK, pokud je změněn poměr délky dříku piloty a kořene. Pokud křivky porovnáme při sedání 15 mm, tak s každým jedním přidaným metrem kořenové délky narůstá únosnost o cca 60 kN.

Když stejně porovnáme křivky v Graf 46, při změně kořenové délky a zachování původní délky dříku ( $L_v = 5$  m), při posunu 15 mm, vidíme, že opět s každým přidaným metrem kořenové délky dosahujeme vyšší únosnosti o cca 60 kN. Ale oproti křivkám, kde se měnil pouze poměr délek, neměnila se délka celé piloty, se křivky chovají měkčeji.

Z těchto zjištění můžeme usuzovat, že pokud by byla celá mikropilota zhotovena v homogenní zemině, tak je výhodnější provést prodloužení kořenové délky vůči celé mikropilotě a neprodužovat kořenovou délku dále do hloubky a zvětšovat celkovou délku mikropiloty.



Graf 46 Porovnání MZK při změně délky kořene a zachování délky dříku piloty

Porovnání únosností při posunu 15 mm je shrnuto v Tabulka 32.

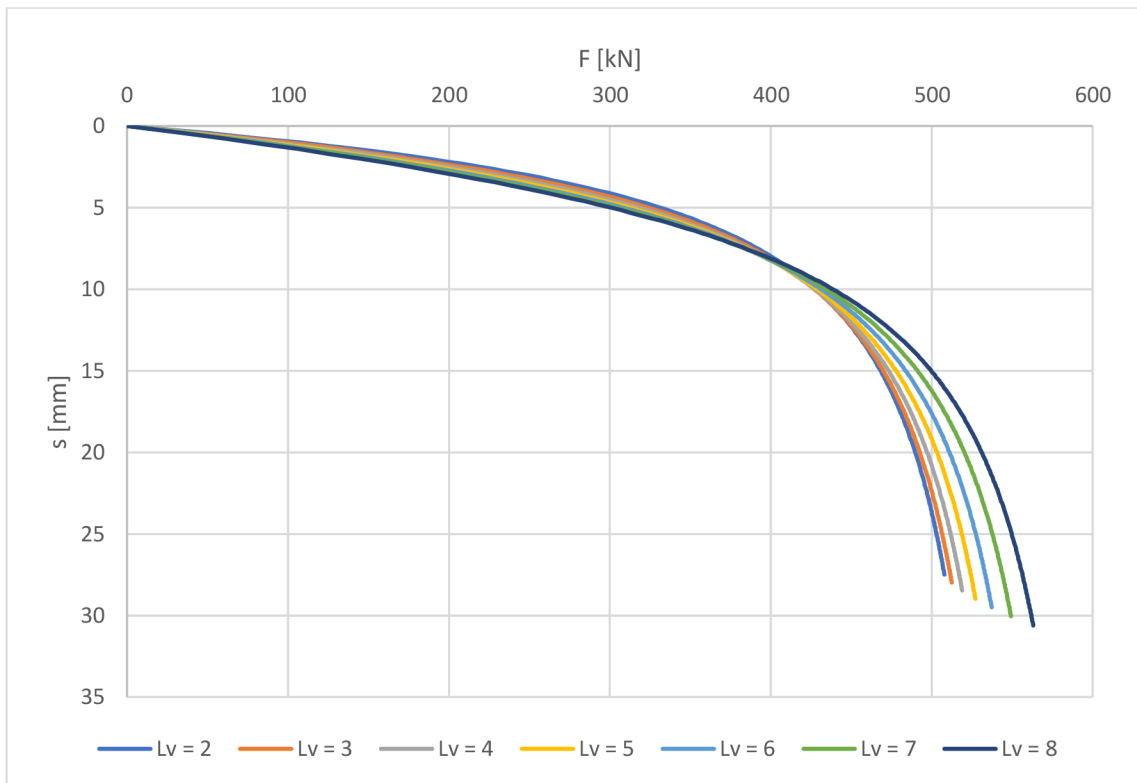
Tabulka 32 Porovnání únosností při posunu 15 mm

	$L_k/L_v$	$L_v+L_k$
$L_k$ [m]	F [kN]	
4	323	296
5	380	363
6	435	428
7	493	492
8	552	555
9	613	615
10	678	672

V Graf 47 jsou porovnány MZK v případě, že je měněna délka dříku piloty a je zachována kořenová délka ( $L_k = 7$  m). Na délce kořene, nikoliv jeho poloze



vůči povrchu, je závislý klasický návrh mikropilot. Zde lze vidět, že chování MZK je závislé na poloze kořene mikropiloty. Pokud křivky porovnáme opět při posunu mikropiloty o 15 mm, můžeme vidět, že při zachování délky kořene a změně jeho hloubky o 6 m je nárůst únosnosti o cca 40 kN. Ale při návrhu této mikropiloty do zatížení 400 kN je výhodnější použití kratší délky dřívku, jelikož se při této konfiguraci křivka chová více tuze a do zatížení 400 kN tak bude docházet k menším posunům mikropiloty.



Graf 47 Porovnání MZK při změně délky dřívku a zachování délky kořene

## 8 ZÁVĚR

V práci byly analyzovány zatěžovací zkoušky mikropilot a pomocí jednotlivých variant výpočtů MZK byly zpětně predikovány v programu PMpLTO, které zde pomohly při validaci doporučených hodnot pro vstupní parametry metody přenosových funkcí.

Hlavní výstup práce je zjištění, že pro výše zmíněné mikropiloty vychází nejlépe predikce podle varianty výpočtu 0M s hodnotami mezního plášťového tření pro tuhé jíly, které jsou v rozmezí doporučení v literatuře  $USF = 155 - 190 \text{ kPa}$ . V případě mikropilot GEWI byla zjištěna odchylka v hodnotě počáteční tuhosti křivky MZK  $M_s = 0,015$  oproti doporučené hodnotě  $M_s = 0,0038$ . U mikropilot systému Ischebeck TITAN vycházely predikce s doporučenou hodnotou  $M_s = 0,0038$ .

Predikce variantou 3M vycházely rovněž uspokojivě, ale hodnoty vstupních parametrů nebylo s čím porovnat. Hodnoty parametru nárustu radiálního tlaku pro neogenní jíl vycházely  $RSI = 220 - 340 \text{ kPa}$ . Tyto hodnoty lze vysvětlit u GEWI mikropilot vlivem injektáže a roztlačení do okolí, u mikropilot Ischebeck lze hodnoty vysvětlit roztlačáním zeminy vlivem vthánění injektáže do vrtu pod tlakem.

Varianta výpočtu 2A dle mého názoru není úplně vhodná pro predikci MZK zde použitých zatěžovacích zkoušek, tak jako u velkopřůměrových pilot, kde zřejmě nedochází k takovému ovlivnění okolního prostředí zeminy a součinitel překonsolidace se pohybuje v reálných hodnotách. Variantu 2A nedoporučuji, jelikož pro zohlednění injektáží vycházel parametr překonsolidace s nereálnými vysokými hodnotami a ve velkém rozptylu.

Predikce pomocí metody přenosových funkcí v programu PMpLTO nám přináší více informací a výstupů z výpočtu ve srovnáním s empirickými metodami, zároveň tato metoda není tak časově hardwarově náročná jako metoda konečných prvků. Velkou výhodou jsou výstupy jako průběhy mezní zatěžovací křivky, průběh posunů v závislosti na hloubce, průběh plášťového a mezního plášťového tření s hloubkou nebo přenos síly do zeminy v závislosti na hloubce. Tato metoda může být dobrou pomocí pro lepší znalost konkrétní geotechnické konstrukce a s tímto ohledem například i její více ekonomický návrh.

V práci lze pokračovat s použitím dalších zatěžovacích zkoušek a validovat tak doporučené hodnoty na větším počtu zkoušek.

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] CHALMOVSKÝ, Juraj. *Využití metody přenosových funkcí pro predikci chování hlubinných základů v ČR*. Brno, **2021**. Souhrnná výzkumná zpráva. Vysoké učení technické v Brně.
- [2] BOHN, Cécilia, Alexandre LOPES DOS SANTOS a Roger FRANK. Development of Axial Pile Load Transfer Curves Based on Instrumented Load Tests. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. **2017**, 143(1), 1-15. ISSN 1090-0241. Dostupné z: doi:10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001579
- [3] Manuál softwaru PMpLTO ver. 0.2. In: <https://geotech.fce.vutbr.cz/> [online]. Brno: Vysoké učení technické v Brně - Fakulta stavební - Ústav geotechniky, **2021** [cit. 2023-05-19]. Dostupné z: <https://geotech.fce.vutbr.cz/veda-a-vyzkum/projekty-tacr/projekt-tj02000140-implementace-metody-prenosovych-funkci-pro-optimalizaci-navrhu-hlubinneho-zakladani-staveb/>
- [4] MASOPUST, Jan. *Zakládání staveb 1*. 2018. Praha: České vysoké učení technické v Praze, **2015**. ISBN 978-80-01-05837-4.
- [5] RAČANSKÝ, Václav. *Piloty: Přednáška předmětu BF003 - Zakládání staveb, Fakulta stavební, VUT v Brně*. 2016/2017. Brno, **2016**.
- [6] TUOZZOLO, Thomas J. Duplex Drilling Method "Drill Bit Location" A Friendly Discussion. In: *International Society for Micropiles* [online]. ISM-Washington, DC: Thomas J. Tuozzolo, P.E., **2010** [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.ismicropiles.org/Proceedings/2010/Tuozzolo%20-%20Drill%20Bit%20Location%20-%20A%20Friendly%20Discussion.pdf>
- [7] TITAN micropile: Geotechnical systems. In: *Ischebeck.de* [online]. Ennepetal: Ischebeck, **2023** [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.ischebeck.de/en/geotechnical-systems/>
- [8] TITAN Micropiles an innovation prevails: Design and construction. In: *Ischebeck.de* [online]. Ennepetal: Ischebeck, **2016** [cit. 2023-04-21]. Dostupné z: <https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/>

## 10 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ, ZKRATEK A VELIČIN

MPF	metoda přenosových funkcí
MZK	mezní zatěžovací křivka
$s_b$	posunutí na patě piloty
$q_b$	mobilizované normálové napětí na patě piloty
$s_s$	posun piloty
$q_s$	mobilizované plášťové tření
$P_b$	síla na patě piloty
$s_{b,c,t}^n$	posunutí na patě (středu, hlavě) segmentu
$P_{c,t}^n$	síla na středu (hlavě) segmentu
$D_s$	průměr segmentu piloty
$L_s$	délka segmentu piloty
$s'$	aktualizované posunutí
$q_s'$	aktualizované plášťové tření
$q_{s,ult}$	mezní plášťové tření
$M_s$	deformační parametr tuhosti mobilizační křivky pro plášť
$M_b$	deformační parametr tuhosti mobilizační křivky pro patu
$\sigma_{OR}'$	efektivní geostatické napětí
$\beta$	parametr beta
$\delta$	úhel tření na rozhraní prostředí pilota-zemina
$\varphi_{cv}$	úhel vnitřního tření v kritickém stavu
$K_0^{OC}$	součinitel zemního tlaku v klidu
OCR	součinitel překonsolidace (over consolidation ratio)
$\gamma$	objemová tíha
$\gamma_s$	objemová tíha saturované zeminy
$z$	hloubka
$u$	hydrostatický pórový tlak
MKP	metoda konečných prvků
USF	mezní plášťové tření (ultimate shaft friction)

POP	součinitel překonsolidace (pre-overburden pressuer)
$u_r$	radiální posun
$r_p$	poloměr piloty
RSI	nárůst radiálního tlaku (radial stress increase)
G	smykový modul zeminy
$k_n$	normálová tuhost zemního prostředí
F	zatížení
s	posun mikropiloty
t	čas
CPT	statická penetrační zkouška (cone penetration test)
DPT	dynamická penetrační zkouška (dynamic penetration test)
n	počet úderů
h	hloubka
$V_k$	charakteristické zatížení
$V_d$	návrhové zatížení
$F_p$	zkušební zatížení
1MS	první mezní stav
MP	mikropilota
IT	Ischebeck TITAN
PMpLTO	Piles-Micropiles Load Transfer Method
$L_k$	délka kořene piloty
$L_v$	délka dřívku piloty

## 11 SEZNAM POUŽITÝCH OBRÁZKŮ

Obrázek 2.1 Schéma prvního kroku MPF, [1]	12
Obrázek 2.2 Schéma práce MPF v jednom kroku, [1]	14
Obrázek 3.1 GEWI tyč osazena injektážní hadičkou, dostupné z: DIWIDAG micropiles, <a href="https://www.ebsgeo.com/helical-piles/product-brochures/DYWIDAG_Micropiles.pdf">https://www.ebsgeo.com/helical-piles/product-brochures/DYWIDAG_Micropiles.pdf</a>	18
Obrázek 3.2 Zhotovení vrtané mikropiloty vyztužené GEWI tyčí	19
Obrázek 3.3 Vrtací stroj pro zhotovení mikropilot, dostupné z: <a href="https://www.directindustry.com/prod/beretta-alfredo/product-59184-2225369.html">https://www.directindustry.com/prod/beretta-alfredo/product-59184-2225369.html</a>	20
Obrázek 3.4 Vrtací metoda rotační duplex	20
Obrázek 3.5 Mikropilota Ischebeck TITAN, dostupné z: TITAN micropiles an Innovation prevails, <a href="https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/">https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/</a>	21
Obrázek 3.6 Ztratné vrtné korunky, dostupné z: Geotechnical systems – technical data, <a href="https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/">https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/</a>	22
Obrázek 3.7 Vrtání mikropiloty Ischebeck TITAN, dostupné z: TITAN micropiles an Innovation prevails, <a href="https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/">https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/</a>	23
Obrázek 3.8 Injektáž mikropiloty Ischebeck TITAN, dostupné z: TITAN micropiles an Innovation prevails, <a href="https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/">https://www.ischebeck.de/en/service/downloads/</a>	24
Obrázek 5.1 Tahová zkouška mikropiloty, dostupné z: Static load tests of piles and micropiles, Evaluation of monitoring results, fa Keller, VUT v Brně	29
Obrázek 5.2 Tlaková zkouška mikropiloty, dostupné z: Technischer Bericht Pfahlprüfung, fa Keller	29
Obrázek 5.3 Schéma tlakové zkoušky	29
Obrázek 5.4 Výsledek statické penetrační zkoušky, dostupné z: Static load tests of piles and micropiles, Evaluation of monitoring results, fa Keller, VUT v Brně	32
Obrázek 6.1 Schéma geologického profilu	58
Obrázek 6.2 Schéma geologického profilu IT1 a IT3	65
Obrázek 6.3 Schéma geologického profilu IT2	66

## 12 SEZNAM POUŽITÝCH GRAFŮ

Graf 1 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě MP1, t/F	34
Graf 2 Zatěžovací křivka mikropiloty MP1, F/s	34
Graf 3 Přírůstek posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích mikropiloty MP1, t/Δs	35
Graf 4 Přírůstek posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích mikropiloty MP1, log t/Δs	35
Graf 5 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP1, F/s	36
Graf 6 Zatěžovací krok 230 kN, t/Δs	37
Graf 7 Zatěžovací krok 230 kN, t/(t/Δs)	37
Graf 8 Extrapolovaný zatěžovací krok 230 kN, t/Δs	38
Graf 9 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP1, t/Δs	38
Graf 10 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP1, log t/Δs	39
Graf 11 Extrapolovaná mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s	40
Graf 12 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě MP2, t/F	41
Graf 13 Zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s	41
Graf 14 Přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích mikropiloty MP2, t/Δs	42
Graf 15 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty MP2, log t/Δs	42
Graf 16 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s	43
Graf 17 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP2, t/Δs	44
Graf 18 Extrapolované přírůstky posunů v jednotlivých zatěžovacích krocích MP2, log t/Δs	44
Graf 19 Extrapolovaná a upravená mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2, F/s	45
Graf 20 Záznam dynamické penetrace mikropilot Ischebeck TITAN	48
Graf 21 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě IT1, t/F	49
Graf 22 Zatěžovací křivka mikropiloty IT1, F/s	49
Graf 23 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT1, t/Δs	50
Graf 24 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT1, log t/Δs	50
Graf 25 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT1, F/s	51
Graf 26 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě IT2, t/F	52
Graf 27 Zatěžovací křivka mikropiloty IT2, F/s	52
Graf 28 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT2, t/Δs	53
Graf 29 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT2, log t/Δs	53
Graf 30 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT2, F/s	54
Graf 31 Trvání zatěžovacích kroků na mikropilotě IT3, t/F	55
Graf 32 Zatěžovací křivka mikropiloty IT3, F/s	55
Graf 33 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT3, t/Δs	56
Graf 34 Přírůstky posunů jednotlivých zatěžovacích kroků mikropiloty IT3, log t/Δs	56
Graf 35 Inverzní analýza 0M, MP1, F/s	59
Graf 36 Inverzní analýza 2A, MP1, F/s	59
Graf 37 Inverzní analýza 3M, MP1, F/s	60
Graf 38 Inverzní analýza 0M, MP2, F/s	62
Graf 39 Inverzní analýza 2A, MP2, F/s	62
Graf 40 Inverzní analýza 3M, MP2, F/s	63
Graf 41 Inverzní analýza IT1	66
Graf 42 Inverzní analýza IT2	67
Graf 43 Inverzní analýza IT3	68
Graf 44 Rozdíl v únosnosti při tlakovém a tahovém zatížení	69
Graf 45 Porovnání MZK při změně poměru délky dřívku a kořene	71
Graf 46 Porovnání MZK při změně délky kořene a zachování délky dřívku piloty	72
Graf 47 Porovnání MZK při změně délky dřívku a zachování délky kořene	73



## 13 SEZNAM POUŽITÝCH TABULEK

Tabulka 1 Rovnice hyperbolické přenosové funkce	15
Tabulka 2 Posloupnost zatěžovacích stavů	30
Tabulka 3 Geologický profil mikropilot MP1 a MP2	31
Tabulka 4 Specifikace mikropiloty MP1	33
Tabulka 5 Injektáž mikropiloty MP1	33
Tabulka 6 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP1	39
Tabulka 7 Specifikace mikropiloty MP2	40
Tabulka 8 Injektáž mikropiloty MP2	40
Tabulka 9 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty MP2	45
Tabulka 10 Specifikace mikropilot Ischebeck TITAN	46
Tabulka 11 Posloupnost zatěžovacích kroků	46
Tabulka 12 Geologický profil mikropilot IT1 a IT3	47
Tabulka 13 Geologický profil mikropiloty IT2	47
Tabulka 14 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT1	51
Tabulka 15 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT2	54
Tabulka 16 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT3	57
Tabulka 17 Mezní zatěžovací křivka mikropiloty IT3, F/s	57
Tabulka 18 Schéma geologického profilu	58
Tabulka 19 Parametry 0M, MP1	58
Tabulka 20 Parametry 2A, MP1	60
Tabulka 21 Parametry 3M, MP1	61
Tabulka 22 Parametry 0M, MP2	61
Tabulka 23 Parametry 2A, MP2	63
Tabulka 24 Parametry 3M, MP2	64
Tabulka 25 Shrnutí nejvhodnějších hodnot parametrů	64
Tabulka 26 Schéma geologického profilu IT1 a IT3	65
Tabulka 27 Schéma geologického profilu IT2	66
Tabulka 28 Parametry IT1	67
Tabulka 29 Parametry IT2	68
Tabulka 30 Parametry IT3	69
Tabulka 31 Shrnutí nejvhodnějších hodnot parametrů	70
Tabulka 32 Porovnání únosností při posunu 15 mm	72