



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STAVEBNÍ**

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

**ÚSTAV GEOTECHNIKY**

INSTITUTE OF GEOTECHNICS

**NUMERICKÁ ANALÝZA STABILITY PAŽÍCÍ  
KONSTRUKCE V SOUDRŽNÝCH ZEMINÁCH**

NUMERICAL ANALYSIS OF STABILITY OF RETAINING STRUCTURE IN COHESIVE  
SOILS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Aneta Fejfarová**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. JURAJ CHALMOVSKÝ, Ph.D.**

**BRNO 2020**



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

## FAKULTA STAVEBNÍ

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

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student	Aneta Fejfarová
Název	Numerická analýza stability pažící konstrukce v soudržných zeminách
Vedoucí práce	Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.
Datum zadání	30. 11. 2019
Datum odevzdání	22. 5. 2020

V Brně dne 30. 11. 2019

---

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

---

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

## **PODKLADY A LITERATURA**

- HULLA, J.; TURČEK, P. Zakladanie stavieb. 2004.
- Recommendations on Excavations EAB.
- POTTS, David M.; ZDRAVKOVIC, Lidija; ZDRAVKOVIĆ, Lidija. Finite element analysis in geotechnical engineering: theory. Thomas Telford, 1999.
- POTTS, David M.; ZDRAVKOVIC, Lidija; ZDRAVKOVIĆ, Lidija. Finite element analysis in geotechnical engineering: application. Thomas Telford, 2001.
- POTTS, David. Guidelines for the use of advanced numerical analysis. Thomas Telford, 2002.

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

## **ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ**

Náplní bakalářské práce je provedení numerické analýzy stavební jámy zhotovené v prostředí málo propustných soudržných zemin, se zaměřením se na první mezní stav. Součástí numerické analýzy bude konsolidační výpočet, což umožní posouzení konstrukce v různých podmínkách: od krátkodobých (neodvodněných) až po dlouhodobé (odvodněné) podmínky. Cílem práce je ozřejmit časový průběh stupně stability s ohledem na plánovanou dobu výstavby a životnosti pažící konstrukce.

## **STRUKTURA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE**

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Bakalářská práce se zabývá numerickým modelováním stavební jámy pomocí metody konečných prvků v programu Plaxis 2D. Trojnásobně kootvená pažící stěna je založená v málo propustných soudržných zeminách. V teoretické části práce je popsána ztráta stability, typy výpočtů a materiálový model (Hardenig soil model používaný v matematickém modelu).

Praktická část se zabývá vytvořením matematického modelu stavební jámy. Konkrétně se zaměřuje na první mezní stav. Součástí práce je vyhodnocení stupně stability v čase, pórových tlaků a kritických smykových ploch.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Numerické modelování, metoda konečných prvků, Plaxis 2D, materiálový model, Hardening soil model, první mezní stav, stavební jáma, pažící konstrukce, stupeň stability, odvodněné podmínky, neodvodněné podmínky, konsolidace, ustálené proudění, kritická smyková plocha

## **ABSTRACT**

The bachelor thesis deals with numerical modeling of excavation using finite element method in the Plaxis 2D software. Triple-anchored retaining structure is founded in a less permeable cohesive soils. There are described loss of stability, types of the calculation and material model (Hardenig soil model used in the mathematical model) in the theoretical section of this bachelor thesis.

Mathematical model of the excavation was described in the practical section of this thesis, specifically first limit state. Part of the thesis is an evaluation of the degree of stability over time, pore pressures and critical shear surfaces.

## **KEYWORDS**

Numerical modeling, finite element method, Plaxis 2D, material model, Hardening soil model, first limit state, excavation , retaining structure, degree of stability, drained condition, undrained condition, consolidation, steady state groundwater flow, critical shear surface

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

Aneta Fejfarová *Numerická analýza stability pažící konstrukce v soudržných zeminách*. Brno, 2020. 41s., 1s. příl. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky. Vedoucí práce Ing. Juraj Chalmovský, Ph.D.

## **PROHLÁŠENÍ O PŮVODNOSTI ZÁVĚREČNÉ PRÁCE**

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem *Numerická analýza stability pažící konstrukce v soudržných zeminách* zpracoval(a) samostatně a že jsem uvedl(a) všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 22. 5. 2020

---

Aneta Fejfarová  
autor práce

## **Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy závěrečné práce**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané bakalářské práce s názvem *Numerická analýza stability pažící konstrukce v soudržných zeminách* je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 22. 5. 2020

---

Aneta Fejfarová  
autor práce

## **PODĚKOVÁNÍ**

Ráda bych poděkovala svému vedoucímu práce panu Ing. Juraji Chalmovskému PhD. za ochotu a čas strávený konzultacemi, cenné rady, poskytnuté materiály, trpělivost a neskutečný entuziasmus v průběhu řešení této práce. Ráda bych také poděkovala firmě Keller Speciální zakládání, za poskytnuté materiály, díky kterým bylo možné tuto práci zpracovat.



## Obsah

1	Úvod .....	11
2	Analyzovaná stavební jáma .....	11
2.1	Poloha stavební jámy.....	11
2.2	Inženýrsko-geologické poměr.....	12
2.3	Technické řešení.....	15
3	Použité metody řešení a aplikovaný matematický model .....	17
3.1	Vnitřní a vnější stabilita pažících konstrukcí..... <b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
3.2	Typ výpočtu .....	17
3.2.1	$K_0$ loading .....	17
3.2.2	Plastic .....	17
3.2.3	Consolidation .....	17
3.2.4	Safety.....	17
3.3	Dráhy napětí .....	<b>Chyba! Záložka není definována.</b>
3.4	Materiálový model - Hardening soil model (HS).....	18
4	Popis sestaveného matematického modelu, výpočetní fáze <b>Chyba! Záložka není definována.</b>	
4.1	Vstupní parametry zemin pro HS model .....	20
4.2	Geometrie modelu .....	21
4.2.1	Okrajové podmínky a rozměry modelu.....	21
4.2.2	Strukturní prvky.....	22
4.3	Sít konečných prvků .....	24
4.4	Hydraulické podmínky .....	25
4.5	Fáze výstavby .....	25
4.6	Postup výpočtu .....	27
5	Výsledky výpočtů a jejich zhodnocení .....	28
5.1	Výsledky stupně stability v čase.....	28
5.2	Výsledné pórové tlaky.....	29
5.2.1	Krátkodobé podmínky – Modely A1, A2 .....	29
5.2.2	Konsolidační analýza – Modely B1, B2.....	30
5.2.3	Dlouhodobé podmínky – Modely C1, C2 .....	32
5.3	Výsledné smykové plochy .....	32
5.4	Ověření smykové plochy .....	33

5.5	Zanedbání vztlaku pod dnem stavební jámy .....	35
6	Závěr.....	37
	Seznam použitých tabulek .....	38
	Seznam použitých obrázků .....	38
	Seznam použitých zdrojů .....	39
	Seznam použitých zkratk.....	40
	Seznam odkazů na elektronické zdroje.....	40
	Seznam příloh.....	42
	PŘÍLOHA X – GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ ZÁKLADNÍCH FÁZÍ VÝPOČTU .....	42

-

# 1 Úvod

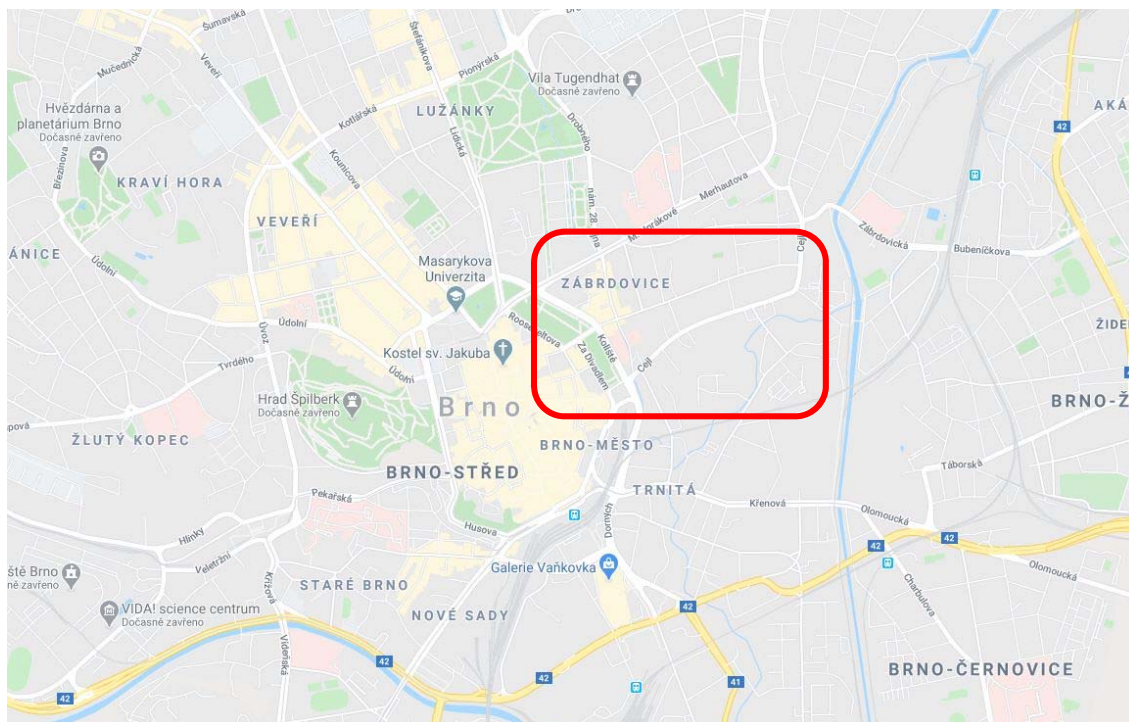
Stavební jámy jsou nedílnou součástí zakládání staveb. S ubývajícím prostorem na výstavbu a zároveň zvyšujícími se nároky, je zapotřebí využití moderních metod návrhu těchto konstrukcí. Jednou z těchto metod je i metoda konečných prvků.

Cílem bakalářské práce je ozřejmit časový průběh stupně stability na zadané stavební jámě, s ohledem na plánovanou dobu výstavby a životnosti pažící konstrukce. Stavební jáma se nachází ve složitých geologických podmínkách, kterými jsou málo propustné soudržné zeminy. Náplní práce je především sestavení odpovídajícího matematického modelu a provedení numerické analýzy se zaměřením na první mezní stav. Součástí numerické analýzy bude konsolidační výpočet, který umožní posouzení konstrukce za různých podmínek. Matematický model zohlední krátkodobé (neodvodněné) i dlouhodobé (odvodněné) podmínky v různých fázích výstavby. Numerická analýza bude provedena v programu Plaxis 2D.

## 2 Analyzovaná stavební jáma

### 2.1 Poloha stavební jámy

Stavební jáma se nachází v centru Brna, přesněji v Zábrdovicích. Umístění stavební jámy v centru Brna indikuje, že bude pravděpodobně součástí městské zástavby, což nám nepřímo potvrzuje zvolený způsob zajištění stavební jámy pomocí kotvené převrtávané pilotové stěny. Nadmořská výška v místě stavby je 202,60 m. n. m. Zadaná konstrukce je v tuto chvíli ve fázi realizace, a proto její přesné umístění zde nebude zmíněno.



Obr. 2-1: Mapa Brna s přibližným umístěním stavební jámy (zdroj google.cz/maps)

## 2.2 Inženýrsko-geologické poměry

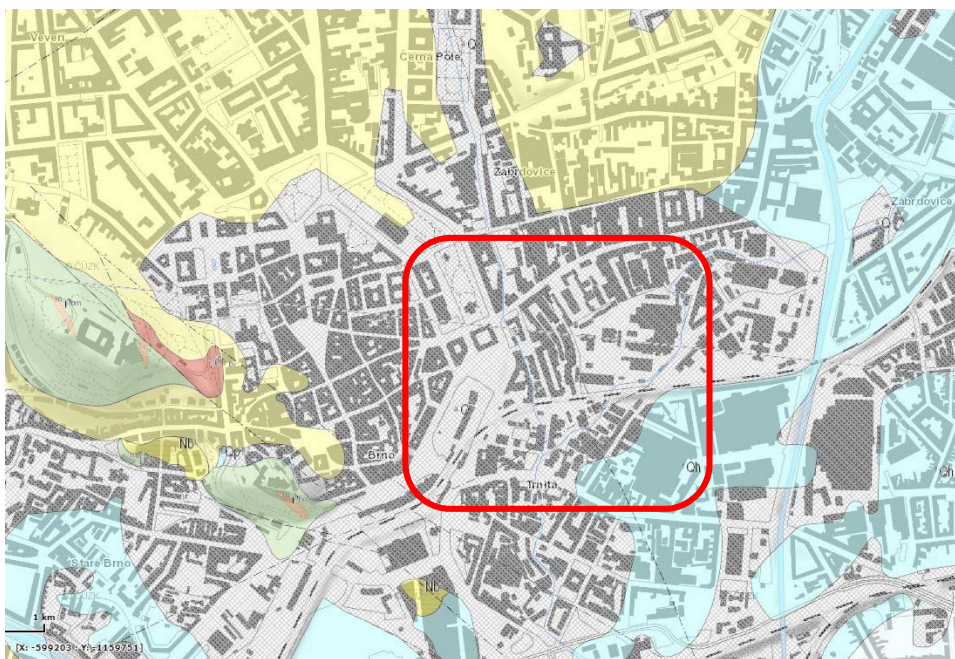
Přehled zemin v geologickém profilu byl převzat z inženýrsko-geologického průzkumu zpracovaného pro stavební jámu na ulici Křenová. Geologický profil zahrnuje následující mocnosti:

Tab. 2-1: Přehled zemin v geologickém profilu na ulici Křenová















Vrstva	Označení	Mocnost [m]
Antropogenní navážka	Y	1,5
Jílovité hlíny	Cl	5,2
Zahliněný písek se štěrkem	G-F	3
Neogenní jíl	CH	-

Tab. 2-2: Směrné normové charakteristiky

Jílovité hlíny	Zahliněný písek se štěrky	Neogenní jíly
Měkká konzistence	$E_{oed} = 35-50 \text{ MPa}$	Tuhá a pevná konzistence
$E_{oed} = 2-6 \text{ MPa}$	$\varphi_{ef} = 35-36^\circ$	$E_{oed} = 8-10 \text{ MPa}$
$c_u = 0,02-0,005 \text{ MPa}$	$\rho_n = 1800-1900 \text{ kg/m}^3$	$c_u = 0,06-0,08 \text{ MPa}$
$\varphi_u = 0^\circ$	$I_D = 0,6$	$\varphi_u = 0-3^\circ$
$c_{ef} = 0,004-0,01 \text{ MPa}$	$R_{dt} = 250-400 \text{ kPa}$	$c_{ef} = 0,06 \text{ MPa}$
$\varphi_{ef} = 15-17^\circ$	Propustnost - $n \cdot 10^{-4} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$	$\varphi_{ef} = 14^\circ$
$\nu = 0,40$		$\nu = 0,41$
$\beta = 0,47$		$\beta = 0,37$
$\rho_n = 2100 \text{ kg/m}^3$		$\rho_n = 2050 \text{ kg/m}^3$
$R_{dt} = 50-100 \text{ kPa}$		$R_{dt} = 100-120 \text{ kPa}$
Propustnost - $n \cdot 10^{-6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$		Propustnost - $n \cdot 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

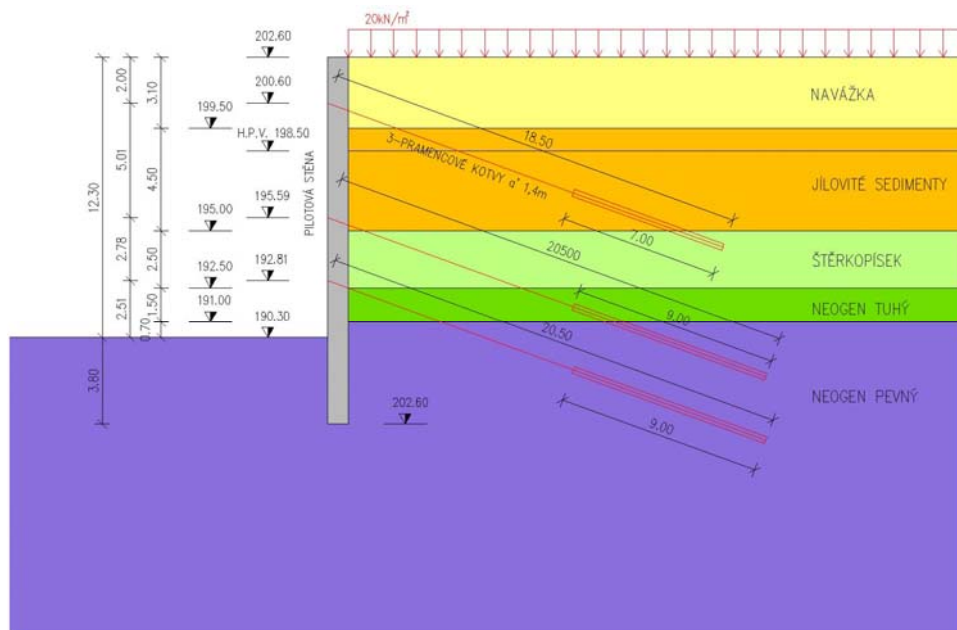


Obr. 2-2: Geologická mapa 1:25 000 (zdroj: geology.cz)

	<sup>t</sup> Qh	fluviální hlinitopísčité sedimenty, místy štěrkovité		<sup>a</sup> Q	antropogenní uloženiny nerozlišené
	<sup>a</sup> Qp <sup>3</sup>	spraše a sprašové hlíny		Qh	splachové písčitohlinité sedimenty
	<sup>j</sup> Nb <sup>1</sup>	šedé vápnité jíly		<sup>f</sup> Qp <sup>1b</sup>	fluviální písčité štěrky (nižší úroveň)
	gd b <sub>ov</sub>	středně až hrubě zrnitý biotitický granodiorit		<sup>f</sup> Qp <sup>2b</sup>	fluviální písčité štěrky (střední úroveň)
	i	aplit až pegmatit		<sup>x</sup> D <sub>ok</sub>	bazální klastické sedimenty: křemenné, místy oligomiktní slepence
	<sup>e</sup> Nb <sup>1</sup>	štěrky a písky		<sup>m</sup> r <sub>om</sub>	metaryolit, kyselý až intermediální metatuf
	<sup>es</sup> Qp <sup>3</sup>	sprašové hlíny s příměsí svahovin		<sup>f</sup> Qp <sup>1-2</sup>	fluviální písčité štěrky
	<sup>m</sup> b <sub>om</sub>	metabazalt, zelená břidlice		<sup>p</sup> <sup>s</sup> Q	svahové písčitohlinité až hlinitopísčité sedimenty

Obr. 2-3: Legenda geologické mapy (zdroj: geology.cz)

Součástí zadání práce byl přibližný inženýrsko-geologický řez v místě stavební jámy.



Obr. 2-4: Inženýrsko-geologický řez

### 2.3 Technické řešení stavební jámy

Návrh zajištění stavební jámy byl součástí zadání práce. Zajištění stavební jámy tvoří kotvená pažící stěna, vytvořená z převrtávaných pilot. Hloubka stavební jámy je 12,3 m. Stěna je kotvená zemními kotvami ve třech úrovních. Osová vzdálenost sekundárních pilot je 1,4. Pilotová stěna je vetknuta 3,80 m pod dno stavební jámy. Hladina podzemní vody se nachází 4,10 m pod upraveným terénem.

#### Pilotová stěna:

Převrtávaná pilotová stěna

Beton C 30/37,  $E_c = 30$  GPa

Hloubka paty: 12,30 m

Průměr piloty: 0,9 m

#### Zemní pramencové kotvy

Ve všech úrovních: Předpjaté pramencové kotvy 3 x Lp 15,5; 1620/1800

Osová vzdálenost kotev:  $B_k = 1,4$  m

Modul pružnosti táhla:  $E_s = 200$  GPa

Modul pružnosti kořene kotvy:  $E_c = 25 \text{ GPa}$

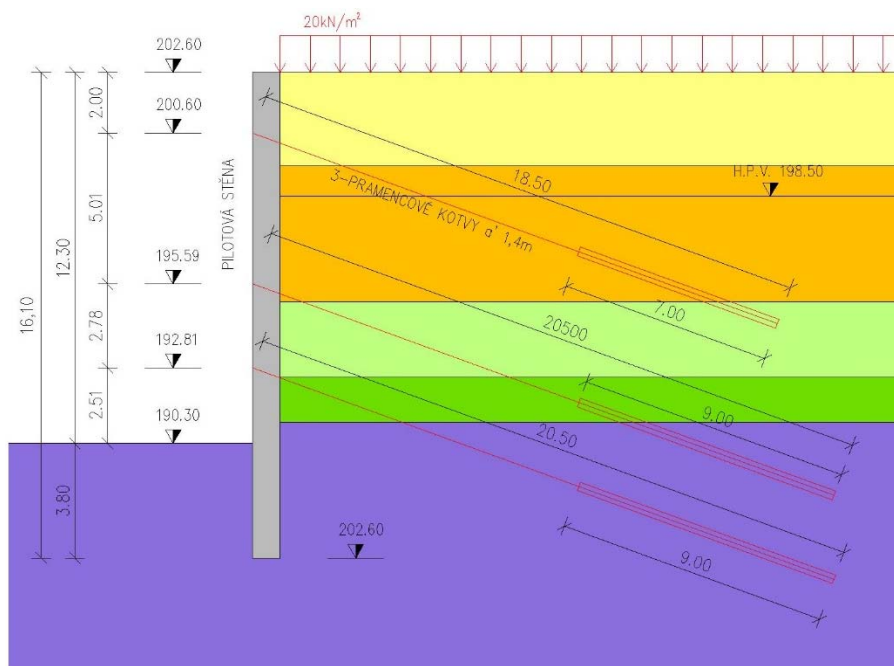
Průměr kořene kotvy:  $d = 0,2 \text{ m}$

Vnější únosnost kořene kotvy:

- 1. úroveň:  $P_{k,max} = 150 \text{ kN/m}$
- 2. úroveň:  $P_{k,max} = 115 \text{ kN/m}$
- 3. úroveň:  $P_{k,max} = 115 \text{ kN/m}$

Tab. 2-3 Geometrické vlastnosti kotev a předpínací síly

Kotevní úroveň	Kotvení [m.n.m.]	Volná délka	Délka kořene $L_k$ [m]	Úhel $\alpha$ [°]	Předpínací síla $F_{prestress}$ [kN]
1	200.60	11.50	7	20	400
2	195.59	11.50	9	20	490
3	192.81	11.50	9	20	590



Obr. 2-5 Řez stavební jámou vycházející ze zadání



## **3 Použité metody řešení a aplikovaný matematický model**

### **3.1 Typ výpočtu**

#### **3.1.1 $K_0$ loading**

V počátečních podmínkách byl využit typ výpočtu  $K_0$  loading, vhodný pro rovinný terén se souběžnými geologickými vrstvami.

#### **3.1.2 Plastic**

Pro krátkodobé a dlouhodobé podmínky byl zvolen výpočet typu Plastic. Tento typ výpočtu neuvažuje se změnou pórových tlaků v čase, nedochází k disipaci pórových tlaků. Používá se pro neodvodněnou (krátkodobou) analýzu se zadaným neodvodněným chováním materiálu (Undrained A, Undrained B, Undrained C). Používá se také pro odvodněnou (dlouhodobou) analýzu se zadaným odvodněným chováním materiálu (Drained).

#### **3.1.3 Consolidation**

Výpočet typu consolidation byl použit pro získání co nejreálnějšího průběhu výstavby. Tento typ výpočtu uvažuje s vývojem pórových tlaků průběhu výstavby a umožňuje disipaci zvýšených pórových tlaků.

#### **3.1.4 Safety**

Výpočet typu „Safety“ se využívá v matematickém modelu pro stanovení vnější a vnitřní stability pažící konstrukce a stupně stability. Pro získání stupně stability se využívá metoda Redukce parametrů smykové pevnosti. Vstupní parametry smykové pevnosti  $\phi$  a  $c$  jsou v průběhu výpočtu redukovány až do fáze před kolapsem. Hodnota  $\Sigma M_{SF}$  (safety factor multiplier) řídí postupné snižování pevnostních parametrů. Na začátku výpočtu je hodnota  $\Sigma M_{SF} = 1$  a postupně se během výpočtu snižuje v předem zadaném počtu kroků.

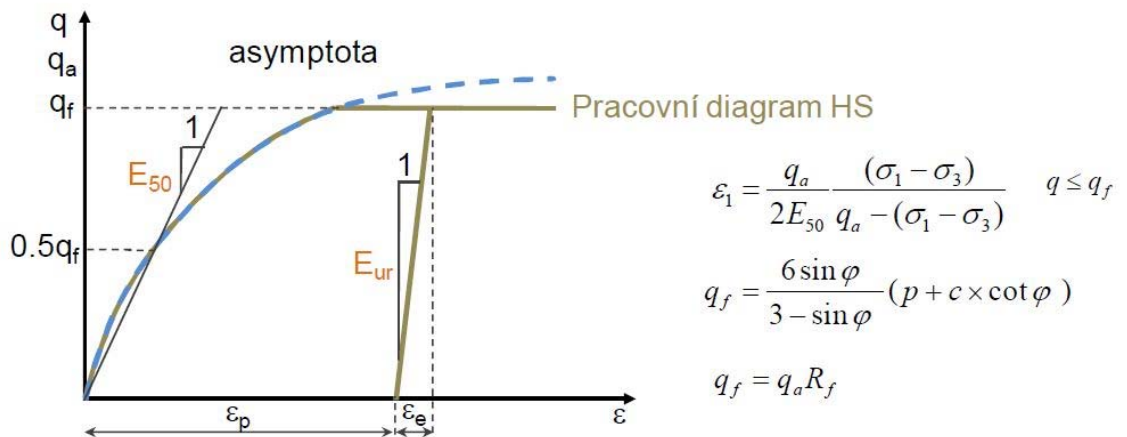
$$\Sigma MSF = \frac{\tan(\varphi_d)}{\tan(\varphi_f)} = \frac{c_d}{c_f} \quad (3-1)$$

Stupeň stability lze poté zapsat jako:

$$SF = \frac{\text{pevnost materiálu}}{\text{pevnost při poruše}} = \Sigma MSF \quad (3-2)$$

### 3.2 Materiálový model - Hardening soil model (HS)

HS model patří do skupiny elasto-plastických materiálových modelů, je to pokročilý materiálový model, který eliminuje nedostatky Mohr-Coulombova materiálového modelu. Základním znakem je hyperbolický pracovní diagram s Mohr-Coulombovou podmínkou porušení definující maximální hodnotu deviátoru napětí  $q_f$ . Toto napětí je závislé na pevnostních parametrech zeminy. Asymptota hyperboly se blíží k hodnotě  $q_a$ . Sečna protíná hyperbolickou část v bodě  $0,5q_f$  a její úhel odklonu od horizontály je dán tangentou s hodnotou sečnového modulu tuhosti  $E_{50}$ . Součástí zatěžovací křivky je i větev odlehčení a opětovného přitížení, která je elastická, charakterizuje jí modul pružnosti  $E_{ur}$ . Zatěžovací křivka pracovního diagramu je elasto-plastická. Už při malém zatížení nastávají plastické deformace. Plocha plasticity, u HS modelu, která matematicky popisuje přetvárné deformace, se dělí na smykovou a objemovou. Obě plochy jsou posuvné, postihnou tedy důležitý faktor chování zemin, zpevnování materiálu („hardening“) při zvyšování napětí. HS model zahrnuje závislost tuhosti zeminy na hloubce a na působícím napětí.



Obr. 3-1: Pracovního diagram HS modelu

### Přehled vstupních parametrů:

Pevnostní parametry:

- Úhel vnitřního tření  $\varphi'$
- Koheze  $c'$
- Úhel dilatance  $\psi$

Deformační parametry:

- Sečnový referenční modul z triaxiální zkoušky  $E_{50}^{ref}$
- Tečnový referenční modul z edometrické zkoušky  $E_{oed}^{ref}$
- Odtěžovací / znovu přitěžovací modul pružnosti  $E_{ur}^{ref}$
- Poissonovo číslo pro odtížení / opětovné přitížení  $\nu_{ur}$

Ostatní parametry:

- Exponent řídící závislost deformačních charakteristik na napětí  $m$
- Referenční napětí  $p_{ref}$
- Součinitel zemního tlaku pro normální konsolidaci  $K_0^{NC}$
- Historie zatěžování (OCR/POP)

## 4 Výpočetní model

### 4.1 Vstupní parametry zemín pro HS model

Vstupní parametry pro aplikaci HS modelu nebyly k dispozici, proto jsou k jejich stanovení použita níže uvedená doporučení. Parametry pro neogenní jíly jsou převzaty z publikace Numerická analýza pažících jam (MIČKA L.). Pro Variantu 1 byly parametry smykové pevnosti  $\varphi$  a  $c$  pro neogenní jíly tuhé i pevné zvoleny počátečním inženýrským odhadem. Varianta 2 vychází z hodnot parametrů smykové pevnosti získaných z Laboratorních zkoušek mechaniky zemín ulice Křenová.

$$E_{50}^{ref} = E_{oed}^{ref} = E' \quad (4-1)$$

$$E_{ur}^{ref} = 3 \times E_{50}^{ref} \quad (4-2)$$

$$K_0 = (1 - \sin \varphi') \quad (4-3)$$

Tab. 4-1: Hodnoty parametrů pro jednotlivé zeminy – Varianta 1

Zemina	Navážka	Jílové sedimenty	Štěrkopísek	Neogen tuhý	Neogen pevný
Podmínky	Odvodněné	Odvodněné	Odvodněné	Neodvod. typu A	Neodvod. typu A
$\gamma_{unsat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	16	16	17	16	16
$\gamma_{sat}$ [kN/m <sup>3</sup> ]	20	20	20	18	18
$E_{50}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	18. 10 <sup>3</sup>	2,0. 10 <sup>4</sup>	3,0. 10 <sup>4</sup>	11,86. 10 <sup>3</sup>	11,86. 10 <sup>3</sup>
$E_{oed}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	18. 10 <sup>3</sup>	2,0. 10 <sup>4</sup>	3,0. 10 <sup>4</sup>	11,86. 10 <sup>3</sup>	11,86. 10 <sup>3</sup>
$E_{ue}^{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	54. 10 <sup>3</sup>	6,0. 10 <sup>4</sup>	9,0. 10 <sup>4</sup>	36,17. 10 <sup>3</sup>	36,17. 10 <sup>3</sup>
$m$ [-]	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
$\nu_{ur}$ [-]	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
$p_{ref}$ [kN/m <sup>2</sup> ]	100	100	100	100	100
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]	5	8	0	<b>10</b>	<b>20</b>
$\varphi'$ [°]	17	20	31	<b>23</b>	<b>23</b>
$\Psi$ [°]	0	0	0	0	0
$K_0$ [-]	0,707	0,657	0,484	0,609	0,609
$k_x$ [m/den]	8,64	8,64	8,64	8,64. 10 <sup>-4</sup>	8,64. 10 <sup>-4</sup>
$k_y$ [m/den]	8,64	8,64	8,64	8,64. 10 <sup>-4</sup>	8,64. 10 <sup>-4</sup>
OCR	1	1	1	1	1

Tab. 4-2: Hodnoty parametrů pro jednotlivé zeminy – Varianta 2

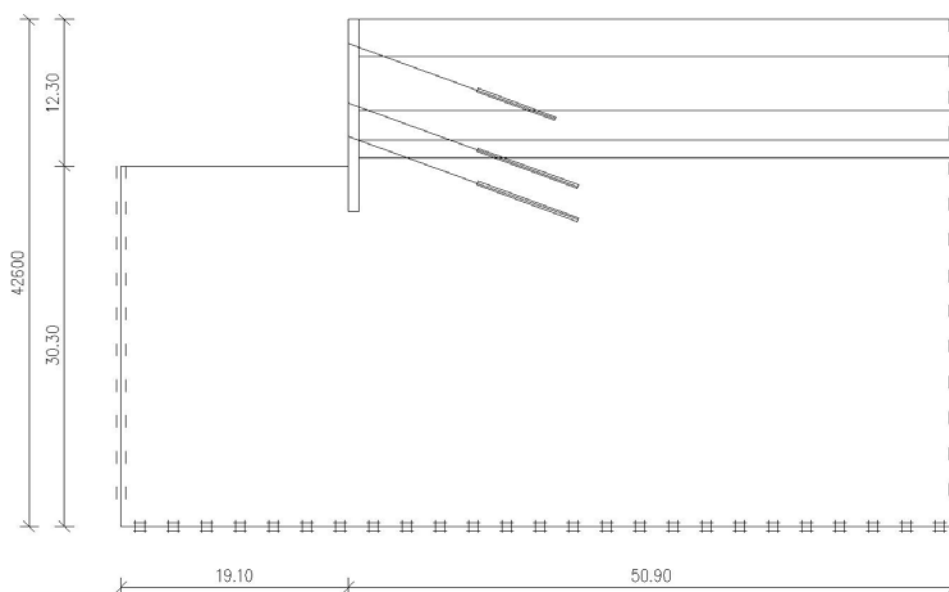
Zemina	Navážka	Jílové sedimenty	Štěrkopísek	Neogen tuhý	Neogen pevný
Podmínky	Viz parametry z Tab. X-Y	Viz parametry z Tab. X-Y	Viz parametry Tab. X-Y	Neodvod. typu A	Neodvod. typu A
$\gamma_{\text{unsat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]				16	16
$\gamma_{\text{sat}}$ [kN/m <sup>3</sup> ]				18	18
$E_{50}^{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]				$11,86 \cdot 10^3$	$11,86 \cdot 10^3$
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]				$11,86 \cdot 10^3$	$11,86 \cdot 10^3$
$E_{\text{ue}}^{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]				$36,17 \cdot 10^3$	$36,17 \cdot 10^3$
$m$ [-]				0,5	0,5
$v_{\text{ur}}$ [-]				0,2	0,2
$p_{\text{ref}}$ [kN/m <sup>2</sup> ]				100	100
$c'$ [kN/m <sup>2</sup> ]				<b>15</b>	<b>20</b>
$\varphi'$ [°]				<b>26</b>	<b>26</b>
$\Psi$ [°]				0	0
$K_0$ [-]				0,609	0,609
$k_x$ [m/den]				$8,64 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$
$k_y$ [m/den]				$8,64 \cdot 10^{-4}$	$8,64 \cdot 10^{-4}$
OCR				1	1

## 4.2 Geometrie modelu

Mocnosti jednotlivých vrstev a úroveň hladiny podzemní vody byly převzaty ze zadání práce.

### 4.2.1 Okrajové podmínky

V modelu jsou použity standardní deformační okrajové podmínky, u spodní hrany je zabráněno horizontálnímu i vertikálnímu posunutí (total fixities), u bočních hran je zabráněno posunutí v horizontálním směru (horizontal fixities).

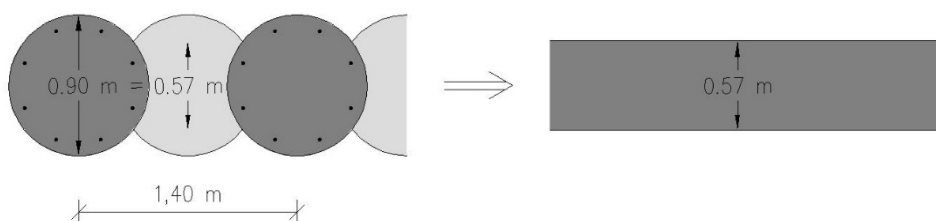


Obr. 4-1: Hranice modelu a okrajové podmínky

#### 4.2.2 Strukturní prvky

**Zemina** – modelována pomocí plošného prvku – uzavřeného polygonu „soil polygon“, definovaného jednotlivými body. K vytvořené ploše lze přiřadit konkrétní nadefinovanou zeminu.

**Pilotová stěna** – modelována pomocí strukturního prvku „plate“. Model v Plaxisu předpokládá kontinuální obdélníkový průřez, byla proto zadána náhradní tloušťka stěny viz Obr. 4-2.



Obr. 4-2: Půdorys převrtávané pilotové stěny

Tab. 4-3: Materiálové vlastnosti pilotové stěny (Plate)

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Plocha	A	0,57	m <sup>2</sup>
Modul pružnosti	E	30. 10 <sup>6</sup>	kN/m
Poissonovo číslo	$\nu$	0,15	-
Moment setrvačnosti	I	0,0154	m <sup>4</sup>
Osová tuhost	EA	17,1. 10 <sup>6</sup>	kN/m
Ohybová tuhost	EI	46,3. 10 <sup>3</sup>	kN m <sup>2</sup> /m

**Předpjaté pramencové kotvy** – pro zjednodušení modelování se hlava kotvy neuvažuje a bod zakotvení je uvažován přímo v líci pilotové stěny. Táhlo kotvy je modelováno pomocí strukturního prvku „node-to-node anchor“. Prvek vytváří pružinu mezi dvěma uzly modelu. Základ tvoří izoparametrický 2 uzlový prvek. Posunutí je po délce interpolováno tvarovými funkcemi prvního řádu (lineárně). Kořen kotvy je vytvořen strukturním prvkem „embeded beam row“. Pro 15-uzlové konečné prvky je prutový prvek 5-uzlový se třemi stupni volnosti v každém uzlu, přenáší zatížení osovými silami, příčnými silami a ohybovým momentem. Zároveň umožňuje přenos zatížení plášťovým třením pomocí kontaktních prvků.

Tab. 4-4: Vlastnosti táhla kotvy (Node-to-node anchor)

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	200. 10 <sup>6</sup>	kN/m
Plocha	A	4,5. 10 <sup>-4</sup>	m <sup>2</sup>
Osová tuhost	EA	90. 10 <sup>3</sup>	kN
Vzdálenost kotev	L <sub>spacing</sub>	1,40	m

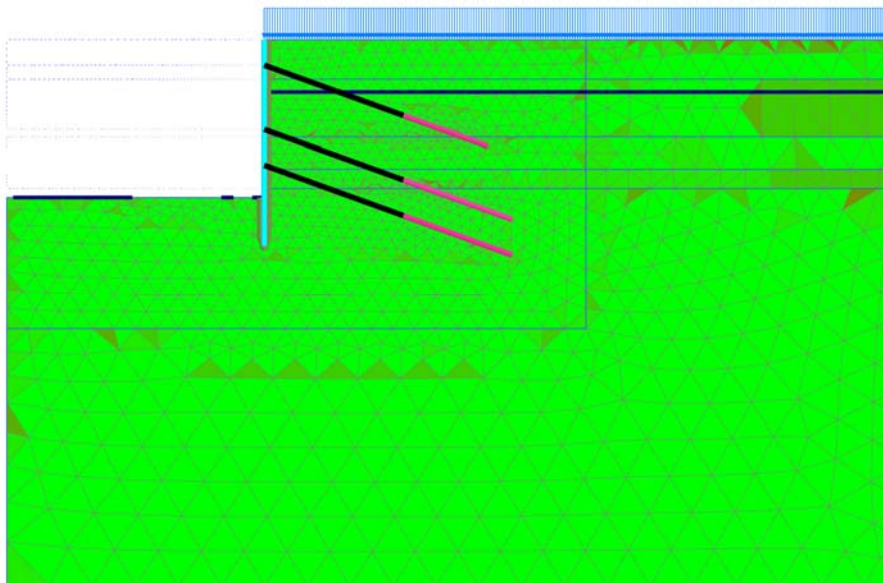
Tab. 4-5: Vlastnosti kořene kotvy (Embedded beam row)

Parametr	Označení	Hodnota	Jednotky
Modul pružnosti	E	25. 10 <sup>6</sup>	kN/m
Průměr	D	0,20	m
Vzdálenost kotev	L <sub>spacing</sub>	1,40	kN
Únosnost na plášti 1. kotevní úroveň	T <sub>skin,start,max</sub>	150	kN/m
	T <sub>skin,end,max</sub>	150	kN/m
Únosnost na plášti 2. kotevní úroveň	T <sub>skin,start,max</sub>	115	kN/m
	T <sub>skin,end,max</sub>	115	kN/m
Únosnost na plášti 3. kotevní úroveň	T <sub>skin,start,max</sub>	115	kN/m
	T <sub>skin,end,max</sub>	115	kN/m

Vnější zatížení – modelováno pomocí strukturního prvku „create line load“. Hodnota zatížení 20 kN/m.

### 4.3 Síť konečných prvků

Pro diskretizaci kontinua byly použity 15-uzlové trojúhelníkové konečné prvky. Program Plaxis 2D generuje síť konečných prvků automaticky pomocí příkazu Mesh, Rozdělení prvků sítě byla definováno na střední stupeň hustoty sítě „Medium“ a v okolí konstrukce, kde jsou očekávány největší posuny, byla síť zhuštěna. Generovaná síť konečných prvků obsahovala 3046 prvků a 24989 uzlů.

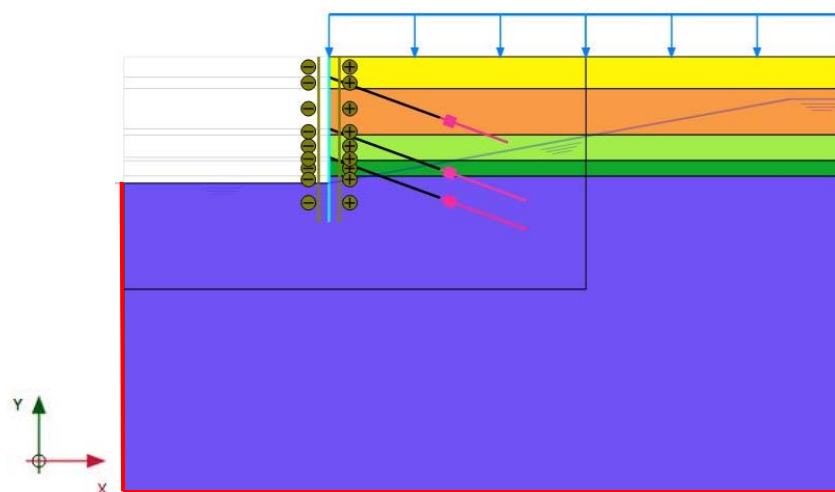


Obr. 4-3: Síť konečných prvků



## 4.4 Hydraulické podmínky

Přítomnost hladiny podzemní vody sahající do úrovně 4,10 m pod upravený terén vyžadovala zohlednění hydraulických podmínek, které jsou zobrazeny na Obr. 4-4.



Obr. 4-4: Hydraulické podmínky, zelená – „seepage“, červená – „close“

## 4.5 Fáze postupu výstavby

Výpočet modelu byl rozčleněn do osmi základních fází zobrazených v Tab. 4-6, fáze na sebe vzájemně navazují, čímž je snaha simulovat postup výstavby stavební jámy. Grafické zobrazení základních fází je zařazeno v příloze 1.

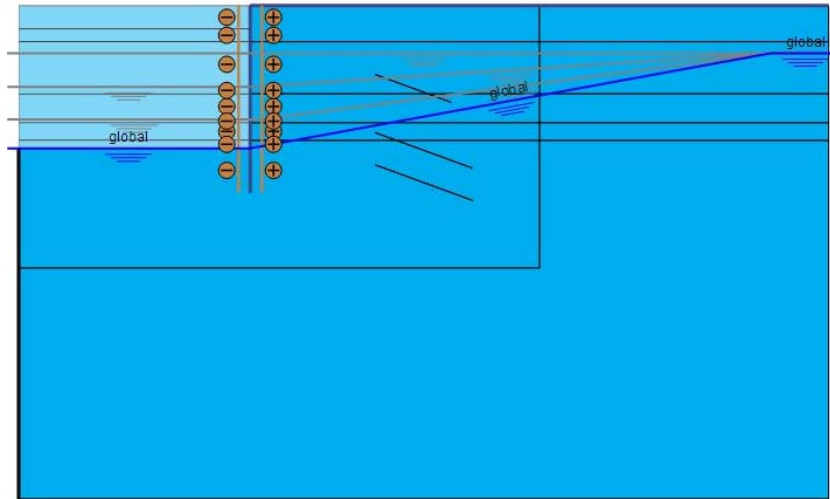
Tab. 4-6: Fáze výstavby pro dlouhodobé a krátkodobé podmínky

Fáze	Název fáze	Typ výpočtu
0	Initial phase	$K_0$ procedure
1	Instalace stěny a aktivace zatížení	Plastic
2	Odkop zeminy na 1. kotevní úroveň	Plastic
3	Osazení a aktivace kotev v 1. kotevní úrovni	Plastic
4	Odkop zeminy na 2. kotevní úroveň	Plastic
5	Osazení a aktivace kotev v 2. kotevní úrovni	Plastic
6	Odkop zeminy na 3. kotevní úroveň	Plastic
7	Osazení a aktivace kotev v 3. kotevní úrovni	Plastic
8	Odkop zeminy na dno stavební jámy	Plastic
9	Stabilitní analýza	Safety

Tab. 4-7: Fáze výstavby pro konsolidační výpočet

Číslo fáze	Název fáze	Typ výpočtu	Délka fáze [den]
0	Initial phase	Gravity loading	-
1	Instalace stěny a aktivace zatížení	Plastic	-
2	Odkop zeminy na 1. kotevní úroveň	Consolidation	20
3	Osazení a aktivace kotev v 1. kotevní úrovni	Plastic	-
4	Odkop zeminy na 2. kotevní úroveň	Consolidation	20
5	Osazení a aktivace kotev v 2. kotevní úrovni	Plastic	-
6	Odkop zeminy na 3. kotevní úroveň	Consolidation	20
7	Osazení a aktivace kotev v 3. kotevní úrovni	Plastic	-
8	Odkop zeminy na dno stavební jámy	Consolidation	20
9	Stabilitní analýza	Safety	-
9a	2 měsíce po dokončení fáze 8	Consolidation	60
10a	Stabilitní analýza fáze 9a	Safety	-
9b	4 měsíce po dokončení fáze 8	Consolidation	120
10b	Stabilitní analýza fáze 10a	Safety	-
11a	6 měsíců po dokončení fáze 8	Consolidation	180
11b	Stabilitní analýza fáze 11a	Safety	-
12a	95% konsolidace	Consolidation	-
12b	Stabilitní analýza fáze 12a	Safety	-

Typ výpočtu pórových tlaků byl pro fázi 0-3 zvolen jako „Phreatic“. Druhá kotevní úroveň (fáze 4) je již pod hladinou podzemní vody. Hladina podzemní vody byla jednotlivých odkopech snižována až na dno stavební jámy (Obr. 4-5). Od Fáze 4 je tedy typ výpočtu pórových tlaků nastaven jako ustálené proudění tedy „Steady state groundwater flow“.



Obr. 4-5: Snižování hladiny podzemní vody v průběhu výstavby

## 4.6 Postup výpočtu

Bylo spočítáno 6 základních modelů A1, A2, B1, B2, C1, C2 (Tab. 4-8), které byly rozděleny do dvou variant podle zadaných vstupních parametrů. V každé skupině proto byl vždy jeden model s krátkodobými podmínkami, s konsolidační analýzou a dlouhodobými podmínkami. Zadané podmínky a zadaný čas v konsolidační analýze umožnili Variantu 1 a Variantu 2 porovnat mezi sebou.

Tab. 4-8: Přehled analyzovaných modelů

Označení modelu	Parametry smykové pevnosti	Podmínky
A1	Varianta 1	Krátkodobé (odvodněné)
A2	Varianta 2	Krátkodobé (odvodněné)
B1	Varianta 1	Konsolidační
B2	Varianta 2	Konsolidační
C1	Varianta 1	Dlouhodobé (neodvodněné)
C2	Varianta 2	Dlouhodobé (neodvodněné)
D1	Varianta 1	Dlouhodobé (neodvodněné)
D2	Varianta 2	Dlouhodobé (neodvodněné)
E1	Varianta 1	Krátkodobé (odvodněné)
E2	Varianta 2	Krátkodobé (odvodněné)
A1-1	Varianta 1	Krátkodobé (odvodněné)
A1-2	Varianta 1	Krátkodobé (odvodněné)
A1-4	Varianta 1	Krátkodobé (odvodněné)

## 5 Výsledky výpočtů a jejich zhodnocení

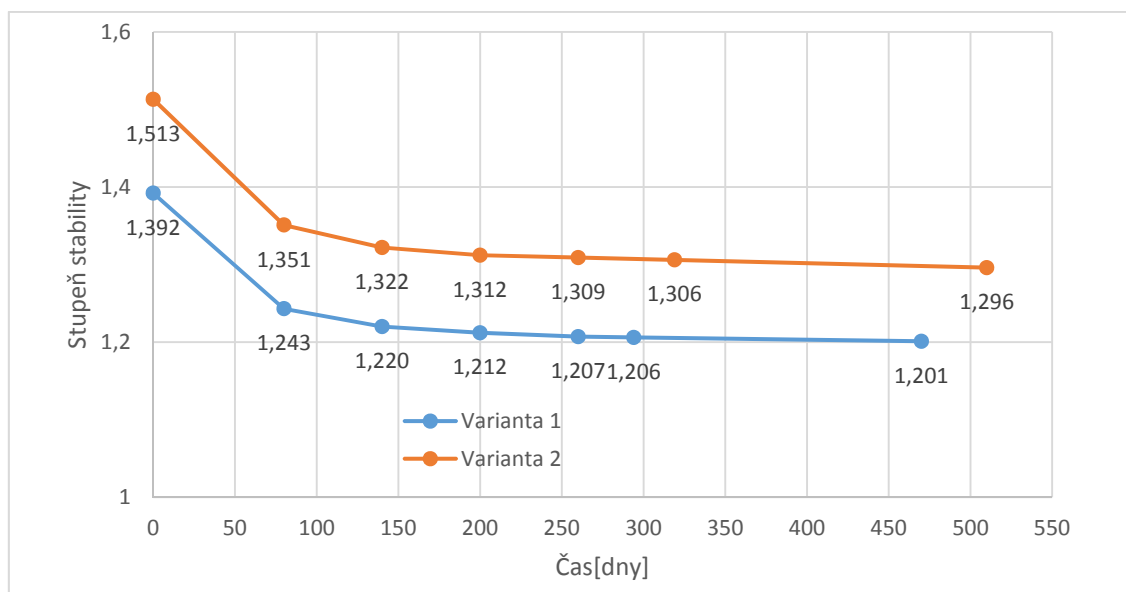
Výpočty jsou vyhodnoceny několika způsoby. První způsob zkoumá stupeň stability v čase, druhý způsob hodnotí velikost pórových tlaků v různých podmínkách, třetí způsob popisuje smykové plochy, čtvrtý a pátý způsob znázorňuje, jaké úpravy v modelu by mohly zvýšit stupeň stability, aniž by se změnila hloubka vetknutí pažící konstrukce.

### 5.1 Výsledky stupně stability v čase

Stavební jáma je analyzována pro dvě varianty, lišící se pouze v parametrech smykové pevnosti. Stupně stability jsou stanoveny pro krátkodobé a dlouhodobé podmínky. Pro lepší znázornění vývoje stupně stability v čase je v modelech s konsolidační analýzou rozlišeno několik časových období. Výsledné hodnoty stupně stability jsou uvedeny v Tab. 5-1 a pro lepší přehlednost graficky zpracovány v Obr. 5-1.

Tab. 5-1: Stupeň stability po dokončení stavební jámy v různých časových obdobích

Varianta 1			Varianta 2		
Označení modelu	Počet dní po fázi 8	Stupeň stability	Označení modelu	Počet dní po fázi 8	Stupeň stability
A1	0	1,392	A2	0	1,513
B1	80	1,243	B2	80	1,351
	140	1,220		140	1,322
	200	1,212		200	1,312
	260	1,207		260	1,309
	294	1,206		319	1,306
C1	470	1,201	C2	510	1,296



Obr. 5-1: Stupně stability v čase

Z výsledků zobrazených na Obr. 5-1 jasně vyplývá, závislost stupně stability na smykové pevnosti. U Varianty 1 se zadanými nižšími parametry smykové pevnosti vychází nižší stupeň stability než u Varianty 2 zadané s vyššími parametry smykové pevnosti. Dále je jasně vidět postupný pokles stupně stability u obou variant v narůstajícím čase. Pro krátkodobé (neodvodněné) podmínky je stupeň stability nejvyšší, v průběhu konsolidace klesá a nakonec se ustálí v dlouhodobých (odvodněných) podmínkách.

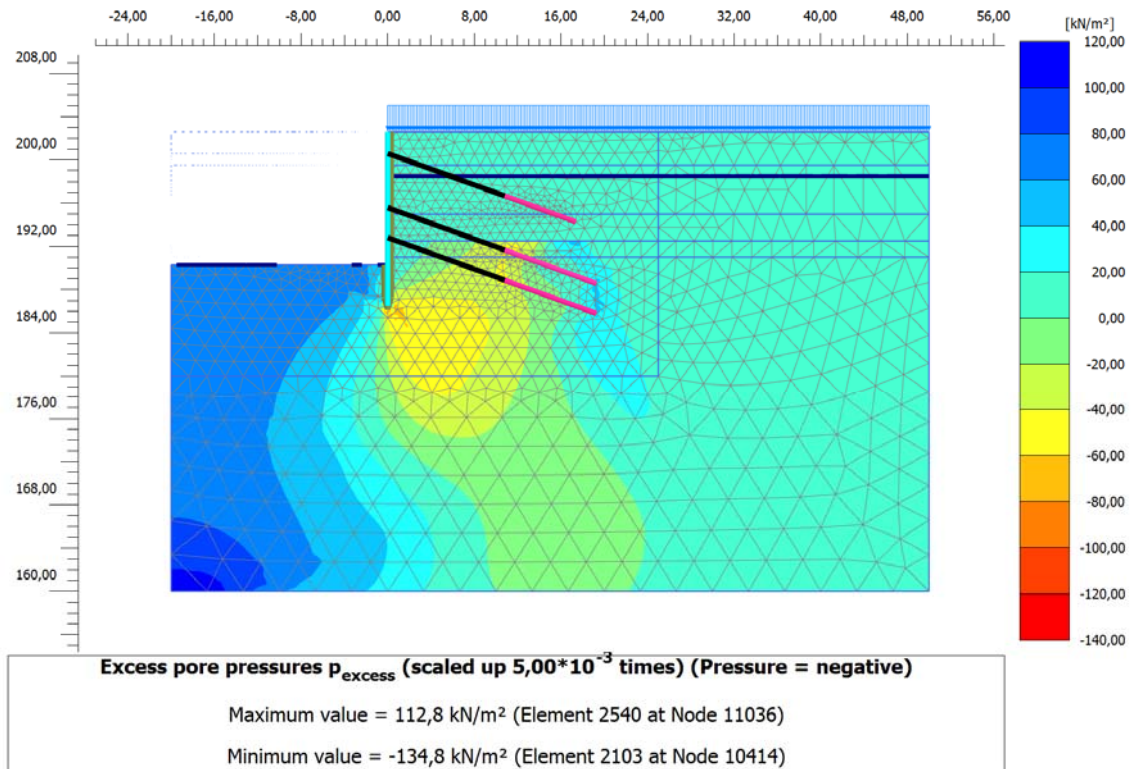
## 5.2 Výsledné pórové tlaky

### 5.2.1 Krátkodobé podmínky – Modely A1, A2

Nastavení krátkodobých (neodvodněných) podmínek pode dnem stavební jámy způsobí, že v důsledku rychlého odtížení se plně nasycená zemina nestihne zkonsolidovat, v pórech vznikne negativní pórový tlak  $u$  (podtlak) a ten v zemině zvýší efektivní napětí  $\sigma'$  (Rov. 5-1). Zemina pod dnem stavební jámy má tendenci se zvedat. V oblasti za rubem konstrukce vzniká poklesová kotlina, zemina z důvodu vlastní tíhy a vneseného vnějšího zatížení klesá, snižuje se efektivní napětí a roste tlak (Rov. 5-2).

$$\sigma' = \sigma - (-u) \quad (5-1)$$

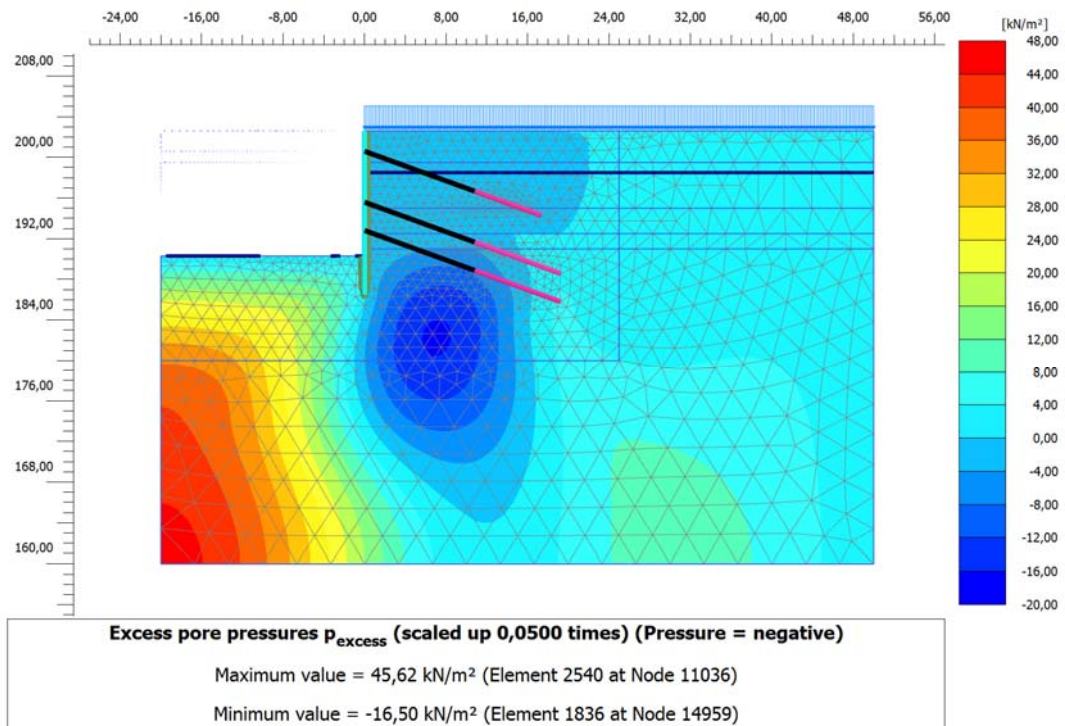
$$\sigma = \sigma' + u \quad (5-2)$$



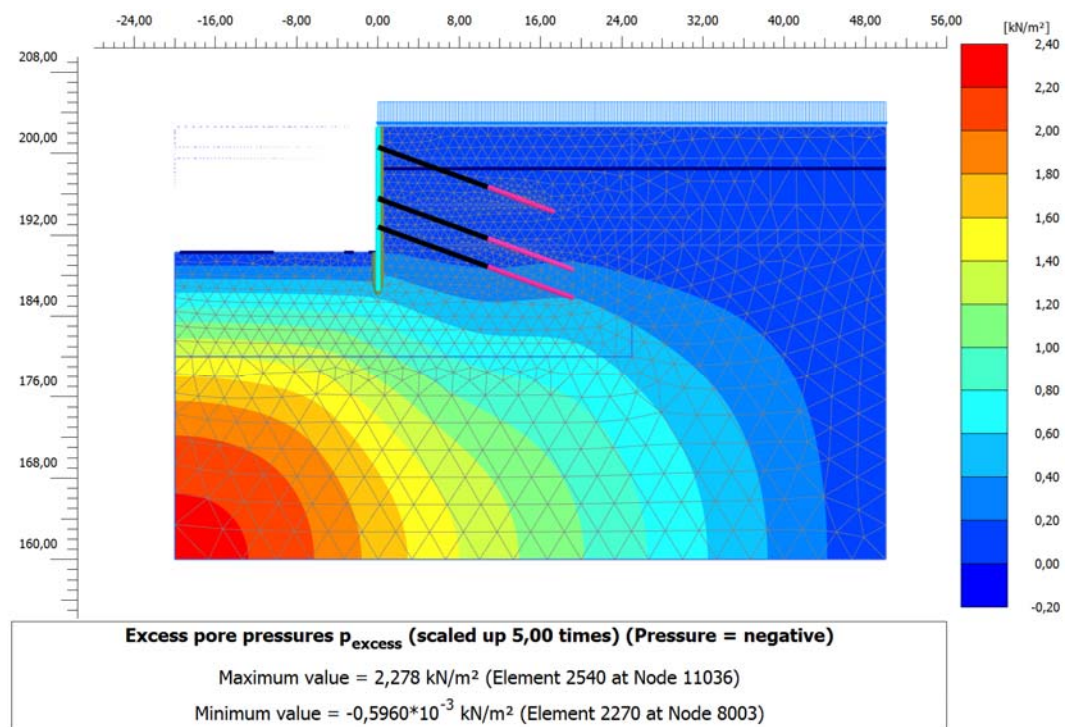
Obr. 5-2: Výsledné pórové tlaky v modelech v krátkodobých podmínkách

### 5.2.2 Konsolidační analýza – Modely B1, B2

Nastavení konsolidačního výpočtu dovoluje zemině v průběhu výstavby konsolidovat. Vznikají pórové tlaky a zároveň je umožněna jejich disipace v průběhu konsolidace. Po ukončení výstavby (Obr. 5-3) vznikají za konstrukcí zvýšené pórové tlaky, které jsou podstatně nižší než u krátkodobých podmínek. S narůstajícím časem konsolidace se pórové tlaky snižují (Obr. 5-4).



Obr. 5-3: Výsledné pórové tlaky v modelech s konsolidací po 80 dnech



Obr. 5-4: Výsledné pórové tlaky v modelech s konsolidací po 260 dnech

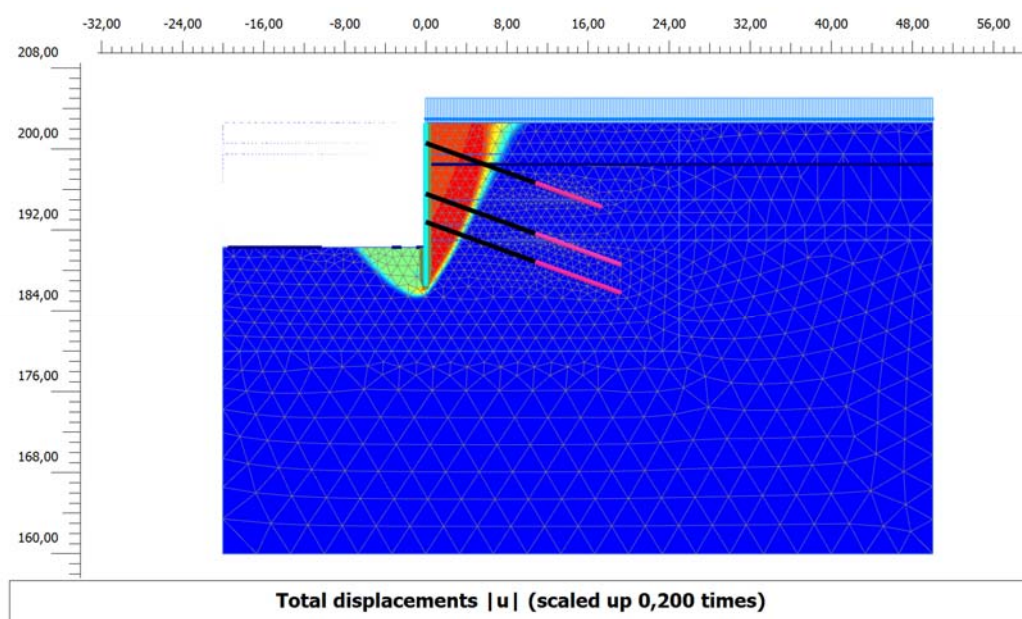


### 5.2.3 Dlouhodobé podmínky – Modely C1, C2

Po ukončení fáze 8 (Tab. 4-7) s nastavenými dlouhodobými podmínkami, nevznikají v modelu žádné pórové tlaky.

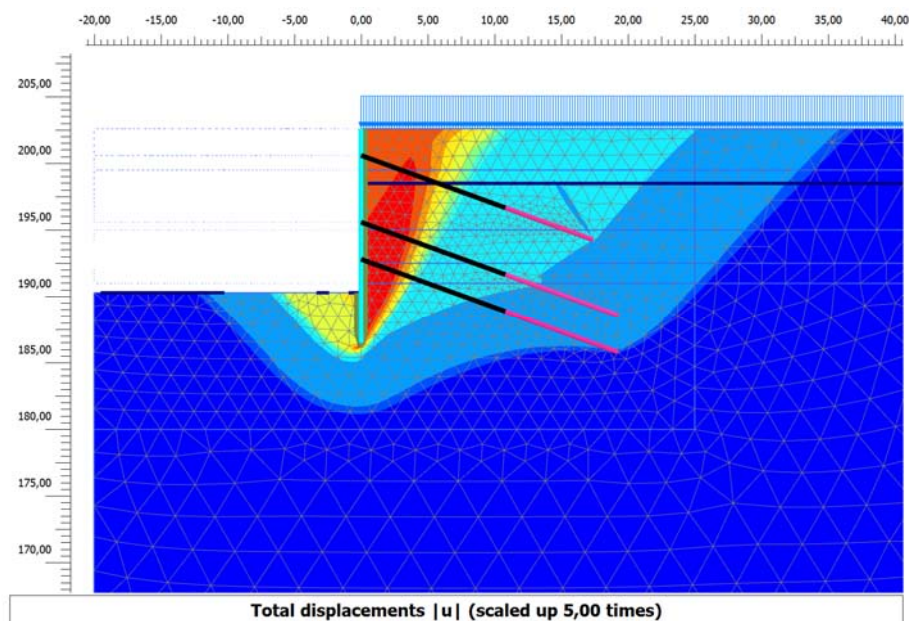
## 5.3 Výsledné smykové plochy

Tvar kritické smykové plochy pro všechny řešené modely vychází přibližně stejný (Ob. 5-5), kritická smyková plocha odpovídá ztrátě vnější stability. Pouze u modelu A1 je tvar kritické smykové plochy jiný než u ostatních modelů (Obr. 5-6). Tvar této smykové plochy ukazuje na ztrátu vnitřní stability. Síla v kotvě pravděpodobně usmýkne horninový klín mezi pažící stěnou a kořenem kotvy. Ověření tohoto předpokladu viz kap. 5.4.



Obr. 5-5: Vnější kritická smyková plocha





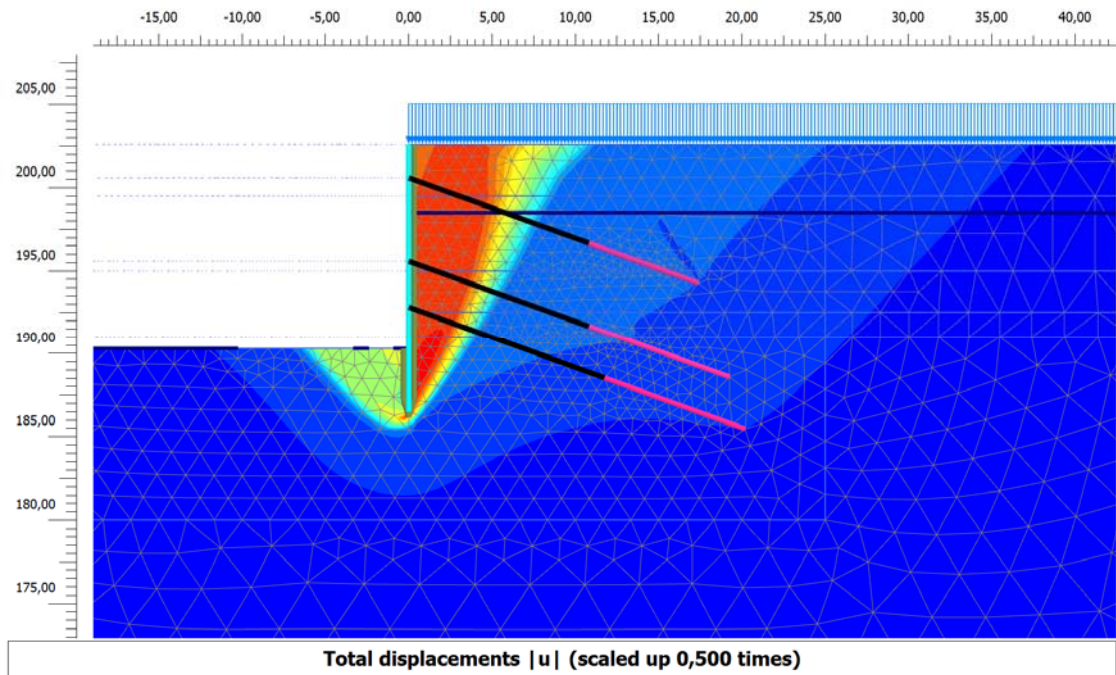
Obr. 5-6: Přechod vnější – vnitřní stabilita

## 5.4 Ověření smykové plochy

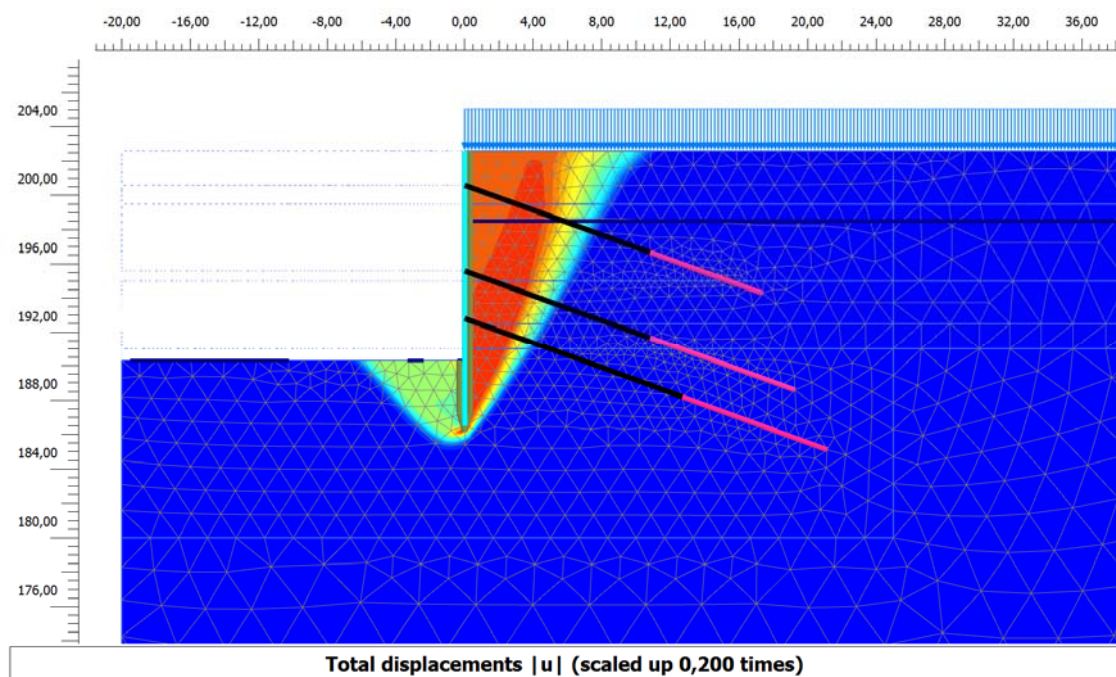
U modelu A1 pravděpodobně vzniká ztráta vnitřní stability. Tento předpoklad je možné ověřit prodloužením volné délky táhla kotvy, tím by mělo dojít ke změně tvaru kritické smykové plochy a nárůstu stupně stability.

Tab. 5-2: Modifikace modelu A1

Označení modelu	Prodloužení volné délky kotvy o [m]	Stupeň stability
A1-1	1	1,404
A1-2	2	1,415
A1-4	4	1,416



Obr. 5-7: Kritická smyková plocha modelu A1-1



Obr. 5-8: Kritická smyková plocha modelu A1-2 a A1-4

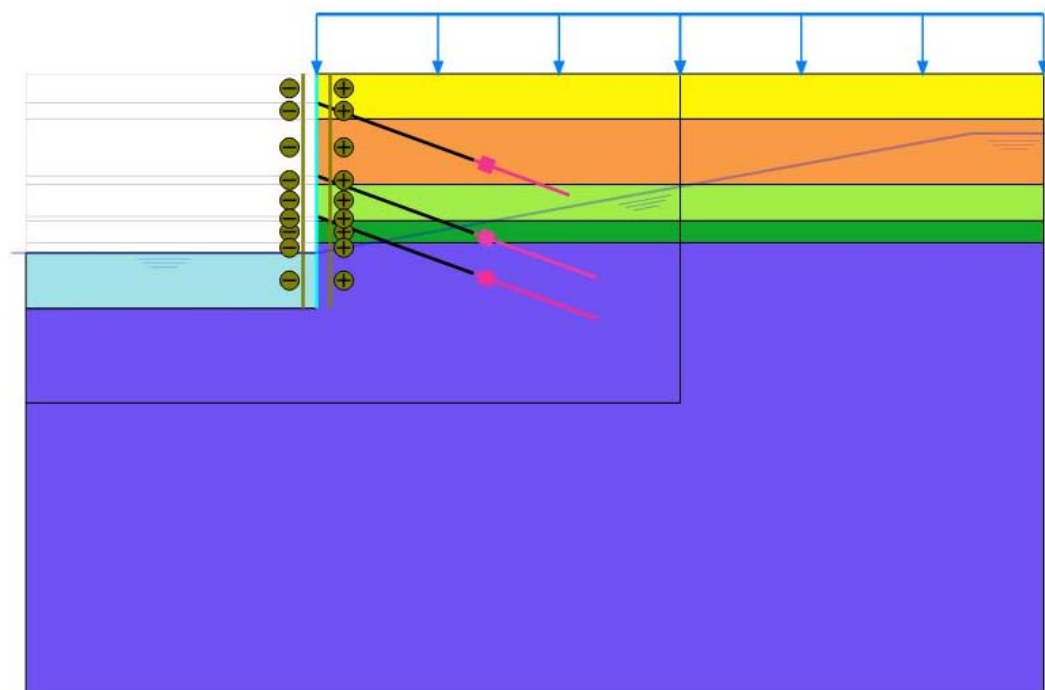
Stupeň stability podle předpokladů u všech modelů s prodloužením volné délky táhla kotvy stoupl. Z tvaru kritické smykové plochy u modelu A1-1 (Obr. 5-7) můžeme pozorovat, že se ještě částečně objevuje vnitřní ztráta stability, ale

dominantní se stává vnější ztráta stability. U modelů A1-2 a A1-4 (Obr. 5-8) dochází k vnější ztrátě stability a stupeň stability vzrostl. Pro tyto dva modely se stupeň stability liší jen minimálně. Program Plaxis nerozlišuje mezi vnější a vnitřní ztrátou stability. Porovnáme-li tvary kritických smykových ploch u modelů A1, A1-1 a A1-2 (A1-4) vidíme, jak se mění kritická smyková plocha z vnitřní ztráty stability na vnější ztrátu stability v závislosti na délce táhla kotvy.

## 5.5 Zanedbání vztlaku pod dnem stavební jámy

U krátkodobých podmínek (Obr.5-2) jsou pod dnem stavební jámy viditelné zvýšené pórové tlaky. Vznikla proto myšlenka, jak by se změnil výsledný stupeň stability, kdyby se na pasivní straně zanedbal vztlak. V programu Plaxis není možné pod hladinou podzemní vody vztlak ignorovat, proto byla uměle navýšena objemová hmotnost zeminy o hodnotu vztlaku.

Pod dnem stavební jámy se od paty pažící konstrukce k levému okraji modelu vytvořila z tuhého neogenního jílu nová zemina (Obr. 5-9), s upraveným parametrem  $\gamma_{\text{sat}}$ .



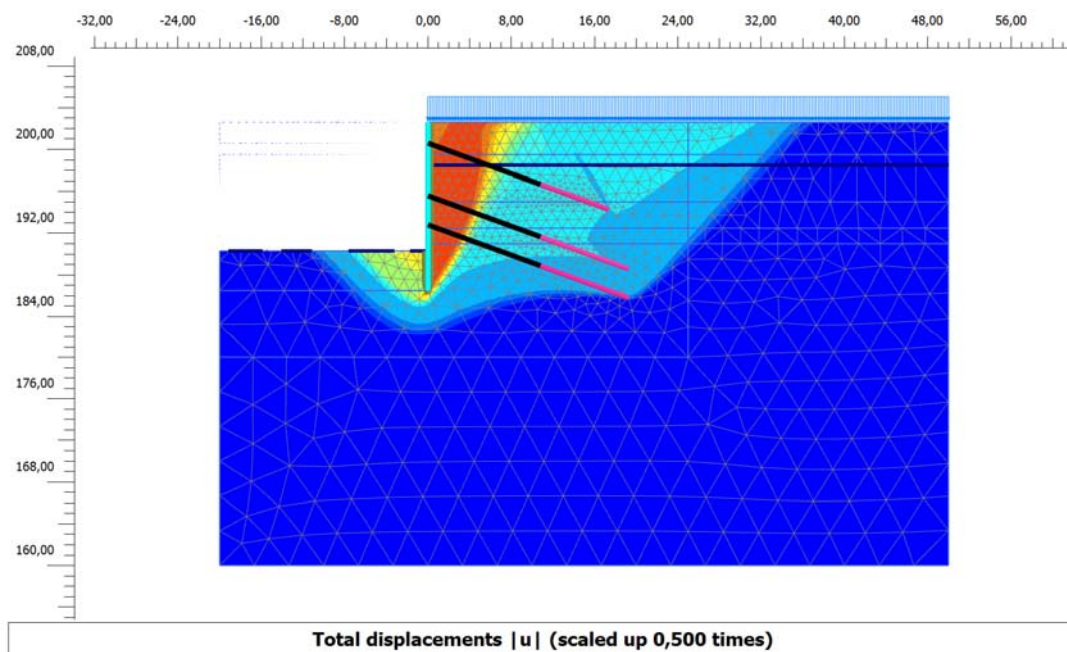
Obr. 5-9: Zanedbání vztlaku pod dnem stavební jámy

Tab. 5-3: Zanedbání vztlaku pod dnem stavební jámy – porovnání modelů

Výchozí modely	Stupeň stability výchozích modelů	Upravené modely se zanedbaným vztlakem	Stupeň stability upravených modelů
A1	1,392	E1	1,605
A2	1,513	E2	1,736
C1	1,201	D1	1,485
C2	1,296	D2	1,623

Analyzovány byly modely s krátkodobými a dlouhodobými podmínkami pro obě varianty smykových parametrů. Z Tab. 5-3 vyplývá, že zanedbáním vztlaku pod dnem stavební jámy naroste efektivní napětí, tím pádem naroste smyková pevnost a zvýší se stupeň stability.

V modelech E1, E2, D1, D2 vznikla vnitřní ztráta stability (Obr. 5-10), v kap. 5.4 bylo prokázáno, že prodloužením volné délky táhla kotvy by se změnila vnitřní ztráta stability na ztrátu stability a stupeň stability by ještě vzrostl. Nejedná se však o reálný případ pouze o teoretickou variantu.



Obr. 5-10: Smyková plocha se zanedbáním vztlaku pod dnem stavební jámy

## 6 Závěr

Cílem bakalářské práce bylo ozřejmit časový průběh stupně stability zadané stavební jámy s ohledem na etapizaci výstavby a životnost pažící konstrukce.

Za pomoci numerické analýzy stavební jámy zhotovené v málo propustných soudržných zeminách, byly vytvořeny dvě varianty s různými vstupními parametry výpočtu. Každá z variant obsahovala tři modely pro výpočet s krátkodobými (neodvodněnými) podmínkami, dlouhodobými neodvodněnými podmínkami a konsolidační výpočet. Výsledné stupně stability byly posouzeny v závislosti na čase nastaveném v modelech. Z výsledného zhodnocení vidíme, že stupeň stability je nejvyšší pro variantu s krátkodobými podmínkami (modely A1,A2) poté začne klesat u výsledků konsolidační analýzy (modely B1,B2) a nakonec se ustálí v dlouhodobých podmínkách (modely C1, C2).

Rozdíl vstupních parametrů smykové pevnosti se značně projevil u stupňů stability. Varianta 1 s nižšími smykovými pevnostmi má nižší stupeň stability než Varianta 2 s vyššími vstupními parametry smykové pevnosti.

Pórové tlaky byly nejvyšší u modelů A1, A2 (neodvodněné), což bylo předpokládáno vzhledem k neumožnění typu výpočtu disipovat pórové tlaky. U konsolidační analýzy je vidět vznik nižších pórových tlaků a jejich disipace v čase.

Kritická smyková plocha vznikala při ztrátě vnější stability u všech modelů přibližně stejná, pouze u modelu A1 vznikla kritická smyková plocha při ztrátě vnitřní stability. Modely A1-1, A1-2 a A1-4 potvrdily předpoklad, že prodloužením volné délky táhla kotvy se kritická smyková plocha při ztrátě vnitřní stability změní na kritickou smykovou plochu při ztrátě vnější stability.

U modelů D1, D2, E1, E2 bylo potvrzeno, že pokud pod dnem stavební jámy zanedbáme vztlak, značně vzroste stupeň stability z důvodu navýšení efektivního napětí na pasivní straně konstrukce.

## Seznam použitých tabulek

- Tab. 2-1: Přehled zemin v geologickém profilu na ulici Křenová
- Tab. 2-2: Směrné normové charakteristiky
- Tab. 2-3 Geometrické vlastnosti kotev a předpínací síly
- Tab. 4-1: Hodnoty parametrů pro jednotlivé zeminy – Varianta 1
- Tab. 4-2: Hodnoty parametrů pro jednotlivé zeminy – Varianta 2
- Tab. 4-3: Materiálové vlastnosti pilotové stěny (Plate)
- Tab. 4-4: Vlastnosti táhla kotvy (Node-to-node anchor)
- Tab. 4-5: Vlastnosti kořene kotvy (Embedded beam row)
- Tab. 4-6: Fáze výstavby pro dlouhodobé a krátkodobé podmínky
- Tab. 4-7: Fáze výstavby pro konsolidační výpočet
- Tab. 4-8: Přehled analyzovaných modelů
- Tab. 5-1: Stupeň stability po dokončení stavební jámy v různých časových obdobích
- Tab. 5-2: Modifikace modelu A1
- Tab. 5-3: Zanedbání vztlaku pod dnem stavební jámy – porovnání modelů

## Seznam použitých obrázků

- Obr. 2-1: Mapa Brna s přibližným umístěním stavební jámy (zdroj google.cz/maps)
- Obr. 2-2: Geologická mapa 1:25 000 (zdroj: geology.cz)
- Obr. 2-4: Inženýrsko-geologický řez
- Obr. 2-5 Řez stavební jámou vycházející ze zadání
- Obr. 3-1: Pracovního diagram HS modelu
- Obr. 4-1: Hranice modelu a okrajové podmínky
- Obr. 4-2: Půdorys převrtávané pilotové stěny
- Obr. 4-3: Síť konečných prvků
- Obr. 4-4: Hydraulické podmínky, zelená – „seepage“, červená – „close“
- Obr. 4-5: Snižování hladiny podzemní vody v průběhu výstavby
- Obr. 5-1: Stupně stability v čase
- Obr. 5-2: Výsledné pórové tlaky v modelech v krátkodobých podmínkách
- Obr. 5-3: Výsledné pórové tlaky v modelech s konsolidací po 80 dnech

Obr. 5-4: Výsledné pórové tlaky v modelech s konsolidací po 260 dnech  
Obr. 5-5: Vnější kritická smyková plocha  
Obr. 5-6: Přechod vnější – vnitřní stabilita  
Obr. 5-7: Kritická smyková plocha modelu A1-1  
Obr. 5-8: Kritická smyková plocha modelu A1-2 a A1-4  
Obr. 5-9: Zanedbání vztlaku pod dnem stavební jámy  
Obr. 5-10: Smyková plocha se zanedbáním vztlaku pod dnem stavební jámy

## Seznam použitých zdrojů

Weiglová, K. *Mechanika Zemin*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, Brno 2007, ISBN 978-80-7204-507-5

VANÍČEK, I. *Mechanika zemin*. Vydavatelství ČVUT. Praha 1996, ISBN 80-01-01437-1

Masopust, J. *Speciální zakládání staveb, díl 1*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, Brno 2004, ISBN 80-214-2770-1

Masopust, J. *Speciální zakládání staveb, díl 2*. Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, Brno 2006, ISBN 80-7204-489-3

Masopust, J. *Navrhování základových a pažících konstrukcí, příručka k ČSN EN 1997*. ČKAIT, Praha 2012, ISBN 978-80-87438-31-2

Miča, L., Chalmovský, J., Fiala R., Račanský V. *Numerická analýza pažení stavebních jam*. Ústav geotechniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2011, ISBN 978-80-7204-773-4

Chalmovský, J., *Základy matematického modelování v geotechnice s využitím programu Plaxis*. Ústav geotechniky, Fakulta stavební, Vysoké učení technické v Brně, Brno 2014, ISBN 978-80-214-4938-1

—. Studijní materiály k předmětu BF054 - Aplikace inženýrských úloh v geotechnice. VUT FAST Brno, 2017



## Seznam odkazů na elektronické zdroje

[www.geology.cz](http://www.geology.cz)

[www.google.cz/maps](http://www.google.cz/maps)

[www.geokotvy.cz](http://www.geokotvy.cz)

[www.plaxis.com](http://www.plaxis.com)

## Ostatní zdroje

Inženýrsko-geologické a hydrogeologické posouzení Brno – Křenová,  
GEON s.r.o

Laboratorní zkoušky mechaniky zemin Bytový dům Ul. Křenová, Brno, Ústav  
Geotechniky, Fakulta stavební VUT Brno

## Seznam použitých zkratk

HS	Hardening soil model
$\Sigma M_{SF}$	Safety factor multiplier
$\varphi_d$	Zadaný úhel vnitřního tření
$\varphi_d$	Dosažený úhel vnitřního tření
$C_d$	Zadaná soudržnost zeminy
$C_f$	Dosažená soudržnost zeminy při kolapsu
E	Modul pružnosti
D	Průměr
$L_{spacing}$	Vzdálenost kotev
$T_{skin,start,max}$	Maximální plášťové tření na začátku kořene kotvy
$T_{skin,end,max}$	Maximální plášťové tření na konci kořene kotvy
A	Plocha
$\nu$	Poissonovo číslo
I	Moment setrvačnosti
EA	Osová tuhost
EI	Ohybová tuhost
$\gamma_{unsat}$	Objemová tíha pod hladinou vody
$\gamma_{sat}$	Objemová tíha saturovaná
$E_{50}^{ref}$	Sečnový referenční modul z triaxiální zkoušky
$E_{oed}^{ref}$	Tečnový referenční modul z edometrické zkoušky
$E_{ue}^{ref}$	Odtěžovací/ znovu přitěžovací modul pružnosti

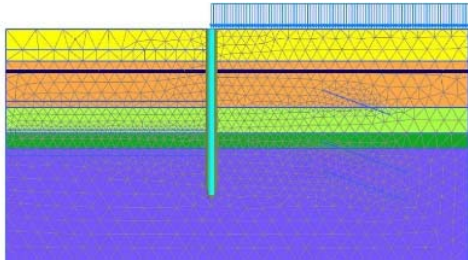


$m$	Parametr řídící vztah mezi napětím a deformací
$\nu_{ur}$	Poissonovo číslo pro odtížení/ opětovné přitížení
$p_{ref}$	Referenční napětí
$c'$	Koheze
$\varphi'$	Úhel vnitřního tření
$\psi$	Úhel dilatance
$K_0^{NC}$	Součinitel zemního tlaku pro normální konsolidaci
$k_x$	Koeficient hydraulické propustnosti
$k_y$	Koeficient hydraulické propustnosti
OCR	Parametry popisující historii zatěžování

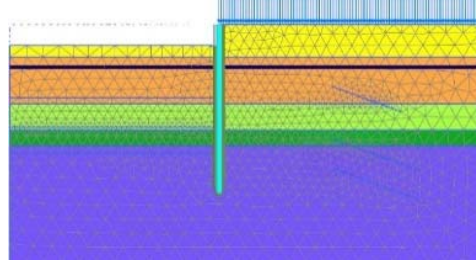
## Seznam příloh

### PŘÍLOHA 1 – GRAFICKÉ ZOBRAZENÍ ZÁKLADNÍCH FÁZÍ VÝPOČTU

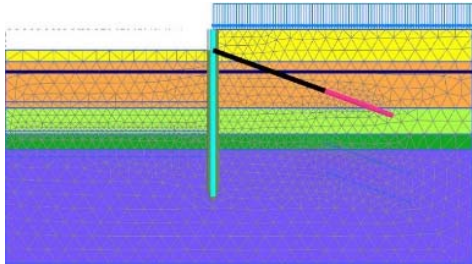
1. Fáze



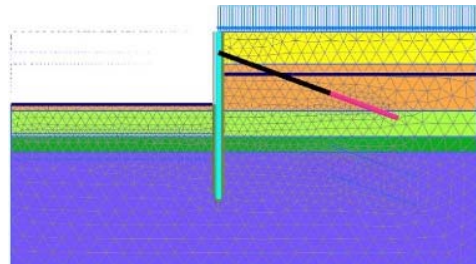
2. Fáze



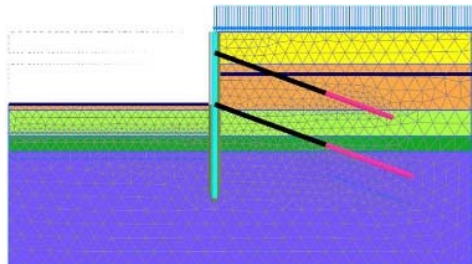
3. Fáze



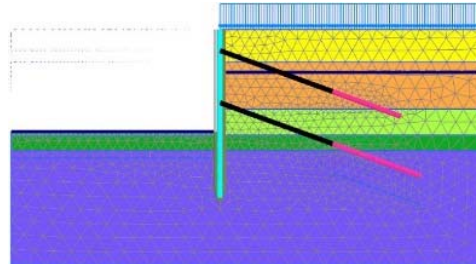
4. Fáze



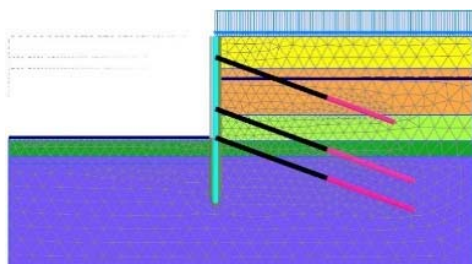
5. Fáze



6. Fáze



7. Fáze



8. Fáze

