



**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE**

---

**Fakulta Stavební  
135 Katedra geotechniky**

## **Založení mostu**

## **Foundation of bridge**

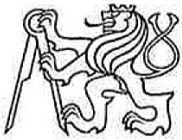
Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství  
Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby  
Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Masopust, CSc.

**Bc. Tomáš Kubín**

---

**Praha 2017**



## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

### I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Kubín Jméno: Tomáš Osobní číslo: 460279  
Zadávající katedra: Geotechniky  
Studijní program: stavební inženýrství  
Studijní obor: K

### II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Založení mostu

Název diplomové práce anglicky: Foundation of bridge

Pokyny pro vypracování:

- na základě zadání zhodnocení geotechnických poměrů na staveništi
- vypracování a zhodnocení alternativ založení mostu
- matematické modelování hlubinného založení mostní opěry na násypu, vliv negativního plášťového tření pilot od konzolidace násypu,
- vypracování 3D modelu primární konzolidace,
- výpočet sedání mostní opěry klasickými metodami

Seznam doporučené literatury:

- Masopust, J.: Zakládání staveb 1, ČVUT Praha, 2015
- Masopust, J.: Zakládání staveb 2, ČVUT Praha, 2016
- Masopust, J.: Navrhování základových a pažících konstrukcí, ČKAIT, 2012
- Masopust, J.: Vrtané piloty, Čeněk a Ježek, 1994

Jméno vedoucího diplomové práce: Doc.Ing.Jan Masopust, CSc

Datum zadání diplomové práce: 10.12.2015 Termín odevzdání diplomové práce: 8.1.2017

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

### III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

*Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.*

6.10.2016

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

## **Abstrakt**

Tato práce se zabývá porovnáním různých variant pilotového založení dálničního mostu v interakci s přilehlým násypem na dálnici D35 v úseku Opatovice-Časy. V podloží plánovaného mostu se nachází velmi plastické a nepropustné jíly a zvětralé slínovce, u kterých probíhá konsolidace v horizontu mnoha let. Vrtané piloty pod opěrou přitěžuje negativní plášťové tření, které je důsledkem dlouhodobé konsolidace podloží, které je zatížené násypem za opěrou. Ve výpočtu je uvážena varianta s konsolidačním násypem a bez konsolidačního násypu. Výpočet sedání piloty je provedený pomocí metody mezní zatěžovací křivky. Součástí práce je také prostorový numerický model opěry a násypu vytvořený v programu Plaxis 3D. Na závěr jsou zjištěné výsledky vyhodnoceny a porovnány.

## **Klíčová slova**

negativní plášťové tření, vrtané piloty, konsolidace, sedání, mezní zatěžovací křivka, numerické modelování, Plaxis 3D, založení mostu

## **Abstract**

The aim of this work is to get comparison between different options of motorway bridge pile foundation in interaction with adjacent embankment on the motorway D35 in the section Opatovice-Časy. There are very plastic and impermeable clays and weathered marlstones, where consolidation is going on for many years. Bored piles under the bridge support are excess loaded by negative skin friction, which is consequence of long-term consolidation of subterrain loaded by the embankment behind the bridge support. In the calculation there is considered option with a consolidation embankment and without it. Calculation of pile settlement is performed by load-settlement curve. Three-dimensional numerical model of the bridge support and embankment made in software Plaxis 3D is second part of this work. In conclusion the results of these two models are evaluated and compared.

## **Keywords**

negative skin friction, bored piles, consolidation, settlement, load-settlement curve, numerical modeling, Plaxis 3D, foundation of bridge

...

## **Bibliografická citace VŠKP**

Tomáš Kubín *Založení mostu*. Praha, 2017. 96 s., 23 s. příl. Diplomová práce. České vysoké učení technické, Fakulta Stavební, Katedra geotechniky. Vedoucí práce doc. Ing. Jan Masopust, CSc.



## **Prohlášení:**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Praze dne 8. 1. 2017

.....

podpis autora

Tomáš Kubín

## **Prohlášení o shodě listinné a elektronické formy VŠKP**

### **Prohlášení:**

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Praze dne 8. 1. 2017

.....

podpis autora

Tomáš Kubín

## **Poděkování:**

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé diplomové práce, panu doc. Ing. Janu Masopustovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích. Dále bych chtěl poděkovat firmě AF CityPlan za poskytnutí podkladů.

## Obsah

|             |   |           |
|-------------|---|-----------|
| <b>1</b>    | <b>Úvod</b> .....                                   | <b>3</b>  |
| <b>2</b>    | <b>Teoretická část</b> .....                        | <b>5</b>  |
| <b>2.1</b>  | <b>Konsolidace</b> .....                            | <b>5</b>  |
| 2.1.1       | Terzaghiho jednoosá konsolidace.....                | 5         |
| <b>2.2</b>  | <b>Sedání vrtaných pilot</b> .....                  | <b>8</b>  |
| <b>2.3</b>  | <b>Negativní plášťové tření</b> .....               | <b>9</b>  |
| 2.3.1       | Neutrální bod.....                                  | 9         |
| <b>3</b>    | <b>Dálniční most u Dolních Ředic</b> .....          | <b>11</b> |
| <b>3.1</b>  | <b>Lokalita a stavba</b> .....                      | <b>11</b> |
| <b>3.2</b>  | <b>Geotechnické poměry na staveništi</b> .....      | <b>14</b> |
| 3.2.1       | Geologické poměry.....                              | 14        |
| 3.2.2       | Geotechnický profil.....                            | 15        |
| <b>4</b>    | <b>Klasický výpočet</b> .....                       | <b>16</b> |
| <b>4.1</b>  | <b>Způsob výpočtu</b> .....                         | <b>16</b> |
| 4.1.1       | Použitý software.....                               | 16        |
| <b>4.2</b>  | <b>Fáze výstavby</b> .....                          | <b>17</b> |
| <b>4.3</b>  | <b>Konsolidace podloží pod násypem</b> .....        | <b>17</b> |
| <b>4.4</b>  | <b>Mezní zatěžovací křivka piloty</b> .....         | <b>19</b> |
| <b>4.5</b>  | <b>Výpočet sedání násypu</b> .....                  | <b>22</b> |
| 4.5.1       | Geometrie konstrukce.....                           | 22        |
| 4.5.2       | Geotechnický profil.....                            | 23        |
| 4.5.3       | Parametry zemin.....                                | 23        |
| 4.5.4       | Přetížení násypu.....                               | 24        |
| 4.5.5       | Výpočet sedání a konsolidace.....                   | 24        |
| <b>4.6</b>  | <b>Zatížení pilot</b> .....                         | <b>29</b> |
| 4.6.1       | Vlastní tíha opěry.....                             | 29        |
| 4.6.2       | Reakce z ložisek.....                               | 30        |
| 4.6.3       | Zemní tlak na opěru.....                            | 30        |
| 4.6.4       | Zemní tlak od dopravy na opěru:.....                | 31        |
| 4.6.5       | Vnášení zatížení.....                               | 34        |
| <b>4.7</b>  | <b>Výpočet mezní zatěžovací křivky piloty</b> ..... | <b>35</b> |
| <b>4.8</b>  | <b>Roznos sil</b> .....                             | <b>37</b> |
| <b>4.9</b>  | <b>Sedání nejvíce zatížené piloty</b> .....         | <b>39</b> |
| 4.9.1       | Zhodnocení výsledků sedání.....                     | 41        |
| <b>4.10</b> | <b>MSÚ piloty</b> .....                             | <b>42</b> |
| <b>5</b>    | <b>3D numerický model</b> .....                     | <b>46</b> |
| <b>5.1</b>  | <b>Tvorba modelu</b> .....                          | <b>46</b> |

|            |  |           |
|------------|--|-----------|
| 5.1.1      | Geometrie modelu .....   | 46        |
| 5.1.2      | Geotechnický profil .....                                      | 47        |
| <b>5.2</b> | <b>Materiály a vlastnosti prvků.....</b>                       | <b>47</b> |
| 5.2.1      | Hardening Soil model .....                                     | 47        |
| 5.2.2      | Použité prvky .....  | 49        |
| 5.2.3      | Materiály a vlastnosti prvků .....                             | 50        |
| 5.2.4      | Plášťové tření.....  | 51        |
| <b>5.3</b> | <b>Zatížení.....</b>   | <b>52</b> |
| <b>5.4</b> | <b>Okrajové podmínky modelu.....</b>                           | <b>53</b> |
| 5.4.1      | Statické okrajové podmínky .....                               | 53        |
| 5.4.2      | Vodní režim.....   | 53        |
| <b>5.5</b> | <b>Fáze výstavby a její varianty.....</b>                      | <b>54</b> |
| <b>5.6</b> | <b>Sít konečných prvků .....</b>                               | <b>56</b> |
| 5.6.1      | Vlastnosti prvků .....   | 56        |
| 5.6.2      | Hustota sítě.....  | 56        |
| 5.6.3      | Kvalita prvků .....  | 56        |
| <b>5.7</b> | <b>Výpočet .....</b>   | <b>57</b> |
| <b>5.8</b> | <b>Výstupy .....</b>   | <b>58</b> |
| 5.8.1      | Svislé deformace – konsolidace násypu .....                    | 58        |
| 5.8.2      | Svislé deformace – Uvedení do provozu .....                    | 60        |
| 5.8.3      | Svislé deformace – vymizení pórových tlaků.....                | 62        |
| 5.8.4      | Pórové tlaky – Vrtání pilot .....                              | 65        |
| 5.8.5      | Pórové tlaky – Uvedení do provozu .....                        | 67        |
| 5.8.6      | Svislé deformace pilot .....                                   | 69        |
| 5.8.7      | Nerovnoměrné sednutí pilot .....                               | 70        |
| 5.8.8      | Vodorovné deformace pilot.....                                 | 71        |
| 5.8.9      | Vnitřní síly pilot.....  | 73        |
| 5.8.10     | Deformace opěry .....  | 76        |
| <b>5.9</b> | <b>Porovnání výsledků klasického výpočtu a 3D modelu .....</b> | <b>76</b> |
| 5.9.1      | Sedání podloží násypu.....                                     | 76        |
| 5.9.2      | Sedání pilot.....  | 78        |
| <b>6</b>   | <b>Závěr.....</b>  | <b>79</b> |
|            | <b>Seznam použitých zdrojů.....</b>                            | <b>81</b> |
|            | <b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>                 | <b>83</b> |
|            | <b>Seznam použitých obrázků .....</b>                          | <b>86</b> |
|            | <b>Seznam použitých tabulek.....</b>                           | <b>88</b> |
|            | <b>Seznam příloh.....</b>                                      | <b>89</b> |

# 1 ÚVOD

Tato práce má za úkol stanovit, zda je výhodné použití konsolidačního násypu při stavbě třípolového mostu na plánované dálnici D35 v úseku Opatovice-Časy u obce Dolní Ředice přes polní cestu, potok a biokoridor. Tato výhodnost má být určena z hlediska změny velikosti sedání opěry mostu, která je založena na vrtaných velkopřůměrových pilotách.

Sedání pilot pod opěrou je významně ovlivněno sedáním podloží. Jestliže z důvodu přetížení terénu vrstvy zeminy v podloží okolo piloty sedají, tak na jejich plášti vzniká negativní plášťové tření a zvětšuje se velikost celkového sedání piloty. Pokud takové sedání u mostu nastane po konečném uložení nosné konstrukce, tak hrozí nebezpečí nerovnoměrného sedání opěry a pilířů, přerozdělení vnitřních sil na staticky neurčitě konstrukci a zvýšené namáhání některých částí konstrukce, což může mít nezanedbatelný vliv na použitelnost a životnost konstrukce. Na nerovnoměrný pokles podpor se mostní konstrukce dimenzují. Zpravidla to však bývá 5, někdy 10 mm. Opěra založená na nezkonsolidovaném násypu však může sednout i výrazně více. Nerovnoměrné sedání podpor může také způsobit pokles nivelety, což se projeví na zhoršení jízdního komfortu. U velkých násypů kolem 10 m a vyšších je pak sedání pilot způsobené přenosem sil z opěry už nevýznamné oproti sedání z důvodu sedání podloží. Proto je třeba při návrhu a posouzení založení opěry nezapomínat na vliv negativního plášťového tření.

Rozhodl jsem se soustředit na sedání opěry OP1, protože se podle inženýrsko-geologického průzkumu ukázalo, že v jejím podloží jsou velmi stlačitelné jíly a slínovce s nízkou propustností a riziko dlouhodobého sedání tu hrozí nejvíce.

V této práci jsou uváženy tři varianty výstavby. V první variantě bude 5,7 m vysoký násyp konsolidovat dva měsíce. Ve druhé se doba konsolidace prodlouží ze dvou na šest měsíců. Ve třetí variantě bude ještě navíc po dobu šesti měsíců působit konsolidační násyp o výšce 3 m.

Tyto tři varianty jsou spočítány pomocí klasické teorie sedání pilot podle mezní zatěžovací křivky s uvážením vlivu negativního plášťového tření. Negativní plášťové tření je určeno podle vypočteného zbývajícího sedání podloží pod násypem po proběhnutí části konsolidace.

Dále byl vytvořen numerický model opěry OP1 levého mostu v programu Plaxis 3D a vymodelován průběh konsolidace a sedání v průběhu stavby a existence konstrukce pro uvedené tři varianty.

Na závěr jsou vypočtené hodnoty sedání pilot pod opěrou vyhodnoceny a je provedeno porovnání mezi výpočtovými modely a mezi jednotlivými variantami výstavby.

## 2 TEORETICKÁ ČÁST

### 2.1 Konsolidace

Konsolidací se rozumí deformace trojfázového prostředí – zeminy – v čase za účinků vnějšího zatížení. Tato deformace je způsobena vytlačováním vody z pórů (primární konsolidace) a také reologickými změnami skeletu zeminy (sekundární konsolidace). Dochází přitom ke zpevnění zeminy. [4]

Primární konsolidace probíhá do té doby, dokud se pórový tlak nesníží na nulu. Sekundární konsolidace je dlouhodobější jev. Na celkovém sedání má obvykle daleko významnější vliv primární konsolidace, proto se sekundární konsolidací nebudu již dále zabývat. [4]

Primární konsolidace je jev, který je možné pozorovat u málo propustných a nepropustných zemin. Záleží také na rychlosti zatěžování. Obecně se za zeminy, u kterých je třeba uvažovat konsolidaci, považují takové, které mají koeficient filtrace  $k < 1 \cdot 10^{-6}$ . [4]

#### 2.1.1 Terzaghiho jednoosá konsolidace [4]

Tato teorie uvažuje odvodnění pouze jedním směrem, a to svislým. Po nanesení zatížení napětí přenáší pouze voda obsažená v pórech zeminy – neutrální napětí  $u$ . Napětí se postupně z pórů přesouvá do skeletu zeminy, až v konečné fázi z pórů zcela vymizí. Tato teorie předpokládá rovinné zatížení vodou nasycené a málo propustné zeminy, jejíž dolní hranice vrstvy je nepropustná a horní propustná. Dále musí platit:

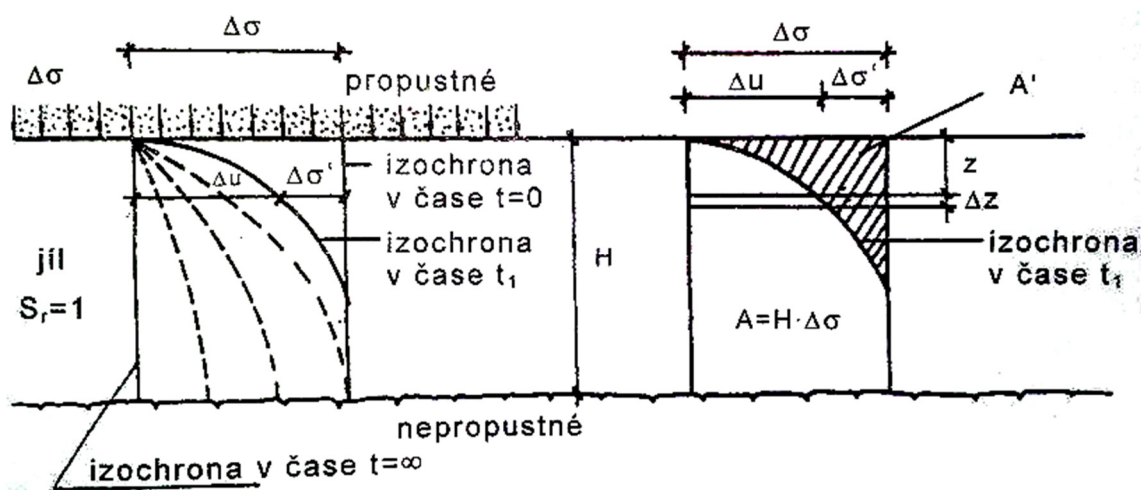
- filtrační koeficient  $k$  a součinitel konsolidace  $c_v$  jsou konstantní po celé výšce vrstvy
- zemina je plně nasycena vodou
- zrna skeletu jsou nestlačitelná
- proudění vody se řídí podle Darcyho zákona
- deformace skeletu je způsobena pouze efektivním napětím, je lineární a nezávislá na čase

Totální přitížení v zemině  $\Delta\sigma$  se skládá z efektivního přitížení  $\Delta\sigma_{ef}$  a neutrálního napětí  $\Delta u$ .

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma_{ef} + \Delta u \quad (2-1)$$



S postupující konsolidací se  $\Delta\sigma_{ef}$  zvětšuje z 0 až na  $\Delta\sigma$ , kdy je konsolidace u konce. Mezi těmito krajními mezemi uniká voda z pórů z důvodu přetlaku směrem k propustné vrstvě. Z toho vyplývá, že konsolidace záleží na propustnosti zeminy a na vzdálenosti, kterou musí voda urazit. Nejdříve odteče voda z vrstvy u propustného okraje. Poměr mezi  $\Delta\sigma_{ef}$  a  $\Delta u$  je po výšce konsolidující vrstvy různý. Na následujícím obrázku (Obrázek 2-1) je zobrazeno rozdělení efektivního a neutrálního napětí v čase a po výšce konsolidující vrstvy. Křivka, která rozděluje napětí  $\Delta\sigma$  po výšce vrstvy na  $\Delta\sigma_{ef}$  a  $\Delta u$ , se nazývá izochrona.



Obrázek 2-1: Izochrona v čase [4]

Stlačení tenké vrstvičky  $\Delta s_t$  o výšce  $\Delta z$  v čase  $t$  se určí:

$$\Delta s_t = \Delta z * \frac{\Delta\sigma_{ef}}{E_{oed}} \quad (2-2)$$

Stlačení celé vrstvy  $H$  v tomtéž čase je:

$$s_t = \frac{1}{E_{oed}} * \sum \Delta z * \Delta\sigma_{ef} = \frac{A'}{E_{oed}} \quad (2-3)$$

kde  $A'$  je vyšrafovaná plocha na Obrázek 2-1.

Celkové stlačení bude:

$$s_c = \frac{H * \Delta\sigma_{ef}}{E_{oed}} = \frac{A}{E_{oed}} \quad (2-4)$$

kde  $A$  je plocha na předchozím obrázku (Obrázek 2-1). Stlačení vrstvy zeminy v čase  $t$  se určí:

$$s_t = s_c * \frac{A'}{A} = s_c * U \quad (2-5)$$

$U$  je stupeň konsolidace dosažený v čase  $t$ . Obecně platí:

$$U = \int_{z=0}^{z=H} \frac{\Delta\sigma_{ef} * \Delta z}{\Delta\sigma * H} \quad (2-6)$$

Pro výpočet  $A'$  je třeba znát tvar izochrony v čase  $t$ . Pórový tlak  $u$  je funkcí dvou proměnných: času  $t$  a polohy ve vrstvě  $z$ . Terzaghi odvodil konsolidační rovnici z podmínky, že stlačení přírůstkem efektivního napětí je rovno objemu vytlačené vody za jednotku času. Tato parciální diferenciální rovnice má následující tvar:

$$c_v * \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial \sigma}{\partial t} \quad (2-7)$$

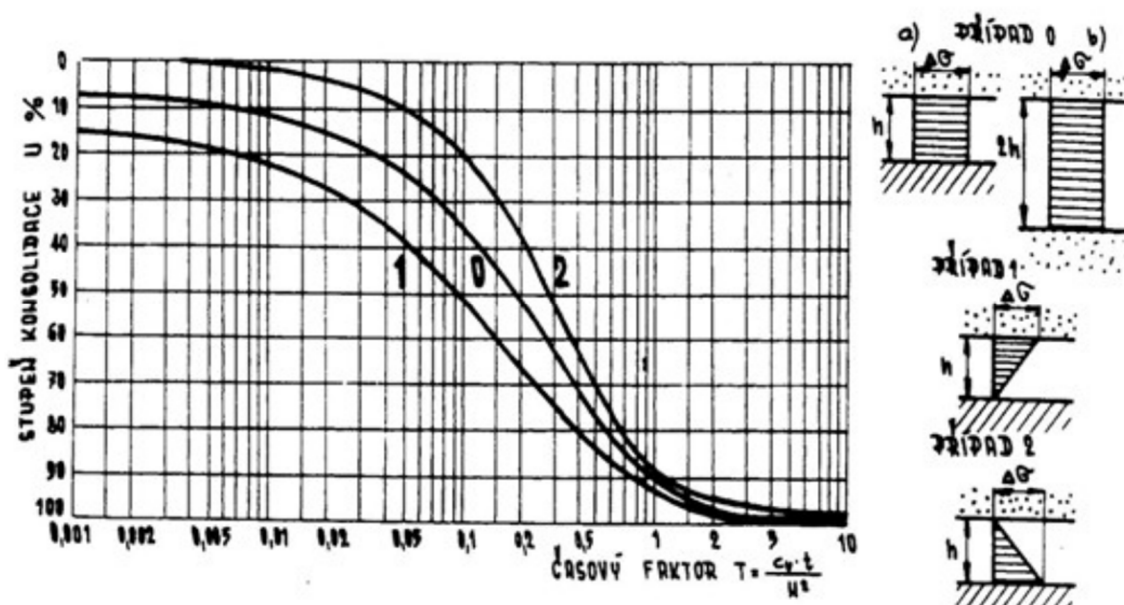
kde  $c_v$  je součinitel konsolidace. Tato rovnice je odvozena v [4]. V případě okamžitého zatížení se rovnice zjednoduší na následující tvar:

$$c_v * \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2-8)$$

Terzaghi řešil tuto rovnici pomocí bezrozměrné proměnné

$$T = \frac{c_v * t}{H^2} \quad (2-9)$$

Kde  $H$  je výška konsolidující vrstvy.  $T$  je bezrozměrný časový faktor a je funkcí stupně konsolidace  $U$ . Stupeň konsolidace  $U$  se určí z následujícího grafu (Obrázek 2-2).



Obrázek 2-2: Graf závislosti stupně konsolidace na časovém faktoru [5]

Tuto metodu jsem využil při výpočtu konsolidace v klasickém výpočtu. Výpočet je podrobněji popsán v kapitole 4.3.

Výpočet konsolidace v programu Plaxis probíhá na základě Biotovy 3D konsolidace. Stupeň konsolidace je obecně definován jako podíl sednutí ve sledovaném okamžiku a celkového sednutí. Plaxis ho však definuje jako podíl aktuálního pórového přetlaku ku maximálnímu dosaženému pórovému přetlaku na počátku konsolidace. [6] (Pórovým přetlakem je myšlený rozdíl mezi celkovým pórovým tlakem a hydrostatickým tlakem v systému, kde neprobíhá proudění.)

## 2.2 Sedání vrtaných pilot

Svislé tlakové zatížení přenáší vrtané piloty do okolní základové půdy svým pláštěm a patou. Z výsledků zkoušek plyne, že pokud není plášťové tření umělým způsobem redukováno (ochranný povlak pláště, ponechaná pažnice piloty), přenáší pilota zvětšující se zatížení většinou plášťovým třením, přičemž jeho velikost se zvětšuje se sedáním a dosahuje maxima při sedání v rozsahu 5 – 30 mm podle druhu základové půdy a prováděcí technologie. V hrubozrnných zeminách dochází k plné mobilizaci plášťového tření při nižších hodnotách sedání. V ulehých zeminách se projevuje efekt dilatance, který při dalším sedání způsobuje pokles tření na reziduální hodnotu. Pro aktivaci napětí na patě je třeba sedání odpovídající 80 – 120 % průměru  $d$  piloty. V rozsahu povolených hodnot sedání piloty bývá růst napětí v patě lineární vzhledem k sedání. Tento mechanismus platí v homogenních zeminách, případně ve vrstevnatých, kde se jednotlivé vrstvy svými deformačními vlastnostmi od sebe zásadně neliší. Pokud je pilota vetknuta do výrazně tužší vrstvy, poměr mezi mobilizovaným napětím v patě piloty a mobilizovaným plášťovým třením se zvětšuje. Jestliže je pilota opřena o prakticky nestačitelnou vrstvu (skalní podloží tř. R1, R2), tak by mělo být téměř celé zatížení přenášeno patou piloty. Plášťové tření by se mobilizovalo jen velmi omezeně a to z důvodu stlačení betonového dřívku piloty. Toto by však platilo jen v případě ideálně vyčištěné paty před betonáží. Technologické vlivy však není možné zcela vyloučit. Kritický posun pro plnou aktivaci plášťového tření není ovlivněn průměrem piloty (při aktivaci napětí na patě závisí na průměru), ale drsností jejího pláště. Velikost mobilizovaného plášťového tření závisí na průměru piloty a na drsnosti pláště, která se odvíjí od technologie provádění. [1], [2]

K přesnému popisu chování osamělé, vrtané a svisle zatížené piloty je třeba znát:

- Pracovní diagram piloty, který udává závislost mezi zatížením hlavy piloty a její sednutí v čase
- Průběh normálové síly v pilotě pro příslušné zatížení (případně průběh normálového napětí v pilotě s její délkou)

Z těchto vztahů je možné určit přenosovou funkci, která popisuje chování vrtané piloty. Výše uvedené vztahy a přenosovou funkci však není možné vyjádřit analyticky, protože závisí jak na vlastnostech základové půdy a materiálu piloty, tak na technologii provádění, což v současné době není možné do matematického vyjádření zahrnout. [1], [2]

## **2.3 Negativní plášťové tření**

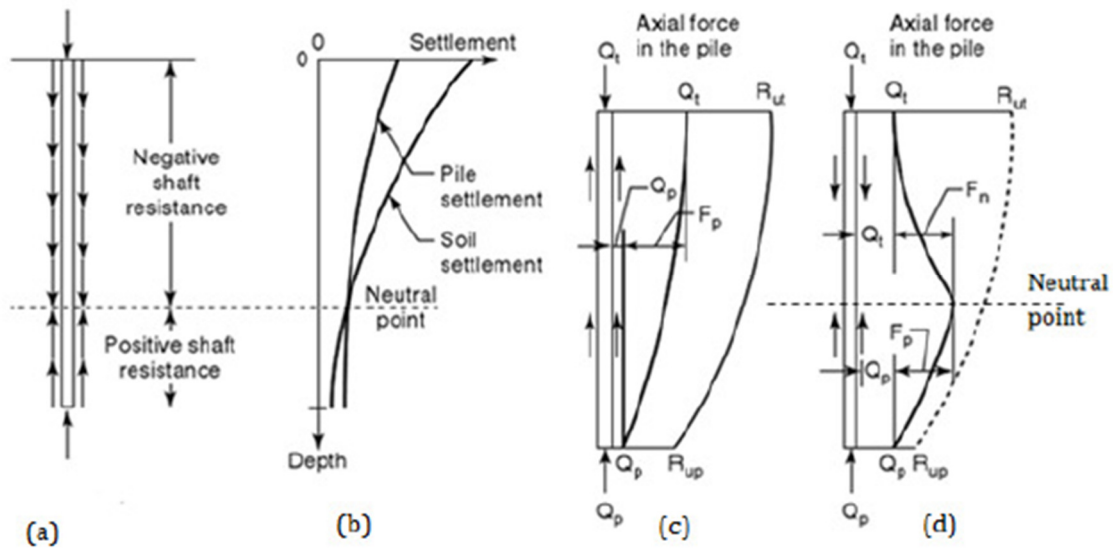
Negativní plášťové tření se objevuje, pokud okolní zemina sedá více než pilota. Tento jev může nastat, pokud je podloží zatížené dalším zatížením kromě vlastní piloty, např. násypem, nebo se zakládá přímo na násypu, který není dostatečně zkonsolidovaný. [17] Toto zvýšené sedání aktivuje plášťové tření na pilotě, které však působí opačným směrem, než kdyby veškeré zatížení přenášela pouze pilota. Okolní zemní masiv je na pilotu zavěšen. Toto tření tedy nezvyšuje únosnost piloty, ale naopak ji zmenšuje, jedná se o NPT. Teoreticky se jeho velikost stanoví stejným způsobem jako pozitivní plášťové tření. Podle měření v terénu však NPT nedosahuje takových hodnot jako pozitivní, a proto se v praxi osvědčilo zmenšit ho na 0,7.

Pokud je pilota v málo únosných a ne zcela zkonsolidovaných zeminách, které konsolidují méně jak 1 – 2 mm/rok, tak není třeba uvažovat negativní plášťové tření a stačí příslušnou vrstvu zeminy považovat za neúnosnou. [1]

### **2.3.1 Neutrální bod**

V místě, kde je velikost sedání piloty a okolní zeminy stejně velká, leží neutrální bod. Horní vrstvy zpravidla sedají více než pilota a naopak spodnější vrstvy sedají méně. Tento bod je tedy místem, kde NPT přechází do pozitivního. V neutrálním bodu v pilotě působí největší normálová síla. Poloha neutrálního bodu závisí na tom, v jaké vrstvě leží pata piloty. Pokud je pod patou málo stlačitelná skála, tak neutrální bod leží blízko paty piloty. Pokud je podloží pod patou méně únosné, tak se neutrální bod posouvá výš. [17] Na následujícím obrázku (Obrázek 2-3) je zobrazený neutrální bod a je tu schematicky naznačeno, jak na pilotu působí pozitivní a

negativní tření, jak tření souvisí se sedáním zeminy a piloty a jaký je průběh normálové síly v pilotě.

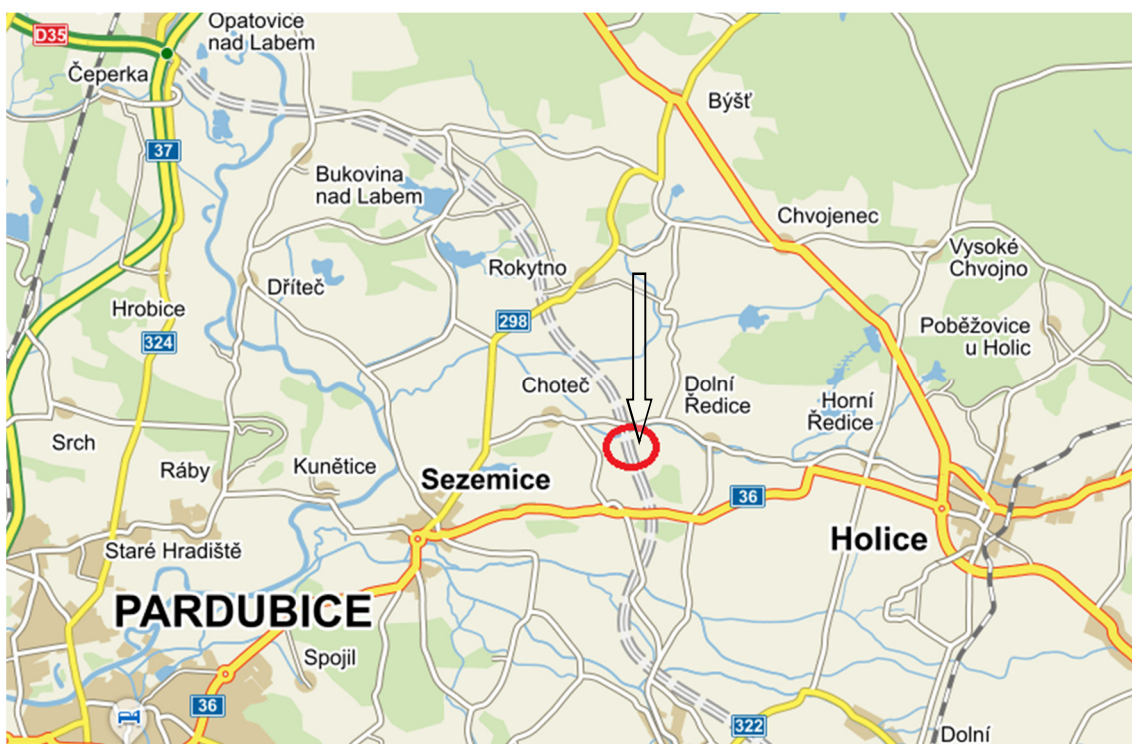


Obrázek 2-3: (a)neutrální bod, (b) sedání piloty a podloží,(c) pilota bez NPT, (d) pilota s NPT [18]

## 3 DÁLNIČNÍ MOST U DOLNÍCH ŘEDIC

### 3.1 Lokalita a stavba [16]

Posuzovaná stavba se nachází v Pardubickém kraji, v katastru obce Dolní Ředice. Jedná se o mostní objekt, který bude součástí dálnice D35 v úseku Opatovice – Časy a převádí dálnici přes potok, polní cestu a biokoridor u Dolních Ředic. Niveleta komunikace se nachází v nadmořské výšce 235,2 – 236,2 m n. m. a terén je přibližně ve výšce 229,5 m n. m. U opěry OP1 je niveleta 5,7 m nad terénem a u opěry OP4 6,5 m. Na následujícím obrázku (Obrázek 3-1) je mapa s plánovanou trasou dálnice D35, červeným kroužkem a šipkou je označeno místo, kde bude stát posuzovaný most.



Obrázek 3-1: Mapa s plánovanou trasou dálnice D35 [15]

Jsou to dva paralelní velmi podobné kolmé mosty šířky 14,3 m a 14,55 m. Liší se akorát tím, že levý most má na vnější římse protihlukovou stěnu a je proto o 0,25 metru širší než pravý. Jsou ve spádu 1,35% směrem od opěry OP4 k opěře OP1. Skládají se ze tří polí o rozpětí 20, 30 a 20 m. Mosty jsou monolitické a dodatečně předpjaté a staticky působí jako spojité nosníky. V příčném řezu to jsou dvoutrámy o výšce 1,6 m spojené mostovkou o výšce 0,4 m. Podélný řez mostu je v příloze P2.



Dále detailněji popíšu konstrukci opěry OP1 levého mostu. Konstrukce OP4 je velmi podobná, liší se akorát výškou násypu, na kterém je opěra založena. A navíc tato práce se zabývá porovnáním výpočtu sedání pilot ovlivněného negativním plášťovým třením právě pod touto opěrou. Na následujícím obrázku (Obrázek 3-2) je letecký pohled na úsek trasy v místě budoucího mostu.



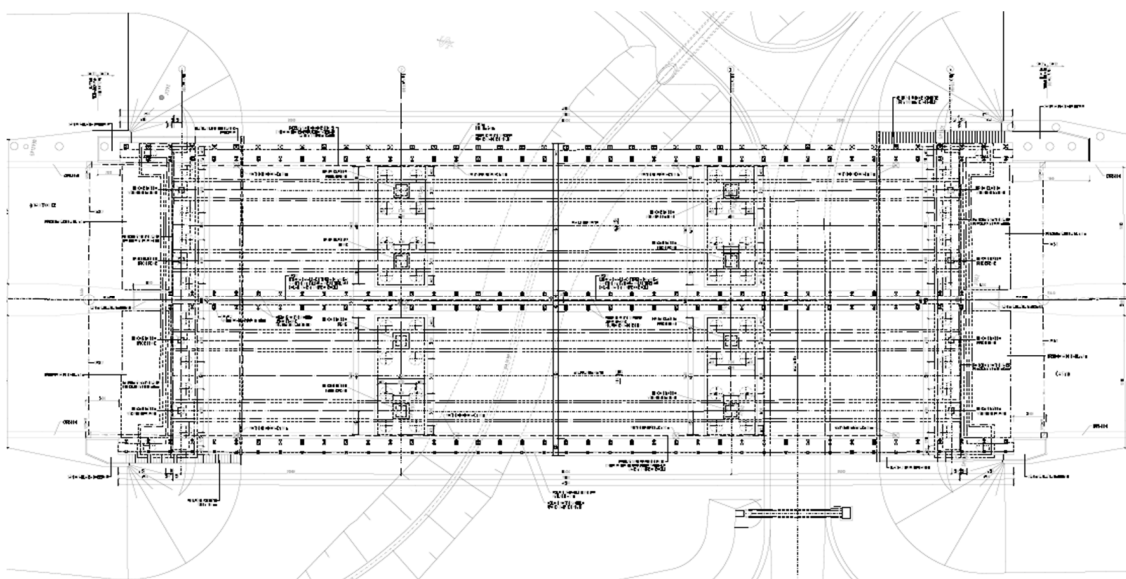
*Obrázek 3-2: Letecký pohled na místo stavby [16]*

Opěra OP1 je založena na kótě 230,454 m n. m. Jedná se o opěru ve tvaru L o výšce 4,7 m, jejíž poměrně subtilní stěna o tloušťce 0,5 m je vyztužena 2 pilíři o tloušťce 1,4 m a hloubce 1,5 m. Tyto pilíře jsou vysoké 1,59 m a 1,75 m a jsou na nich umístěna podélně posuvná ložiska, která přenáší zatížení mostu z trámů do opěry. Ložiska se tedy nepřenášejí žádné vodorovné podélné síly. Na vrchu stěny je k opěře vrubovým kloubem připojena přechodová deska o délce 4,25 m a tloušťce 0,3 m. Základový práh opěry je vysoký 1,0 m a široký 2,9 m. Jeho délka je 14,25 m. Délka stěny je 14,0 m. K opěře je ještě připojeno levé křídlo, které je založeno na vlastním základu stejné tloušťky jako základový práh a je s opěrou monoliticky spojeno. Tloušťka křídla je 0,8 m a sahá do vzdálenosti 4,3 m od rubové hrany opěry. Pro pravý most je opěra OP1 symetrická k levé opěře a opěry jsou od sebe oddílatovány. Levá opěra je založena na celkem 7

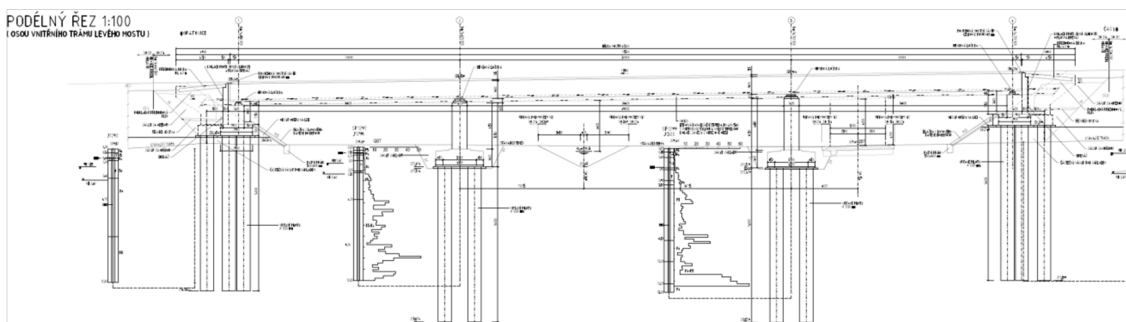
vrtaných pilotách průměru 1180/1100 mm a délce 14,0 m. Pod jedním pilířem jsou vždy tři piloty a pod křídlem jedna. Rozmístění pilot a půdorys opěry je na obrázku níž (Obrázek 3-5).

Pilíře P2 a P3 jsou navrženy jako dvoudřívové se čtvercovým průřezem dřívku o délce hrany 1,4 m a výšce 4,0 až 4,65 m. Jsou vetknuty do základového prahu o délce 10,8 m, šířce 4,3 m výšce 1,6 m. Základový práh je založený na 8 vrtaných pilotách (2 řady po 4) o průměru 1180/1100 mm a délce 14,0 m. Na pilíři P2 jsou umístěna podélně neposuvná ložiska a přenáší všechny podélné síly.

Pro lepší znázornění jsou schémata půdorysu a charakteristického podélného řezu na následujících obrázcích (Obrázek 3-3 a Obrázek 3-4). Půdorys levé části opěry je pak na třetím obrázku (Obrázek 3-5). Pro větší přehlednost jsou zde ponechány jen důležité kóty a piloty jsou zvýrazněny a očíslovány. Výkres tvaru celé opěry OP1 je v příloze P3. Podélný řez mostu je v příloze P2.

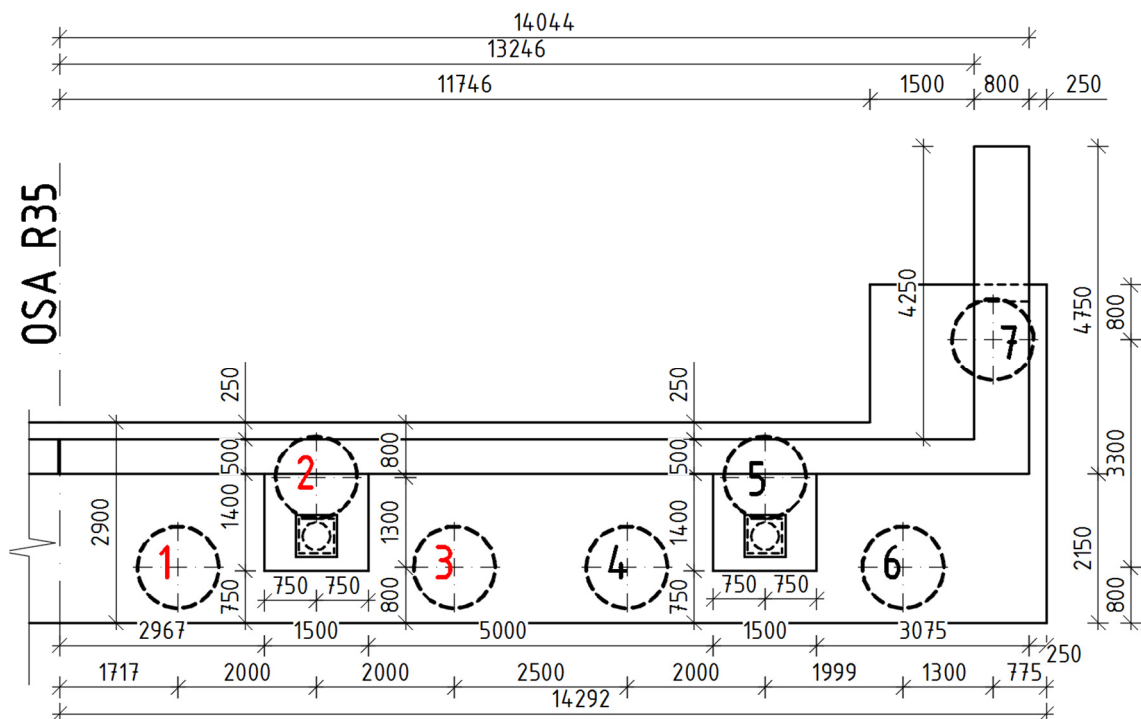


Obrázek 3-3: Půdorys



Obrázek 3-4: Charakteristický podélný řez





Obrázek 3-5: Půdorys levé části opěry OP1

## 3.2 Geotechnické poměry na staveništi

### 3.2.1 Geologické poměry

Z geomorfologického hlediska se budoucí stavba nachází v provincii Česká vysočina, subprovincii Česká tabule, oblasti Východočeská tabule, celku Východolabská tabule, podcelku Pardubická kotlina, okrsku Sezemická kotlina. [13]

Předkvartérní podloží je tvořené křídovými sedimenty charakteru slínovců a jílovců ze svrchního turonu až coniacu. V jejich nadloží se vyskytují kvartérní sedimenty v menší mocnosti tvořené převážně jíly a jílovitými hlínami s příměsí písku. [12]

V podloží se pod humózní vrstvou nachází vysoce plastické jíly a slíny o mocnosti 1-2 m. Skalní podklad je tvořen slínovci, které jsou v horní vrstvě silně zvětralé. Od hloubky 8-12 m přecházejí přes zvětralé do navětralých slínovců. [16]

Hladina podzemní vody se tu nachází v hloubce kolem 2,5 m pod povrchem a je mírně napjatá. Většinou je neagresivní, občas vykazuje nízkou agresivitu XA1 na betonové konstrukce. [16]

### 3.2.2 Geotechnický profil

Pro projekt dálnice D35, úsek Opatovice-Časy byl zpracován podrobný inženýrsko-geologický průzkum v roce 2012. Pro tento most bylo provedeno 5 jádrových vývrtů do hloubky 12 m. Vrt J1292 pod OP1, vrt J1296 pod P2, vrty J1298 a J1300 pod P3 a vrt J1302 pod OP4. Z geotechnického hlediska se nejhůře jeví profil z vrtu J1292, protože slínovec třídy R5 tu byl zastížen až v hloubce 4,7 m. V jeho nadloží jsou zcela zvětralé slínovce třídy R6 a fluvialní vysoce plastické jíly třídy F8. [16]

Jako reprezentativní profil jsem použil vrt J1292 (viz příloha P 5) o délce 12 m, který se nachází v místě budoucí opěry OP1 levého mostu a vytvořil jsem podle něj geotechnický profil, a to tak, že jsem z povrchu odebral vrstvu 0,3 m, která představuje sejmutí ornice, a o tuto hloubku jsem posunul všechny rozhraní zemin z vrtu. Horní dvě vrstvy jsem sloučil do jedné, protože měly podobné vlastnosti a z důvodu zjednodušení modelu. Snížením terénu nastala drobná nepřesnost s původním geostatickým napětím, které se pak ve výpočtu zmenší o velikost odpovídající tíze odebrané vrstvy. Avšak tato změna je zanedbatelná. V následující tabulce (Tabulka 3-1) je uvedený geotechnický profil.

Tabulka 3-1: Geotechnický profil

| Hloubka<br>[m] | Označení |             | Popis  |
|----------------|----------|-------------|--|
|                | Pasport  | ČSN 73 1001 |  |
| 0,0 – 0,7      | GT1b     | F4,F5       | hlína prachovitá až jílovitopísčítá, tuhá až pevná |
| 0,7 – 2,3      | GT5      | F8          | slín pevný, vysoce plastický, prachovitý, eluvium  |
| 2,3 – 4,4      | GT6      | R6          | slínovec silně zvětralý, rozdrobitelný, prachovitý |
| 4,4 – 11,7     | GT7      | R5          | slínovec zvětralý, rukou lámatelný                 |

Podzemní voda byla naražena v hloubce 2,5 m a ustálila se v hloubce 1,25 m. Podle ostatních vrtů by bylo možné předpokládat, že ve větší hloubce přechází slínovec z třídy R5 do R4, avšak vrt J1292 kvalitnější horninu neprokázal. Proto je z hlediska bezpečnosti dále uvažováno, že v podloží není lepší hornina než R5.

## 4 KLASICKÝ VÝPOČET

Jako první způsob výpočtu jsem zvolil takový, který nevyžaduje příliš složité a specifické softwarové nástroje a používá analytických a semiempirických metod ke stanovení výsledného sedání.

Tento výpočet má tři základní body:

- Stanovení průběhu sedání podloží přitíženého násypem v čase
- Určení zatížení pilot
- Výpočet sedání nejvíce zatížené piloty

### 4.1 Způsob výpočtu

Nejdříve jsem stanovil celkové sednutí podloží od zatížení násypem, potom jsem výpočtem průběhu konsolidace určil stupeň konsolidace podloží v okamžiku počátku výstavby pilot a opěry a dále v jednotlivých významných fázích výstavby. Z jednotlivých stupňů konsolidace jsem potom určil velikost sednutí podloží mezi jednotlivými fázemi.

Z těchto sednutí jsem spočítal negativní plášťové tření pro určitou fázi. Dále jsem NPT nahradil silou, kterou jsem spolu s odpovídající reakcí přenesenou z opěry zatížil pilotu a spočítal její sednutí v jednotlivých fázích pomocí mezní zatěžovací křivky. Nakonec jsem tyto přírůstky sednutí sečetl a získal výsledné sedání piloty, případně sednutí mezi určitými fázemi, které nás zajímá.

#### 4.1.1 Použitý software

Pro výpočet průběhu sedání a konsolidace jsem použil program GEO5 – Sedání od firmy Fine. Roznos sil z opěry do pilot jsem spočítal pomocí programu Scia Engineer jako rovinný rám na pružných podporách. Mezní zatěžovací křivku piloty jsem vytvořil a výpočet sedání provedl v tabulkovém editoru MS Excel.

## 4.2 Fáze výstavby

Na začátku výpočtu jsem si stanovil sedm fází výstavby a existence konstrukce. Jsou uvedeny v následující tabulce (Tabulka 4-1). Zvýrazněná fáze se liší pro jednotlivé varianty.

Tabulka 4-1: Fáze výstavby – klasický výpočet

| Fáze výstavby a vnášení zatížení |                    | 1. varianta  |            |            | 2. a 3. varianta |            |            | Konec fáze od $t_0$<br>[den] |       |
|----------------------------------|--------------------|--------------|------------|------------|------------------|------------|------------|------------------------------|-------|
|                                  |                    | Začátek fáze | Délka fáze | Konec fáze | Začátek fáze     | Délka fáze | Konec fáze |                              |       |
|                                  |                    | [den]        | [den]      | [den]      | [den]            | [den]      | [den]      |                              |       |
| 0. fáze                          | Sypání násypu      |              | 0          | 30         | 30               | 0          | 30         | 30                           |       |
| 1. fáze                          | Konsolidace        |              | 30         | 60         | 90               | 30         | 180        | 210                          | 0     |
| 2. fáze                          | Piloty             | $t_0$        | 90         | 45         | 135              | 210        | 45         | 255                          | 45    |
| 3. fáze                          | Opěra              | $t_1$        | 135        | 60         | 195              | 255        | 60         | 315                          | 105   |
| 4. fáze                          | Dostavba           | $t_2$        | 195        | 270        | 465              | 315        | 270        | 585                          | 375   |
| 5. fáze                          | Uvedení do provozu | -            | 465        | 0          | 465              | 585        | 0          | 585                          | 375   |
| 6. fáze                          | 3 roky provozu     | $t_3$        | 465        | 1095       | 1560             | 585        | 1095       | 1680                         | 1470  |
| 7. fáze                          | Konec životnosti   | $t_4$        | 1560       | 36500      | 38060            | 1680       | 36500      | 38180                        | 37970 |

Druhá a třetí varianta se od první liší délkou první fáze. Místo 60 dní bude konsolidace trvat 180 dní. Ve třetí variantě bude navíc ještě použitý konsolidační násyp o výšce 3 m, který svým přitížením způsobí urychlení konsolidace. Odstraněn bude na konci 1. fáze.

Samotné fáze výstavby (např. vrtání a betonáž pilot nebo výstavba opěry) budou pravděpodobně provedeny rychleji, než je uvedeno výše v tabulce (Tabulka 4-1) ve sloupečku *Délka fáze*, avšak v tomto čase jsou zahrnuty i technologické přestávky jako je dosažení potřebné pevnosti betonu apod.

## 4.3 Konsolidace podloží pod násypem

Pro výpočet sedání podloží pod násypem jsem použil postup dle ČSN 73 1001 s využitím strukturální pevnosti zeminy. Strukturální pevnost se spočítá z původního geostatického napětí, které se vynásobí součinitelem  $m$ , který nabývá hodnot od 0,1 do 0,5 podle druhu zeminy. Dle tohoto výpočtu se stanoví deformační zóna. Ta sahá do takové hloubky, kde se strukturální pevnost zeminy vyrovná napětí od přitížení. Není tedy třeba ji odhadovat předem. [10]

$$s_c = \sum_{n=1}^n \frac{\sigma_{z_i} - m_i * \sigma_{or_i}}{E_{oed_i}} * \bar{h}_i \quad (4-1)$$

Výpočet sedání a konsolidace jsem provedl v programu GEO5 – Sedání. Tento program řeší sedání násypu jako rovinnou úlohu. Ideálně by tedy násyp měl mít nekonečnou délku na obě strany, což není v tomto případě splněno. Jedná se však o zjednodušený výpočet, je tedy možné tuto podmínku zanedbat.

K výpočtu přírůstku napětí od nekonečného pásového přetížení používá teorii pružného poloprostoru podle Boussinesqa. Lichoběžníkové přetížení je programem automaticky rozděleno na deset pásových zatížení. Výsledné napětí v určitém bodě se stanoví jako součet změn napětí od jednotlivých pásových přetížení. [11]

Výpočet konsolidace je provedený za využití principu Terzaghiho jednoosé konsolidace (kapitola 2.1.1). Průběh konsolidace je spočtený z celkového sednutí podloží. Pokud není u zeminy známý součinitel konsolidace  $c_v$ , tak se vypočítá pomocí oedometrického modulu  $E_{oed}$ , součinitele filtrace  $k$  a objemové tíhy vody  $\gamma_w$ . [4], [11]

$$c_v = \frac{E_{oed} * k}{\gamma_w} \quad (4-2)$$

Pro nehomogenní vrstvy zemín s rozdílným  $c_v$  je vypočten celkový konsolidační součinitel jako vážený průměr součinitelů jednotlivých zemín.

Dále je spočítán časový faktor  $T$ , který je závislý na dráze odtoku vody. Určí se z rovnice (2-9) uvedené v kapitole 2.1.1. Tato dráha odpovídá mocnosti konsolidované vrstvy v případě odvodnění jen z jednoho směru a polovině mocnosti vrstvy v případě odvodnění z obou stran. Mocnost konsolidující vrstvy odpovídá hloubce deformační zóny. [4], [11]

$$T = \frac{c_v * t}{H^2} \quad (2-9)$$

Výsledkem výpočtu je stupeň konsolidace  $U$ , který nabývá hodnot od nuly do jedné. Program GEO5 ho spočítá z relativně složité matematické řady. Ve výpočtu dokáže zohlednit, zda je zatížení vneseno na počátku fáze anebo po dobu fáze lineárně narůstá. Stupeň konsolidace je také možné určit z grafu závislosti stupně konsolidace na časovém faktoru (Obrázek 2-2), kde jsou tři křivky odpovídající třem různým průběhům napětí.

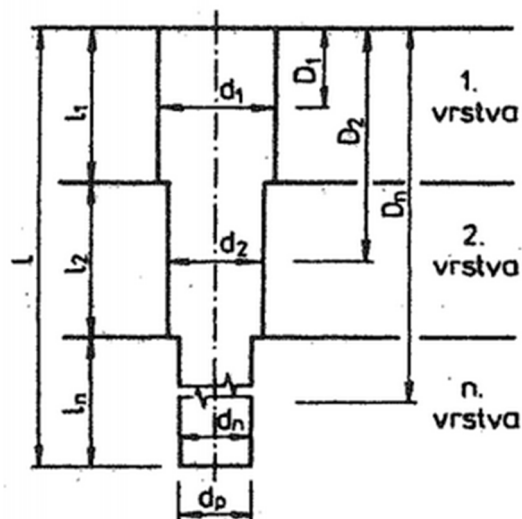
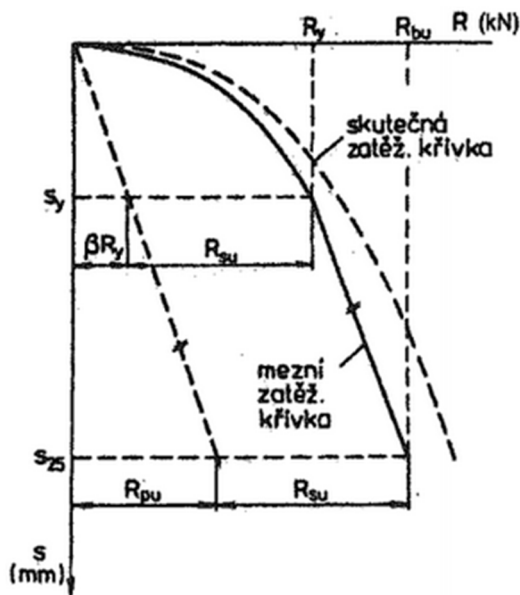
Sedání v určitém čase  $s_t$  se pak určí následovně:

$$s_t = U * s_c \quad (4-3)$$

kde  $s_c$  je celkové sednutí a  $U$  stupeň konsolidace v příslušné fázi.

#### 4.4 Mezní zatěžovací křivka piloty [1], [2]

Sedání piloty je určeno podle teorie mezní zatěžovací křivky. V tomto způsobu výpočtu narůstá plášťové tření až do jeho plné mobilizace, která je na grafu závislosti sedání na zatížení (Obrázek 4-1) popsána body  $s_y$  a  $R_y$ . Dále pak již plášťové tření nevzrůstá a zvětšuje se pouze únosnost paty piloty. Sedání  $s_y$  a síla na hranici plné mobilizace plášťového tření  $R_y$  jsou závislé na více faktorech (okolní zemina, délka a průměr piloty, technologie výstavby).  $s_y$  se obvykle pohybuje v rozmezí 5 až 15 mm. Sedání na první větvi do plné mobilizace plášťového tření je popsáno parabolou druhého stupně. Únosnost na patě vzrůstá po celou dobu zatěžování lineárně a je určena přenosovým koeficientem  $\beta$  a silou  $R_y$  při sedání  $s_y$ .



Obrázek 4-1: Mezní zatěžovací křivka piloty [1]

Obrázek 4-2: Schéma piloty ve vrstevnaté zemině [1]

Plášťové tření a únosnost na patě jsou určeny regresními křivkami, pro které odpovídají koeficienty  $a$ ,  $b$ ,  $e$ ,  $f$ , které byly stanoveny statistickou analýzou z několika set statických zatěžovacích zkoušek.

Rovnice plášťového tření:

$$q_{si} = a - \frac{b}{D_i/d_i} \quad (4-4)$$

kde  $a$ ,  $b$  jsou koeficienty určené podle relativní ulehlosti  $l_D$  pro nesoudržné zeminy nebo indexu konzistence  $l_c$  pro soudržné zeminy nebo podle třídy pro poloskalní horniny. Mezi hodnotami by se nemělo interpolovat.  $D_i$  je hloubka od terénu do středu vrstvy, pro kterou se určuje plášťové tření, a  $d_i$  je průměr piloty.

Hodnota mezní síly na plášti se spočítá:

$$R_{su} = m_1 * m_2 * \pi * \sum_{i=1}^n (d_i * l_i * q_{si}) \quad (4-5)$$

kde  $m_1$  je koeficient podle druhu zatížení: 0,7 pro provozní a 1,0 pro extrémní zatížení,  $m_2$  je koeficient vyjadřující vliv ochrany dřívku. Pohybuje se v rozmezí 0,15-1.  $l_i$  je mocnost příslušné vrstvy zeminy.

Napětí na patě se spočítá:

$$q_p = e - \frac{f}{l/d_p} \quad (4-6)$$

Veškeré koeficienty jsou uvedeny v [1], [2].  $l$  je délka piloty a  $d_p$  je její průměr v patě.

Pokud je pilota ve vrstevnatém podloží (Obrázek 4-2), což je skoro vždy, tak se dále spočítá průměrné plášťové tření  $\bar{q}_s$  jako vážený průměr jednotlivých hodnot  $q_{si}$ .

$$\bar{q}_s = \frac{\sum(d_i * l_i * q_{si})}{\sum(d_i * l_i)} \quad (4-7)$$

Dále se stanoví koeficient přenosu zatížení do paty piloty  $\beta$ :

$$\beta = \frac{q_p}{q_p + 4 * \bar{q}_s * l/d_p} \quad (4-8)$$

Zatížení na mezi plné mobilizace plášťového tření je:

$$R_y = \frac{R_{su}}{1 - \beta} \quad (4-9)$$

Velikost sedání odpovídající síle  $R_y$  je:

$$s_y = I * \frac{R_y}{\bar{d} * \bar{E}_s} \quad (4-10)$$

kde  $I$  je příčinkový koeficient sedání,  $\bar{d}$  je vážený průměr profilu piloty a  $\bar{E}_s$  je vážený průměr sečnového modulu deformace zemin podél dřívku piloty.

Příčinkový koeficient  $I$  se stanoví:

$$I = I_1 * R_k \quad (4-11)$$

$I_1$  je základní příčinkový koeficient, který je závislý na poměru  $l/d$ .  $R_k$  je korekční součinitel zohledňující tuhost piloty v závislosti na  $l/d$ . Příslušné grafy potřebné ke stanovení těchto součinitelů jsou v [1] a [2].

Jestliže jsou známé  $R_y$  a  $s_y$ , tak je možné již dopočítat sednutí pro libovolné zatížení. Pro první větev ( $R < R_y$ ) platí:

$$s = s_y * \left(\frac{R}{R_y}\right)^2 \quad (4-12)$$

Druhá větev mezní zatěžovací křivky je přímka definovaná bodem se souřadnicemi [ $s_y$ ,  $R_y$ ] a bodem se souřadnicemi [ $s_{25}$ ,  $R_{bu}$ ].  $s_{25}$  je sedání 25 mm a  $R_{bu}$  je zatížení piloty při sedání 25 mm.

$$R_{bu} = R_{su} + R_{pu} \quad (4-13)$$

kde

$$R_{pu} = \beta * R_y * \left(\frac{s_{25}}{s_y}\right) \quad (4-14)$$

Pro druhou větev sedání ( $R \geq R_y$ ) platí:

$$s = s_y + \frac{s_{25} - s_y}{R_{bu} - R_y} * (R - R_y) \quad (4-15)$$



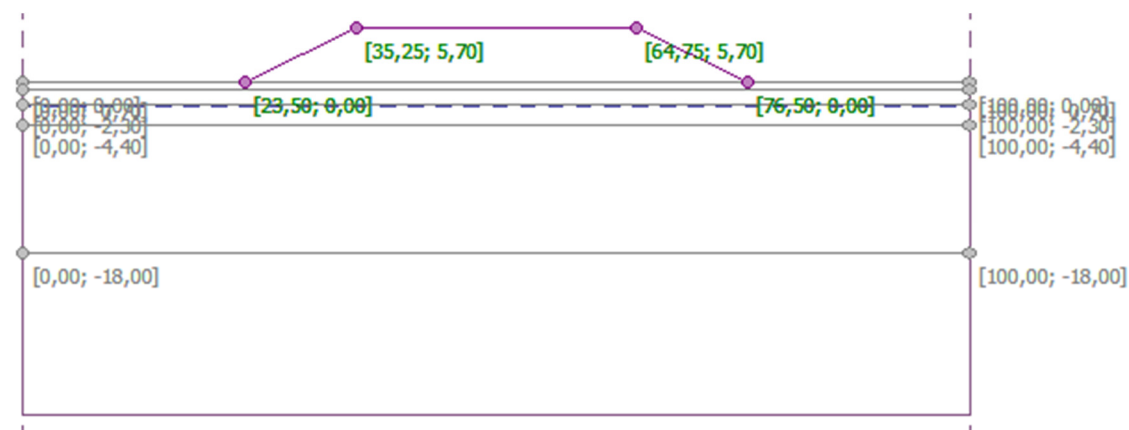
## 4.5 Výpočet sedání násypu

Celkové sedání podloží pod násypem a průběh konsolidace jsem stanovil v programu GEO5 – Sedání.

### 4.5.1 Geometrie konstrukce

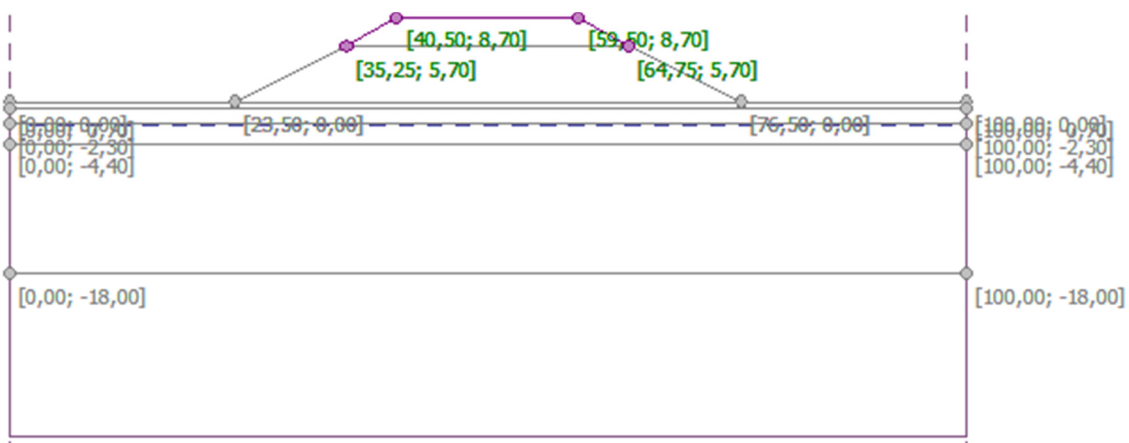
Celkový model má šířku 100 m, násyp je přesně ve středu. Sahá do hloubky 35 m, kde se již neprojevuje sedání.

Model násypu je vysoký 5,7 m. Jeho šířka v patě je 53 m, v koruně 29,5 m. Sklony svahů jsou přibližně 1:2. Na následujícím obrázku (Obrázek 4-3) je znázorněna jeho geometrie.



Obrázek 4-3: Geometrie násypu

Na následujícím obrázku (Obrázek 4-4) je třetí varianta s konsolidačním násypem. Jeho výška je 3 m. Šířka v koruně je 19,5 m a sklon svahů 1:1,75.



Obrázek 4-4: Geometrie násypu s konsolidačním násypem

#### 4.5.2 Geotechnický profil

Geotechnický profil podloží je zobrazen v následující tabulce (Tabulka 4-2):

Tabulka 4-2: Geotechnický profil – klasický výpočet

| Hloubka<br>[m] | Označení |             |
|----------------|----------|-------------|
|                | Pasport  | ČSN 73 1001 |
| 0,0 – 0,7      | GT1b     | F4,F5       |
| 0,7 – 2,3      | GT5      | F8          |
| 2,3 – 4,4      | GT6      | R6          |
| 4,4 – 35,0     | GT7      | R5          |

Hladina podzemní vody je v hloubce 1,25 m.

#### 4.5.3 Parametry zemin

Většinu parametrů zemin jsem převzal z pasportu (příloha P6), který je součástí podrobného inženýrsko-geologického průzkumu. V něm se uvádí, že hodnoty poissonova čísla a koeficientu filtrace byly stanoveny na základě místní zkušenosti jako obezřetný odhad. Ostatní parametry byly získány nebo odvozeny z výsledků laboratorních zkoušek.

V pasportu byla uvedena hodnota deformačního modulu  $E_{def}$  pouze pro poloskalní horniny, pro zeminy chyběla. Stanovil jsem ji tedy z tabulky směrných normových charakteristik (ČSN 73 1001) tak, jak je pro konkrétní třídu a konzistenci zeminy typické. Některé hodnoty objemové tíhy, smykových a deformačních parametrů byly po konzultaci s doc. Masopustem mírně upraveny, aby mohly být považovány za charakteristické. Materiál násypu nebyl v zadávací dokumentaci blíže specifikován, proto jsem vybral zeminu, jejíž parametry by měly přibližně vystihovat obvyklé vlastnosti zemin vhodných k výstavbě násypu. Parametry zemin použité při výpočtu jsou v tabulce na další straně (Tabulka 4-3).

Tabulka 4-3: Vstupní parametry zemín

| Označení zeminy |             | Objemová tíha        | Objemová tíha saturované zeminy | Efektivní úhel vnitřního tření | Efektivní soudržnost | Deformační modul | Poissonovo číslo |         | Edometrický modul | Koeficient strukturní pevnosti | Součinitel konsolidace | Koeficient filtrace |
|-----------------|-------------|----------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------|------------------|------------------|---------|-------------------|--------------------------------|------------------------|---------------------|
| Pasport         | ČSN 73 1001 | $\gamma$             | $\gamma_{sat}$                  | $\varphi_{ef}$                 | $c_{ef}$             | $E_{def}$        | $\nu$            | $\beta$ | $E_{oed}$         | $m$                            | $c_v$                  | $k$                 |
|                 |             | [kN/m <sup>3</sup> ] |                                 | [°]                            | [kPa]                | [Mpa]            | [-]              | [-]     | [Mpa]             | [-]                            | [m/den]                |                     |
| GT1b            | F4,F5       | 19,5                 | 20,5                            | 23                             | 5                    | 4,00             | 0,37             | 0,57    | 7,07              | 0,15                           |                        | 0,1                 |
| GT5             | F8          | 20,5                 | 21                              | 20                             | 15                   | 4,00             | 0,42             | 0,39    | 10,21             | 0,15                           | 0,01                   |                     |
| GT6             | R6          | 20,5                 | 21                              | 22                             | 16                   | 6,00             | 0,40             | 0,47    | 12,86             | 0,30                           | 0,05                   |                     |
| GT7             | R5          | 21                   | 21,5                            | 24                             | 18                   | 20,00            | 0,30             | 0,74    | 26,92             | 0,30                           | 0,10                   |                     |
| násyp           | S4          | 19                   | 20                              | 30                             | 3                    | 25,00            | 0,30             | 0,74    | 33,65             | 0,10                           |                        | 1                   |

#### 4.5.4 Přetížení násypu

V 7. fázi (Uvedení do provozu) v čase  $t_3$  je násyp přetížen rovnoměrným pásovým zatížením o šířce 26 m a velikosti 10 kN/m<sup>2</sup>, což představuje z části položení vrstev vozovky a z části zatížení od dopravy. Zatížení je umístěno symetricky na střed násypu.

#### 4.5.5 Výpočet sedání a konsolidace

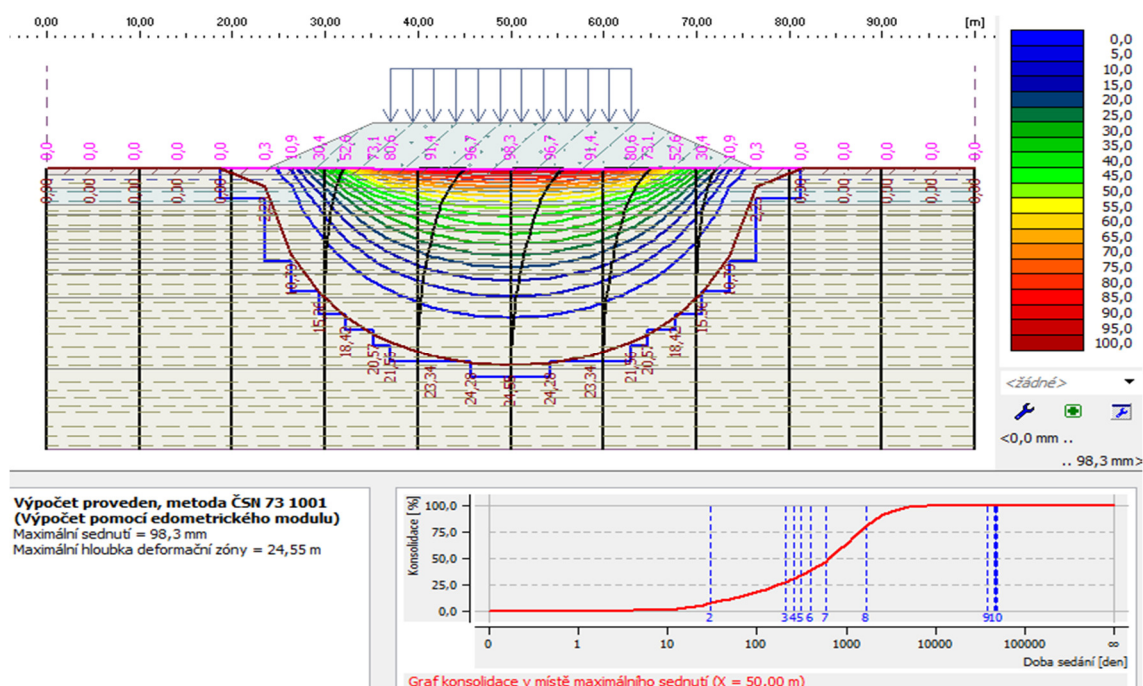
Program Sedání počítá hodnoty sedání v určitých vrstvách a v různých řezech. Uživatel si může zvolit, jakou hustotu budou tyto vrstvy a řezy mít. Pro další výpočty byly použity hodnoty sedání z řezu pod středem násypu.

Jelikož jsou v podloží poměrně nepropustné slínovce třídy R5, tak se jedná o jednostrannou konsolidaci odvodněnou z povrchu. Problematičnost tohoto výpočtu spočívá v tom, že pokud bychom měli uvažovat konsolidační vrstvu o stejné mocnosti, jako je dosah deformační zóny, tak by vyšla nereálně dlouhá doba konsolidace. Je to z toho důvodu, že ve výpočtu časového faktoru se mocnost konsolidující vrstvy vyskytuje v druhé mocnině a doba konsolidace se tím neúměrně zvětšuje.

GEO 5 počítá sednutí v určité fázi jako celkové sednutí od zatížení pro danou fázi vynásobené odpovídajícím stupněm konsolidace, což vede k nesouvislejším výsledkům, pokud se zatížení v další fázi změní (konsolidační násyp, zatížení od dopravy). Dle výpočtu deformační zóna sahá u prvních dvou variant bez konsolidačního násypu do hloubky 24,55 m. U třetí varianty z důvodu zvýšeného zatížení od konsolidačního násypu sahá až do hloubky 29,19 m. Spodní

hranici konsolidující vrstvy jsem uměle umístil do hloubky, ve které je velikost celkového sedání přibližně 10% ze sednutí na povrchu. Nachází se v hloubce 16,0 m. V prvních dvou variantách vychází celkové sednutí v této hloubce 9,7 mm a na povrchu 98,3 mm. Z toho vyplývá, že na spodních přibližně 35% mocnosti celé konsolidující vrstvy připadá pouze 10 % sedání, což je výrazný nepoměr, který by způsoboval nadhodnocení doby konsolidace. U třetí varianty je toto sednutí v hloubce 16,0 m vyšší (konsolidační násyp podloží více přitíží), avšak z důvodu zachování stejných výpočetních podmínek jsem nechal hranici konsolidační vrstvy ve stejné hloubce. Jako horní ohraničení konsolidující vrstvy je hloubka 0,7 m. Nejvyšší vrstva zeminy je totiž oproti spodnějším vrstvám propustná a uvažuji, že její sednutí proběhne v krátké době po zatížení násypem.

Stupeň konsolidace pro danou fázi je určený tak, že se spočítá poměr mezi sednutím konsolidující vrstvy v dané fázi a celkovým sednutím stejné vrstvy (hodnoty v referenčních hloubkách: 0,7 m; 16,0 m). Tímto stupněm konsolidace se vynásobí celkové sednutí (kromě horní vrstvy) a pomocí této extrapolace se získá i sednutí pod uvažovanou konsolidující vrstvou. Na obrázku níže (Obrázek 4-5) je zobrazeno celkové sednutí pro první variantu.



Obrázek 4-5: Celkové sednutí ve variantě 1

Nejdůležitější výstupní hodnoty pro další výpočet jsou sednutí mezi jednotlivými fázemi, ze kterých se pak určuje negativní plášťové tření. Průběh sedání podloží pod násypem je uvedený v následujících tabulkách. (Tabulka 4-4, Tabulka 4-5, Tabulka 4-6)

Tabulka 4-4: Průběh sedání podloží násypu v jednotlivých fázích pro 1. variantu

| 1. VARIANTA                 |                       | Sedání [mm] v jednotlivých fázích |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|
| Fáze                        | t <sub>0</sub>        | t <sub>0</sub> - t <sub>1</sub>   | t <sub>1</sub>    | t <sub>1</sub> - t <sub>2</sub> | t <sub>2</sub>    | t <sub>2</sub> - t <sub>3</sub> | t <sub>3</sub>    | t <sub>3</sub> - t <sub>4</sub> | t <sub>4</sub>    | t <sub>4</sub> - t <sub>∞</sub> | t <sub>∞</sub>    |                 |
| U                           | 0,155                 |                                   | 0,196             |                                 | 0,240             |                                 | 0,349             |                                 | 0,786             |                                 | 1                 |                 |
| h [m]                       | S <sub>zb,t0-t∞</sub> | S <sub>t0</sub>                   | ΔS <sub>0-1</sub> | S <sub>t1</sub>                 | ΔS <sub>1-2</sub> | S <sub>t2</sub>                 | ΔS <sub>2-3</sub> | S <sub>t3</sub>                 | ΔS <sub>3-4</sub> | S <sub>t4</sub>                 | ΔS <sub>4-∞</sub> | S <sub>t∞</sub> |
| 0                           | 73,3                  | 25,0                              | 3,6               | 28,6                            | 3,8               | 32,4                            | 9,5               | 41,9                            | 37,8              | 79,7                            | 18,6              | 98,3            |
| 0,7                         | 73,3                  | 13,4                              | 3,6               | 17,0                            | 3,8               | 20,8                            | 9,5               | 30,3                            | 37,8              | 68,1                            | 18,6              | 86,7            |
| 2,3                         | 58,3                  | 10,6                              | 2,9               | 13,5                            | 3,0               | 16,6                            | 7,5               | 24,1                            | 30,1              | 54,1                            | 14,8              | 68,9            |
| 4,4                         | 44,0                  | 8,0                               | 2,2               | 10,2                            | 2,3               | 12,5                            | 5,7               | 18,2                            | 22,7              | 40,9                            | 11,1              | 52,0            |
| 5,7                         | 38,7                  | 7,1                               | 1,9               | 9,0                             | 2,0               | 11,0                            | 5,0               | 16,0                            | 20,0              | 36,0                            | 9,8               | 45,8            |
| 7,4                         | 32,2                  | 5,9                               | 1,6               | 7,5                             | 1,7               | 9,2                             | 4,2               | 13,3                            | 16,6              | 29,9                            | 8,2               | 38,1            |
| 9,3                         | 25,6                  | 4,7                               | 1,3               | 5,9                             | 1,3               | 7,3                             | 3,3               | 10,6                            | 13,2              | 23,8                            | 6,5               | 30,3            |
| 10,5                        | 21,8                  | 4,0                               | 1,1               | 5,1                             | 1,1               | 6,2                             | 2,8               | 9,0                             | 11,3              | 20,3                            | 5,5               | 25,8            |
| 11,7                        | 18,3                  | 3,3                               | 0,9               | 4,2                             | 1,0               | 5,2                             | 2,4               | 7,5                             | 9,4               | 17,0                            | 4,6               | 21,6            |
| 13                          | 14,8                  | 2,7                               | 0,7               | 3,4                             | 0,8               | 4,2                             | 1,9               | 6,1                             | 7,6               | 13,8                            | 3,8               | 17,5            |
| referenční sedání - korekce |                       |                                   |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                 |
| 0,7                         |                       | 19,3                              |                   | 22,5                            |                   | 25,9                            |                   | 36,6                            |                   | 70,2                            |                   | 86,7            |
| 16                          |                       | 7,4                               |                   | 7,4                             |                   | 7,4                             |                   | 9,7                             |                   | 9,7                             |                   | 9,7             |

Tabulka 4-5: Průběh sedání podloží násypu v jednotlivých fázích pro 2. variantu

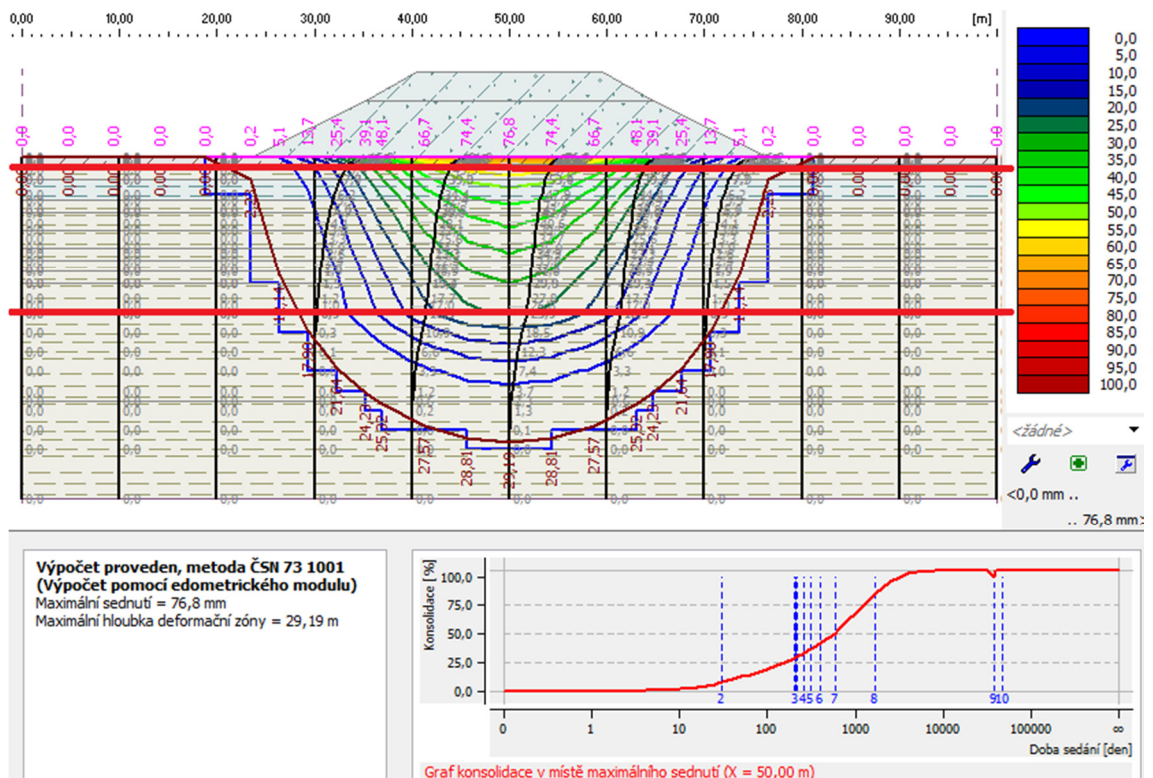
| 2. VARIANTA                 |                       | Sedání [mm] v jednotlivých fázích |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                 |
|-----------------------------|-----------------------|-----------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|---------------------------------|-------------------|-----------------|
| Fáze                        | t <sub>0</sub>        | t <sub>0</sub> - t <sub>1</sub>   | t <sub>1</sub>    | t <sub>1</sub> - t <sub>2</sub> | t <sub>2</sub>    | t <sub>2</sub> - t <sub>3</sub> | t <sub>3</sub>    | t <sub>3</sub> - t <sub>4</sub> | t <sub>4</sub>    | t <sub>4</sub> - t <sub>∞</sub> | t <sub>∞</sub>    |                 |
| U                           | 0,249                 |                                   | 0,277             |                                 | 0,310             |                                 | 0,397             |                                 | 0,805             |                                 | 1                 |                 |
| h [m]                       | S <sub>zb,t0-t∞</sub> | S <sub>t0</sub>                   | ΔS <sub>0-1</sub> | S <sub>t1</sub>                 | ΔS <sub>1-2</sub> | S <sub>t2</sub>                 | ΔS <sub>2-3</sub> | S <sub>t3</sub>                 | ΔS <sub>3-4</sub> | S <sub>t4</sub>                 | ΔS <sub>4-∞</sub> | S <sub>t∞</sub> |
| 0                           | 65,1                  | 33,2                              | 2,4               | 35,6                            | 2,9               | 38,5                            | 7,5               | 46,1                            | 35,4              | 81,4                            | 16,9              | 98,3            |
| 0,7                         | 65,1                  | 21,6                              | 2,4               | 24,0                            | 2,9               | 26,9                            | 7,5               | 34,5                            | 35,4              | 69,8                            | 16,9              | 86,7            |
| 2,3                         | 51,7                  | 17,2                              | 1,9               | 19,1                            | 2,3               | 21,4                            | 6,0               | 27,4                            | 28,1              | 55,5                            | 13,4              | 68,9            |
| 4,4                         | 39,0                  | 13,0                              | 1,4               | 14,4                            | 1,8               | 16,1                            | 4,5               | 20,7                            | 21,2              | 41,9                            | 10,1              | 52,0            |
| 5,7                         | 34,4                  | 11,4                              | 1,2               | 12,7                            | 1,5               | 14,2                            | 4,0               | 18,2                            | 18,7              | 36,9                            | 8,9               | 45,8            |
| 7,4                         | 28,6                  | 9,5                               | 1,0               | 10,5                            | 1,3               | 11,8                            | 3,3               | 15,1                            | 15,5              | 30,7                            | 7,4               | 38,1            |
| 9,3                         | 22,7                  | 7,6                               | 0,8               | 8,4                             | 1,0               | 9,4                             | 2,6               | 12,0                            | 12,4              | 24,4                            | 5,9               | 30,3            |
| 10,5                        | 19,4                  | 6,4                               | 0,7               | 7,1                             | 0,9               | 8,0                             | 2,2               | 10,3                            | 10,5              | 20,8                            | 5,0               | 25,8            |
| 11,7                        | 16,2                  | 5,4                               | 0,6               | 6,0                             | 0,7               | 6,7                             | 1,9               | 8,6                             | 8,8               | 17,4                            | 4,2               | 21,6            |
| 13                          | 13,1                  | 4,4                               | 0,5               | 4,8                             | 0,6               | 5,4                             | 1,5               | 7,0                             | 7,1               | 14,1                            | 3,4               | 17,5            |
| referenční sedání - korekce |                       |                                   |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                                 |                   |                 |
| 0,7                         |                       | 26,6                              |                   | 28,7                            |                   | 31,3                            |                   | 40,3                            |                   | 71,7                            |                   | 86,7            |
| 16                          |                       | 7,4                               |                   | 7,4                             |                   | 7,4                             |                   | 9,7                             |                   | 9,7                             |                   | 9,7             |

Pro třetí variantu byl výpočet sednutí ještě poněkud komplikovanější. Nejprve jsem spočítal stupeň konsolidace v čase t<sub>0</sub> z poměru sednutí konsolidující vrstvy v t<sub>0</sub> a z celkového sednutí konsolidující vrstvy, které bylo použito z variant 1 a 2. Dále jsem stanovil teoretický stupeň

konsolidace v čase  $t_0$  pro celkové sednutí s konsolidačním násypem. Tímto stupněm konsolidace jsem vynásobil celkové sednutí od konsolidačního násypu v hloubce 16 m a extrapoloval jím sednutí v hloubce 16 m v čase  $t_0$ . Rozdílem mezi celkovým sednutím v hloubce 16 m a vypočteným v čase  $t_0$  se zmenšily hodnoty, které ukázalo GEO 5 v čase  $t_0$ . (Program uvažuje, že sednutí mimo zadanou konsolidující vrstvu proběhne okamžitě v plné míře.)

Potom jsem určil velikost zbývajícího sednutí do konce konsolidace vynásobením celkového sednutí pro první a druhou variantu zbytkem stupně konsolidace v  $t_0$  do 1. Průběh dalšího sedání jsem využil z druhé varianty, protože má stejné časové rozložení. Zavedl jsem dílčí stupeň konsolidace, která začíná v čase  $t_0$  a končí v  $t_\infty$ . Dílčí stupeň konsolidace odpovídá poměrově stupňům konsolidace ve druhé variantě. Nakonec jsem celkové zbývající sednutí vynásobil dílčími stupni konsolidace a přičetl v jednotlivých fázích k již určenému sednutí v  $t_0$ .

Následující obrázek (Obrázek 4-6) zobrazuje třetí variantu v čase  $t_0$ . Červené čáry v hloubce 0,7 a 16 m vyznačují hranice konsolidující vrstvy. Na svislých řezech je dobře vidět, že vně konsolidující vrstvy má černá čára zobrazující velikost sednutí prudší sklon, což znamená, že se zde počítá s okamžitým sednutím. Způsob zavedení konsolidace pod spodní konsolidační hranici a korekce hodnot jsou popsány výše.



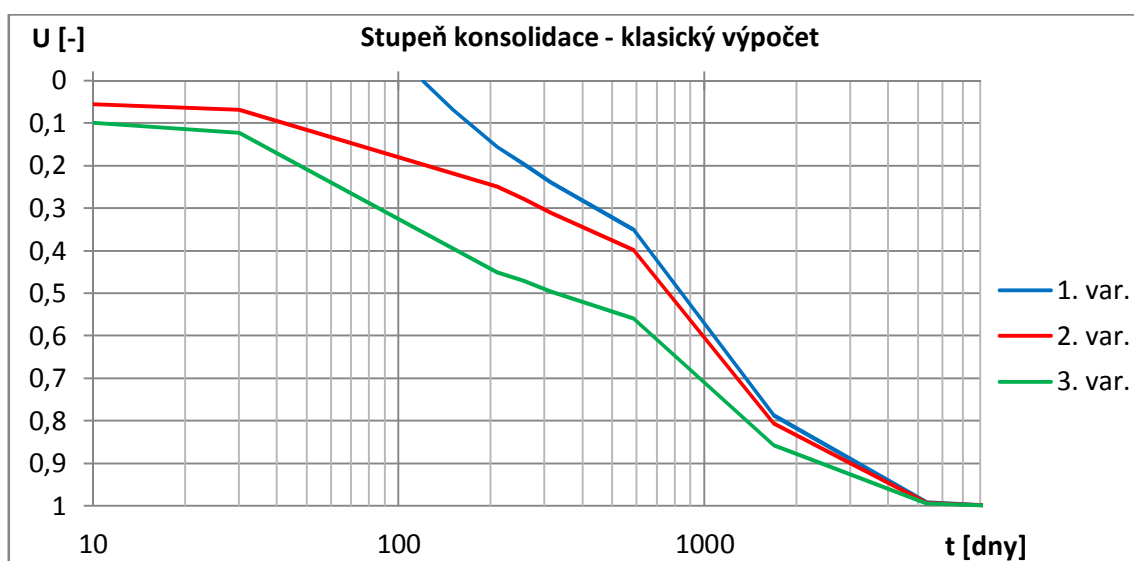
Obrázek 4-6: Sedání podloží ve fázi vrtání pilot v čase  $t_0$  pro 3. variantu

Tabulka 4-6: Průběh sedání podloží násypu v jednotlivých fázích pro 3. variantu

|       |  | 3. VARIANTA              |                    |                       |   |                  |           |                  |           |                  |           |                  |            |                       |                |
|-------|--|--------------------------|--------------------|-----------------------|---|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|-----------|------------------|------------|-----------------------|----------------|
|       |  | sednutí [mm] v hloubce h |                    |                       |   |                  |           |                  |           |                  |           |                  |            |                       |                |
|       |  | Fáze                     | $t_0$              | $t_0-t_1$             | $t_1$   | $t-t_2$          | $t_2$     | $t_2-t_3$        | $t_3$     | $t_3-t_4$        | $t_4$     | $t_4-t_\infty$   | $t_\infty$ |                       |                |
|       |  | $U_C$                    | 0,451              |                       | 0,471   |                  | 0,495     |                  | 0,559     |                  | 0,857     |                  | 1,000      |                       |                |
|       |  | $U_D$                    | 0                  |                       | 0,036   |                  | 0,081     |                  | 0,197     |                  | 0,740     |                  | 1,000      |                       |                |
| h [m] |  | $S_{G,t_0}$              | $S_{2,G,t_\infty}$ | $S_{zb,t_0-t_\infty}$ | $S_{t_0}$   | $\Delta S_{0-1}$ | $S_{t_1}$ | $\Delta S_{1-2}$ | $S_{t_2}$ | $\Delta S_{2-3}$ | $S_{t_3}$ | $\Delta S_{3-4}$ | $S_{t_4}$  | $\Delta S_{4-\infty}$ | $S_{t_\infty}$ |
| 0     |  | 76,8                     | -                  | -                     | 58,6  | 1,7              | 60,4      | 2,1              | 62,5      | 5,5              | 68,0      | 25,9             | 93,9       | 12,4                  | 106,2          |
| 0,7   |  | 60,6                     | 86,7               | 47,6                  | 42,4  | 1,7              | 44,2      | 2,1              | 46,3      | 5,5              | 51,8      | 25,9             | 77,7       | 12,4                  | 90,0           |
| 2,3   |  | 53,0                     | 68,9               | 37,9                  | 34,8  | 1,4              | 36,2      | 1,7              | 37,9      | 4,4              | 42,3      | 20,6             | 62,8       | 9,8                   | 72,7           |
| 4,4   |  | 45,7                     | 52,0               | 28,6                  | 27,5  | 1,0              | 28,6      | 1,3              | 29,8      | 3,3              | 33,2      | 15,5             | 48,7       | 7,4                   | 56,1           |
| 5,7   |  | 42,9                     | 45,8               | 25,2                  | 24,7  | 0,9              | 25,6      | 1,1              | 26,8      | 2,9              | 29,7      | 13,7             | 43,4       | 6,5                   | 49,9           |
| 7,4   |  | 39,5                     | 38,1               | 20,9                  | 21,3  | 0,8              | 22,1      | 0,9              | 23,0      | 2,4              | 25,4      | 11,4             | 36,8       | 5,4                   | 42,3           |
| 9,3   |  | 35,9                     | 30,3               | 16,6                  | 17,7  | 0,6              | 18,3      | 0,7              | 19,1      | 1,9              | 21,0      | 9,0              | 30,0       | 4,3                   | 34,4           |
| 10,5  |  | 33,8                     | 25,8               | 14,2                  | 15,6  | 0,5              | 16,1      | 0,6              | 16,8      | 1,6              | 18,4      | 7,7              | 26,1       | 3,7                   | 29,8           |
| 11,7  |  | 31,8                     | 21,6               | 11,9                  | 13,6  | 0,4              | 14,1      | 0,5              | 14,6      | 1,4              | 16,0      | 6,4              | 22,4       | 3,1                   | 25,5           |
| 13    |  | 29,8                     | 17,5               | 9,6                   | 11,6  | 0,3              | 12,0      | 0,4              | 12,4      | 1,1              | 13,5      | 5,2              | 18,7       | 2,5                   | 21,2           |
|       |  | sedání v $h_{ref}$       |                    |                       | teoretické sedání podloží s konsolidačním násypem |                  |           |                  |           |                  |           |                  |            |                       |                |
| 0,7   |  | 60,6                     | 86,7               |                       |   |                  |           |                  |           | $U_{kons,teor.}$ | 0,298     |                  |            |                       | 142,3          |
| 16    |  | 25,9                     | 9,7                |                       |   |                  |           |                  |           | $S_{16,t_0}$     | 7,72      |                  |            |                       | 25,9           |

- Vysvětlivky:
- $U_C$  celkový stupeň konsolidace
  - $U_D$  dílčí stupeň konsolidace
  - $U_{kons,teor.}$  teoretický stupeň konsolidace pro kons. Násyp v čase  $t_0$
  - $h_{ref}$  referenční hloubka
  - $S_{G,t_0}$  sedání v  $t_0$  s úplným sednutím v hloubce 16 m vypočtený v GEO 5
  - $S_{2,G,t_\infty}$  celkové sednutí z varianty 2
  - $S_{zb,t_0-t_\infty}$  zbytkové celkové sedání mezi fázemi  $t_0 - t_\infty$
  - $S_{16,t_0}$  extrapolované sednutí v hloubce 16 m v  $t_0$

Na následujícím grafu (Obrázek 4-7) jsou porovnány časové průběhy vypočtených stupňů konsolidace  $U$ .

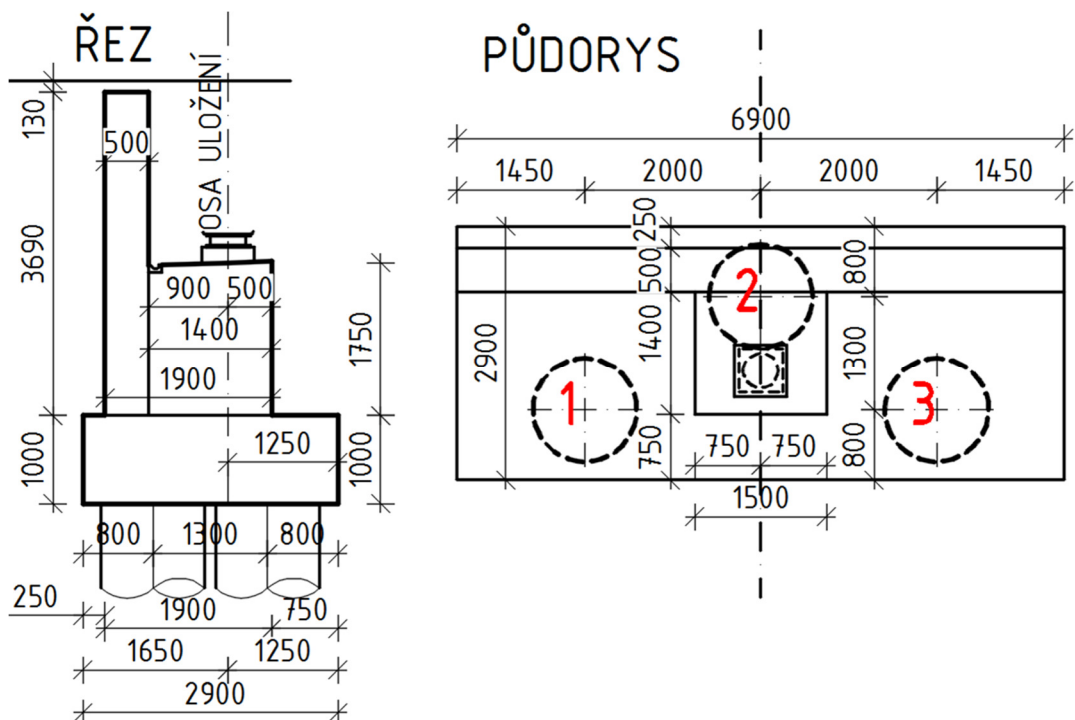


Obrázek 4-7: Graf stupňů konsolidace pro jednotlivé varianty

## 4.6 Zatížení pilot

Zatížení se skládá z vlastní tíhy opěry, reakcí z mostu přenesených přes ložiska a zemního tlaku na opěru od přilehlého násypu a přitížení od dopravy.

Na následujícím obrázku (Obrázek 4-8) je zjednodušený řez a výřez z půdorysu opěry (Obrázek 3-5) s očíslovanými pilotami, které dále uvažují jako výpočetní schéma.



Obrázek 4-8: Řez a půdorys výpočetního modelu opěry

### 4.6.1 Vlastní tíha opěry

Parametry:  $\gamma = 25 \text{ kNm}^{-3}$ , délka  $l = 6,9 \text{ m}$

Základový práh:  $A_p = 2,9 \text{ m}^2$ ;

Stěna:  $A_z = 1,9 \text{ m}^2$

Podložiskový pilíř:  $V_p = 2,44 * 1,5 = 3,66 \text{ m}^3$

Celková tíha:

$$G = \gamma * ((A_p + A_z) * l + V_p) \quad (4-16)$$

$$G = 25 * ((2,9 + 1,9) * 6,9 + 3,66) = 919,5 \text{ kN}$$



Vzhledem ke středu základového prahu moment způsobuje pouze stěna, jejíž těžiště je  $r_h = 0,95$  m od středu základového prahu.

$$M_g = A_z * l * \gamma * r_h \quad (4-17)$$

$$M_g = 1,9 * 6,9 * 25 * (-0,95) = -311,4 \text{ kNm}$$

#### 4.6.2 Reakce z ložisek

Reakce z ložisek jsem převzal z podkladů (příloha P7).

Stálé zatížení: 1666,8 kN

Doprava + ostatní proměnné: 1721,3 kN

#### 4.6.3 Zemní tlak na opěru

Charakteristické parametry zeminy:  $\gamma = 19,0 \text{ kNm}^{-3}$ ,  $\varphi_{ef} = 30^\circ$ ,  $c_{ef} = 0^\circ$ ,  $\delta = 15^\circ$

Součinitel tlaku v klidu:

$$K_0 = 1 - \sin \varphi \quad (4-18)$$

$$K_0 = 1 - \sin 30^\circ = 0,500$$

Součinitel aktivního tlaku:

$$K_A = (\text{tg}(45 - \varphi/2))^2 \quad (4-19)$$

$$K_A = (\text{tg}(45 - 30/2))^2 = 0,333$$

Součinitel zvýšeného aktivního tlaku:

$$K = K_A + (K_0 - K_A)/2 \quad (4-20)$$

$$K = 0,333 + (0,500 - 0,333)/2 = 0,417$$

Parametry opěry:  $h = 4,69 \text{ m}$ ,  $h_v = 0,13 \text{ m}$ , délka uvažovaného úseku  $l = 6,9 \text{ m}$

Zemní tlak:

$$S = 0,5 * K * \gamma * l * (h + h_v)^2 \quad (4-21)$$

$$S = 0,5 * 0,417 * 19,0 * 6,9 * (4,69 + 0,13)^2 = 634,5 \text{ kN}$$

Svislý zemní tlak:

$$S_v = S * \sin\delta \quad (4-22)$$
$$S_v = 634,5 * \sin 15^\circ = 164,2 \text{ kN}$$

Vodorovný zemní tlak:

$$S_h = S * \cos\delta \quad (4-23)$$
$$S_h = 634,5 * \cos 15^\circ = 612,9 \text{ kN}$$

Působíště zemního tlaku:  $r_v = 1,56 \text{ m}$ ,  $r_h = 1,2 \text{ m}$

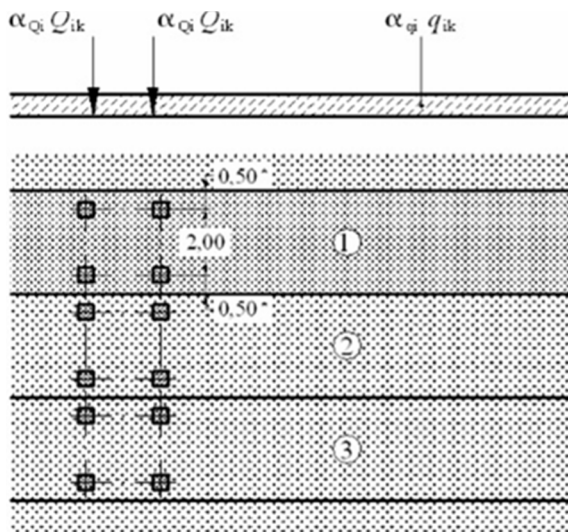
Moment od zemního tlaku:

$$M_S = S_h * r_v - S_v * r_h \quad (4-24)$$
$$M_S = 612,9 * 1,56 - 164,2 * 1,2 = 761,1 \text{ kNm}$$

#### **4.6.4 Zemní tlak od dopravy na opěru:**

Zatížení od dopravy je uvažováno podle ČSN EN 1991-2 Zatížení mostů dopravou. Hodnoty z tabulky na následující straně vpravo nahoře (Tabulka 4-7) pro dvounápravu a rovnoměrné zatížení jsou vynásobeny odpovídajícími součiniteli z druhé tabulky na následující straně (Tabulka 4-8) pro skupinu pozemních komunikací 1.

Násyp v těsné blízkosti za opěrou se zatíží jak rovnoměrným zatížením, tak dvounápravou v té nejnejpříznivější poloze. V polovině výšky opěry se stanoví roznoš zatížení a vypočte se svislé napětí. Pomocí součinitele částečného aktivního tlaku se převede na vodorovné napětí. Dále se uvažuje, že vypočtené vodorovné napětí působí konstantně po celé výšce a šířce uvažovaného úseku opěry. Schéma zatížení vozovky za rubem opěry je na následující straně na obrázku vlevo nahoře (Obrázek 4-9).



Tabulka 4-7: Charakteristické hodnoty zatížení pro LM1 [9]

| Umístění                      | Dvounáprava (TS)             | Rovnoměrné zatížení (UDL)                    |
|-------------------------------|------------------------------|--|
|                               | nápravové síly $Q_{ki}$ [kN] | $q_{ki}$ nebo $q_{kr}$ [ $\text{kNm}^{-2}$ ] |
| Pruh č. 1                     | 300                          | 9  |
| Pruh č. 2                     | 200                          | 2,5  |
| Pruh č. 3                     | 100                          | 2,5  |
| Ostatní pruhy                 | 0                            | 2,5  |
| Zbývající plocha ( $q_{rk}$ ) | 0                            | 2,5  |

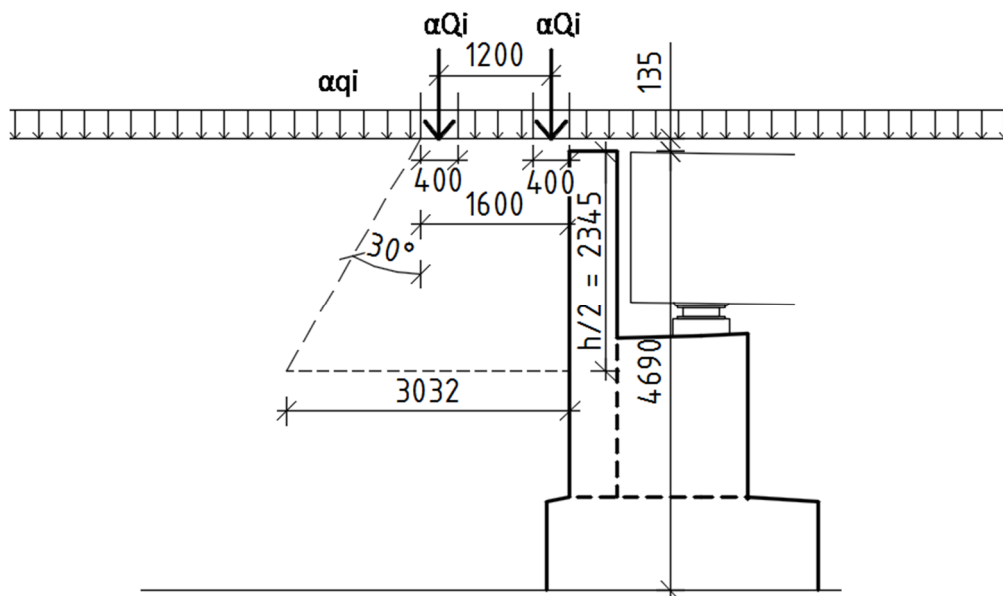
Obrázek 4-9: Model zatížení 1 pro globální ověření [9]

Tabulka 4-8: Hodnoty regulačních součinitelů  $\alpha$  pro ČR [9]

| Skupina pozemních komunikací | $\alpha_{Q1}$ | $\alpha_{Q2}$ | $\alpha_{Q3}$ | $\alpha_{q1}$ | $\alpha_{q2}$ | $\alpha_{q_i} (i > 2)$ a $\alpha_{q_r}$ |
|------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---|
| 1                            | 1             | 1             | 1             | 1             | 2,4           | 1,2                                     |
| 2                            | 0,8           | 0,8           | 0,8           | 0,45          | 1,6           | 1,6                                     |

<sup>1)</sup> Rovnoměrné zatížení v zatěžovacím pruhu 1 je 0,45  $0,45 \times 9 \text{ kN/m}^2 = 4 \text{ kN/m}^2$

Na následujícím obrázku (Obrázek 4-10) je zobrazen roznos zatížení od dopravy na opěru. Velikost zatížení je vypočtena v tabulce na další straně (Tabulka 4-9).



Obrázek 4-10: Roznášecí délka v polovině výšky opěry

Tabulka 4-9: Roznos zatížení v polovině výšky opěry

| pruh       | roznos na vozovce             |                     |                     | plošné zatížení<br>q | přítížení<br>Δq      | roznášecí rozměry v h/2 |                         | v h/2<br>q <sub>h/2</sub> |
|------------|-------------------------------|---------------------|---------------------|----------------------|----------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------------|
|            | α <sub>i</sub> Q <sub>i</sub> | b <sub>roznos</sub> | l <sub>roznos</sub> |                      |                      | b <sub>roznos,h/2</sub> | l <sub>roznos,h/2</sub> |                           |
| <b>TS</b>  | [kN]                          | [m]                 | [m]                 | [kN/m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] | [m]                     | [m]                     | [kN/m <sup>2</sup> ]      |
| 1          | 300                           | 2,4                 | 1,6                 | 156,25               | 52,08                | 6,90 <sup>1)</sup>      | 3,03                    | 9,57                      |
| 2          | 200                           | 2,4                 | 1,6                 | 104,17               | 52,08                | 8,26                    | 3,03                    | 17,99                     |
| 3          | 100                           | 2,4                 | 1,6                 | 52,08                | 52,08                | 11,26                   | 3,03                    | 20,53                     |
| celkem     |                               |                     |                     |                      |                      |                         |                         | <b>48,09</b>              |
| <b>UDL</b> |                               |                     |                     |                      |                      |                         |                         |                           |
| 1          | –                             | 3                   | –                   | 9                    | 3                    | 6,90 <sup>2)</sup>      | –                       | 1,30                      |
| 2          | –                             | 3                   | –                   | 6                    | 3                    | 8,86                    | –                       | 2,03                      |
| 3          | –                             | 3                   | –                   | 3                    | 3                    | 11,86                   | –                       | 2,28                      |
| celkem     |                               |                     |                     |                      |                      |                         |                         | <b>5,61</b>               |

Pozn.: <sup>1)</sup> Správná roznášecí šířka je 5,26 m, ale v tomto výpočtovém modelu se přítížení od 1. pruhu roznese na celý posuzovaný úsek (6,9 m).

<sup>2)</sup> Správná roznášecí šířka je 5,56 m, zbytek viz <sup>1)</sup>.

Zemní tlak:

$$S = K * q * l * h \quad (4-25)$$

$$S_{TS} = 0,417 * 5,61 * 6,9 * 4,69 = 648,4 \text{ kN}$$

$$S_{UDL} = 0,417 * 5,61 * 6,9 * 4,69 = 75,7 \text{ kN}$$

Svislý zemní tlak:

$$S_{TS,v} = 648,4 * \sin 15^\circ = 167,8 \text{ kN}$$

$$S_{UDL,v} = 75,7 * \sin 15^\circ = 19,6 \text{ kN}$$

Vodorovný zemní tlak:

$$S_{TS,h} = 648,4 * \cos 15^\circ = 626,3 \text{ kN}$$

$$S_{UDL,h} = 75,7 * \cos 15^\circ = 73,1 \text{ kN}$$

Působíště zemního tlaku:  $r_v = 2,35 \text{ m}$ ,  $r_h = 1,20 \text{ m}$

Moment od zemního tlaku:

$$M_{TS} = 626,3 * 2,35 - 167,8 * 1,2 = 1267,3 \text{ kNm}$$

$$M_{UDL} = 73,1 * 2,35 - 19,6 * 1,2 = 147,9 \text{ kNm}$$

Dále následuje přehledná tabulka (Tabulka 4-10) zatížení úseku základové spáry z vnitřního ložiska a části opěry na trojici pilot vztažené ke středu základové spáry.

Tabulka 4-10: Zatížení vnitřního úseku základové spáry opěry

| BETON                           |                          | OPĚRA       |                           |                              | NÁSYP                            |              |               |
|---------------------------------|--------------------------|-------------|---------------------------|------------------------------|----------------------------------|--------------|---------------|
| $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]   | 25                       | Délka [m]   | 6,9                       |                              | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]    | 19           |               |
|                                 |                          | Výška [m]   | 4,69                      |                              | $\varphi$ [°]                    | 30           |               |
|                                 |                          | Vozovka [m] | 0,13                      |                              | $\delta$ [°]                     | 15           |               |
| <b>PILOTY</b>                   |                          |             |                           |                              | $K_0$                            | 0,500        |               |
| Těž. od líce pat. ke středu [m] | 1,45                     |             |                           |                              | $K_A$                            | 0,333        |               |
|                                 |                          |             |                           |                              | $K$                              | 0,417        |               |
|                                 |                          |             |                           |                              | souč. zvýš. akt. tlaku           |              |               |
|                                 |                          |             | Těž. k líci pat $r_h$ [m] | Těž. k zákl. spáře $r_v$ [m] | <b>ZATÍŽENÍ NA TROJICI PILOT</b> |              |               |
| <b>DRUH ZATÍŽENÍ</b>            |                          | $R_z$ [kN]  |                           |                              | $N$ [kN]                         | $H$ [kN]     | $M$ [kNm]     |
| <b>REAKCE Z LOŽISKA</b>         |                          |             |                           |                              |                                  |              |               |
| Stálé                           |                          | 1666,8      | 1,25                      |                              | 1770,1                           | 0,0          | 354,0         |
| Doprava + proměnné              |                          | 1721,3      | 1,25                      |                              | 1648,0                           | 0,0          | 323,6         |
| <b>OPĚRA</b>                    | $A$ [m <sup>2</sup> ]    | $b$ [m]     |                           |                              |                                  |              |               |
| Základový práh                  | 2,90                     | 6,90        | 1,45                      |                              | 500,25                           | 0,00         | 0,00          |
| Stěna                           | 1,90                     | 6,90        | 2,40                      |                              | 327,75                           | 0,00         | -311,36       |
| Polopilíř                       | 2,44                     | 1,50        | 1,45                      |                              | 91,50                            | 0,00         | 0,00          |
| <b>Celkem</b>                   |                          |             |                           |                              | <b>919,5</b>                     | <b>0,0</b>   | <b>-311,4</b> |
| <b>ZEMNÍ TLAK</b>               |                          | $S$ [kN/m]  |                           |                              |                                  |              |               |
| Na opěru                        |                          | 634,53      | 2,65                      | 1,56                         | 164,2                            | 612,9        | 761,1         |
| <b>PŘÍTÍŽENÍ DOPR.</b>          | $q$ [kN/m <sup>2</sup> ] |             |                           |                              |                                  |              |               |
| TS na opěru                     | 48,09                    | 648,41      | 2,65                      | 2,35                         | 167,82                           | 626,32       | 1267,33       |
| UDL na opěru                    | 5,61                     | 75,69       | 2,65                      | 2,35                         | 19,59                            | 73,11        | 147,94        |
| <b>Celkem</b>                   |                          |             |                           |                              | <b>187,4</b>                     | <b>699,4</b> | <b>1415,3</b> |
|                                 |                          |             |                           | <b>CELKEM</b>                | <b>4659</b>                      | <b>1312</b>  | <b>2543</b>   |

#### 4.6.5 Vnášení zatížení

Výstavba začíná 2. fází (vrtání pilot) Do modelu není vneseno žádné zatížení. Ve 3. fázi probíhá výstavba opěry a její tvrdnutí. V této fázi je do modelu vnesena tíha opěry s momentem, který tato síla vyvozuje. V 4. fázi probíhá výstavba mostovky. Do modelu je tedy přidáno stálé zatížení, které působí v ose ložiska a způsobuje moment. Na konci této fáze dojde k zasypání opěry a v 5. fázi (Uvedení do provozu) je již model plně zatížený. V dalších fázích se již zatížení až do konce životnosti nemění. Postup zatěžování je vypsán v tabulce na další straně (Tabulka 4-11).

Tabulka 4-11: Fáze výstavby a vnášení zatížení

| Fáze výstavby a vnášení zatížení |                    | Začátek fáze | Přítížení (char. ) |            |            | Celkové zatížení (char.) |        |        |
|----------------------------------|--------------------|--------------|--------------------|------------|------------|--------------------------|--------|--------|
|                                  |                    |              | $\Delta N$         | $\Delta H$ | $\Delta M$ | $N_k$                    | $H_k$  | $M_k$  |
|                                  |                    |              | [kN]               | [kN]       | [kNm]      | [kN]                     | [kN]   | [kNm]  |
| 3. fáze                          | Výstavba opěry     | $t_1$        | 919,5              | 0,0        | -311,4     | 919,5                    | 0,0    | -311,4 |
| 4. fáze                          | Výstavba N. K.     | $t_2$        | 1770,1             | 0,0        | 354,0      | 2689,6                   | 0,0    | 42,7   |
| 5. fáze                          | Uvedení do provozu | $t_3$        | 1969,6             | 1312,3     | 2500,0     | 4659,2                   | 1312,3 | 2542,6 |
| 6. fáze                          | 3 roky provozu     | $t_3$        |                    |            |            | 4659,2                   | 1312,3 | 2542,6 |
| 7. fáze                          | Konec životnosti   | $t_4$        |                    |            |            | 4659,2                   | 1312,3 | 2542,6 |

#### 4.7 Výpočet mezní zatěžovací křivky piloty

Pro výpočet mezní zatěžovací křivky nebyl uvažovaný skupinový účinek, ačkoliv se teoreticky jedná o skupinu pilot. Pilota č. 2, které se nachází ve druhé řadě, je zatížena výrazně menší silou než piloty č. 1 a č. 3 (celek je zatížen významnou vodorovnou silou a ohybovým momentem). Je tedy možné tyto piloty uvažovat jako jednu řadu pilot, a ta se obvykle jako skupina pilot neuvažuje. Další důvod je takový, že skupinový účinek sedání se projevuje hlavně v případech, kdy je velké vnější zatížení. V tomto případě ale hraje významnější roli sedání podloží, které piloty zatěžuje negativním plášťovým třením.

Délka piloty je  $l = 14$  m s profilem  $d = 1100/1180$  mm. Uvažovaný modul pružnosti betonu je  $E_b = 26$  GPa. Vrt bude pažený do hloubky, kde začíná slínovec třídy R5 a vrt by zde měl být již stabilní. Ve výpočtu uvažuji hloubku 5,4 m podle průzkumného vrtu J1292. Vážený průměr profilu piloty:  $\bar{d} = 1,131$  m

Piloty budou zřizovány z 1,0 m vysokého násypu, stávající terén je tedy 1,0 m po úrovni hlavy piloty. Tato nasypaná vrstva se bude považovat za neúnosnou, avšak bude uvažována v  $D_i$  pro výpočet plášťového tření.

Příčinkový koeficient sedání  $I$  jsem určil podle příslušných grafů, které jsou uvedeny v [1], [2]. Dílčí parametry pro určení koeficientu sedání jsou uvedeny v tabulce níže (Tabulka 4-12).

Tabulka 4-12: Určení příčinkového koeficientu sedání  $I$

| $l/d$ | $I_1$ | $K = E_b/E_s$ | $R_k$ | $I$   |
|-------|-------|---------------|-------|-------|
| 12,38 | 0,125 | 467           | 1,163 | 0,145 |

Jelikož se jedná o výpočet charakteristického zatížení, tak za koeficient  $m_1$  jsem zvolil hodnotu 0,7 pro provozní zatížení. Za  $m_2$  jsem dosadil 1,0, protože plášť piloty nebude ničím chráněný, proto tedy není třeba tímto způsobem regulovat únosnost piloty. V následující tabulce (Tabulka 4-13) jsou uvedeny parametry pro výpočet MZK. Dále následuje výpočet MZK.

Tabulka 4-13: Parametry pro výpočet MZK

| PARAMETRY SEDÁNÍ |          |              |              |              |            |            |                   |                      |              |                |              |
|------------------|----------|--------------|--------------|--------------|------------|------------|-------------------|----------------------|--------------|----------------|--------------|
| vrstva           | h<br>[m] | $l_i$<br>[m] | $D_i$<br>[m] | $d_i$<br>[m] | a<br>[kPa] | b<br>[kPa] | $q_{si}$<br>[kPa] | $d_i * l_i * q_{si}$ | $d_i * l_i$  | $E_s$<br>[MPa] | $E_s * l_i$  |
| 1                | 0,7      | 0,7          | 1,35         | 1,18         | 46,39      | 20,81      | 28,20             | 23,29                | 0,83         | 8,15           | 5,705        |
| 2                | 2,3      | 1,6          | 2,50         | 1,18         | 46,39      | 20,81      | 36,57             | 69,04                | 1,89         | 8,47           | 13,552       |
| 3                | 4,4      | 2,1          | 4,35         | 1,18         | 97,31      | 108,59     | 67,85             | 168,14               | 2,48         | 17,23          | 36,183       |
| 4                | 13,0     | 8,6          | 9,70         | 1,10         | 131,92     | 94,96      | 121,15            | 1146,09              | 9,46         | 77,73          | 668,48       |
| <b>Σ</b>         |          | <b>13</b>    |              |              |            |            |                   | <b>1406,6</b>        | <b>14,65</b> |                | <b>723,9</b> |

$$q_p = 957,61 - \frac{703,89}{14/1,1} = 902,3 \text{ kPa}$$

$$q_s = \frac{1406,6}{13} = 96,00 \text{ kPa}$$

$$E_s = \frac{723,9}{13} = 55,69 \text{ MPa}$$

$$\beta = \frac{902,3}{902,3 - 4 * 96 * 14/1,1} = 0,156$$

$$R_{su} = 0,7 * 1,0 * \pi * 1406,6 = 3093,2 \text{ kN}$$

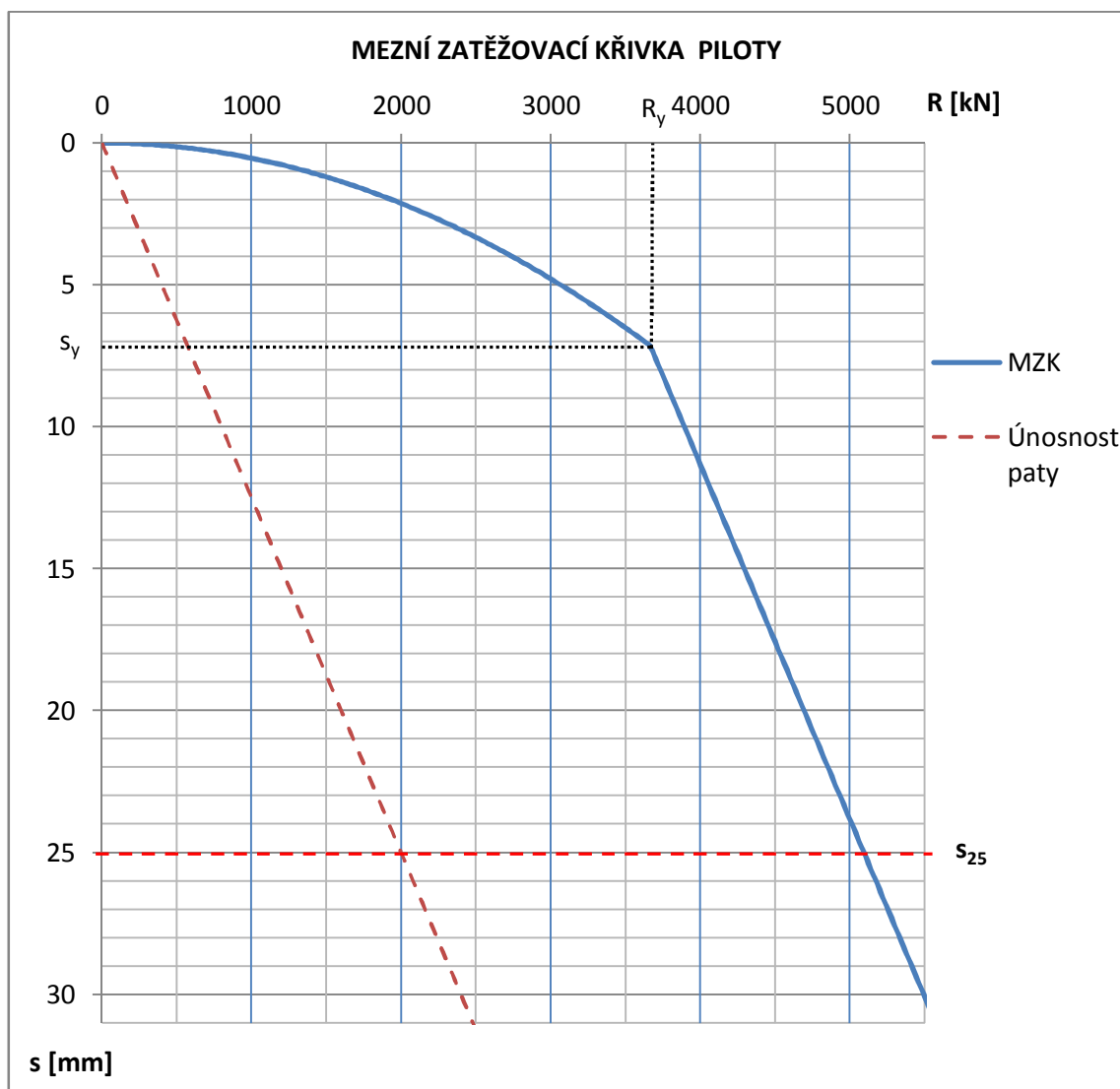
$$R_y = \frac{3093,2}{1 - 0,156} = 3664,3 \text{ kN}$$

$$s_y = 0,145 * \frac{3664,3}{1,131 * 55,69} = 7,14 \text{ mm}$$

$$R_{pu} = 0,156 * 3664,3 * \left(\frac{25}{7,14}\right) = 1999,4 \text{ kN}$$

$$R_{bu} = 3093,2 + 1999,4 = 5092,6 \text{ kN}$$

Z těchto vypočtených hodnot byla sestavena mezní zatěžovací křivka piloty. Křivka je znázorněna na následujícím obrázku. (Obrázek 4-11).



Obrázek 4-11: Mezní zatěžovací křivka piloty

#### 4.8 Roznos sil

Dále je třeba určit roznos sil na piloty. Statické schéma opěry uložené na pilotách v zemině jsem zjednodušil následovně. Spojení mezi pilotami a základovým prahem opěry je zvoleno jako plné vetknutí. Piloty jsou modelovány jako nosník s ohybovou a osovou tuhostí. Úloha je převedena na rovinnou úlohu tak, že dvě piloty blíže líce základového prahu (piloty č. 1 a č. 3) jsou nahrazeny jednou pilotou o takovém průměru, aby se její moment setrvačnosti rovnal součtu dvou původních pilot. Základový práh je nahrazena nosníkem o šířce 6,9 m, výšce 1,0 m a délce 1,3 m odpovídající osově vzdálenosti pilot v podélném řezu. Takto by měl tento nosník dostatečně vystihovat ohybovou tuhost opěry v podélném směru.



Stanovení ekvivalentního průměru pro dvě piloty:

$$I_1 = \frac{1}{4} * \pi * \left(\frac{1,131}{2}\right)^4 = 0,08032 \text{ m}^4$$

$$2I_1 = I_2 = 0,1606 \text{ m}^4 = \frac{1}{4} * \pi * \left(\frac{d_2}{2}\right)^4$$

$$d_2 = 1,345 \text{ m}$$

Okrajové podmínky pilot jsou modelovány jako nosník na pružném podloží. Pružné podloží vychází z modulu reakce podloží  $k_h$ . Pro soudržné zeminy platí, že  $k_h$  bývá úměrné sečnovému modulu deformace zeminy  $E_{def}$ .

$$k_h = \frac{2 * E_{def}}{3 * d} \quad (4-26)$$

Kde  $d$  je průměr piloty. Tento vztah platí pokud,  $d \leq 1$ , jinak  $d = 1$ .

Hodnota konstanty lineárně pružného uložení  $c_{h,lin}$  (Tabulka 4-14) se z modulu  $k_h$  získá tak, že se  $k_h$  vynásobí profilem piloty  $d_i$  v příslušné hloubce:

$$c_{h,lin} = k_h * d = \frac{2 * E_{def}}{3 * 1} * d_i = \frac{2}{3} E_{def} * d_i \quad (4-27)$$

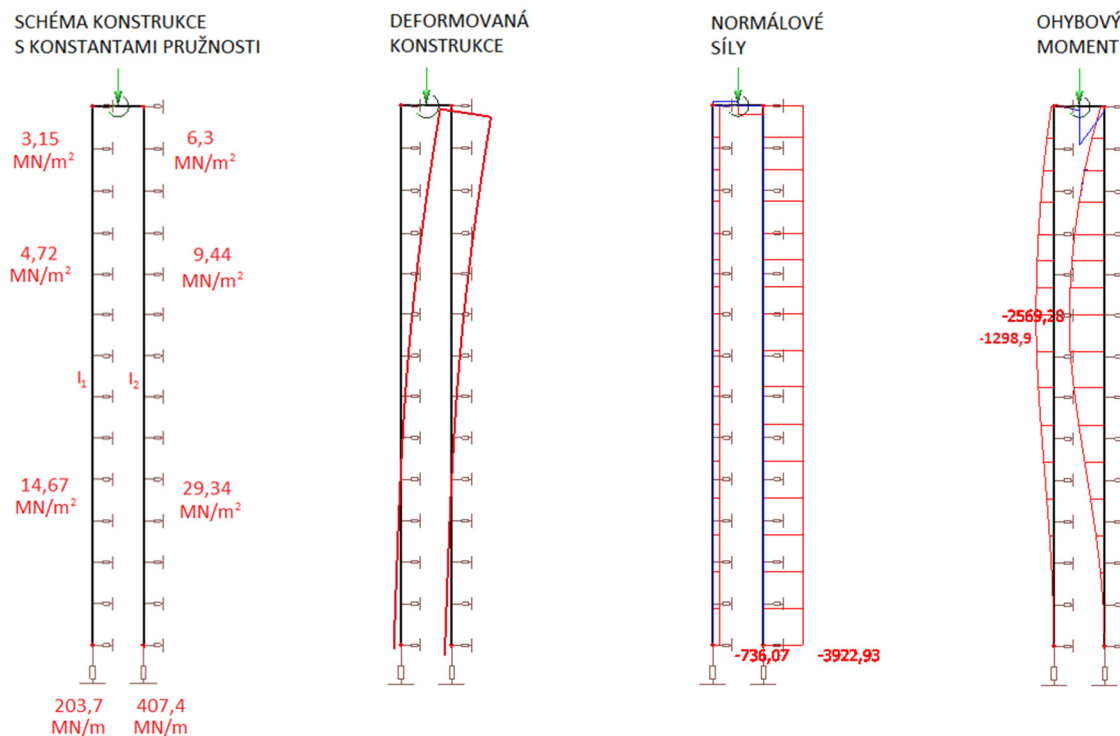
Tabulka 4-14: Stanovení konstant lineárně pružného uložení

| vrstva | h [m] | $E_{def}$ [Mpa] | $d_i$ [m] | $c_{h,lin}$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
|--------|-------|-----------------|-----------|----------------------------------|
| 1      | 0,7   | 4               | 1,18      | <b>3,15</b>                      |
| 2      | 2,3   | 4               | 1,18      | <b>3,15</b>                      |
| 3      | 4,4   | 6               | 1,18      | <b>4,72</b>                      |
| 4      | 13,0  | 20              | 1,10      | <b>14,67</b>                     |

Svislé podpory v patě pilot jsou kloubové neposuvné se svislým pružným uložením reprezentovaným pérovou konstantou  $C$ , určenou z MZK pro sedání 25 mm.

$$C = \frac{R_{bu}}{s_{25}} = \frac{5092,6}{25} = 203,7 \text{ MN/m} \quad (4-28)$$

K výpočtu roznosu sil byl použitý software SCIA Engineer. Výpočet byl provedený pro tři zatěžovací stavy odpovídající fázím výstavby. Schéma konstrukce a výsledky pro 5. fázi s plným zatížením jsou na obrázku na další straně (Obrázek 4-12). Ostatní výsledky výpočtu jsou shrnuty v tabulce pod obrázkem (Tabulka 4-15).



Obrázek 4-12: Výstupy ze SCIA Engineer 5. fáze

Tabulka 4-15: Vnitřní síly v pilotách

| Fáze | Čas   | Zatížení na trojici pilot |            |             | Vnitřní síly    |           |              |                  |
|------|-------|---------------------------|------------|-------------|-----------------|-----------|--------------|------------------|
|      |       | $F_z$ [kN]                | $F_x$ [kN] | $M_y$ [kNm] |                 | 2. pilota | 1.,3. pilota | 1.,3. $\Delta N$ |
| 3.   | $t_1$ | 920                       | 0          | -311        | N [kN]          | -378      | <b>-271</b>  |                  |
|      |       |                           |            |             | $M_{max}$ [kNm] | 137       | 141          |                  |
| 4.   | $t_2$ | 2690                      | 0          | 43          | N [kN]          | -982      | <b>-854</b>  | <b>-583</b>      |
|      |       |                           |            |             | $M_{max}$ [kNm] | 129       | 150          |                  |
| 5.   | $t_3$ | 4659                      | 1312       | 2543        | N [kN]          | -736      | <b>-1962</b> | <b>-1108</b>     |
|      |       |                           |            |             | $M_{max}$ [kNm] | -1299     | -1285        |                  |

## 4.9 Sedání nejvíce zatížené piloty

Nyní je možné stanovit negativní plášťové tření v jednotlivých variantách pro jednotlivé fáze výstavby a spočítat celkové sedání piloty. NPT se určí pro všechny vrstvy podloží, ve kterých bylo v předchozích výpočtech určeno sedání od přitížení násypem. Poznatky z praxe říkají, že maximální velikost NPT bývá 0,7násobkem pozitivního plášťového tření (dle doc. Masopusta). Míra mobilizace NPT v jednotlivých vrstvách se stanoví z poměru sedání určité vrstvy a sedání na hranici plné mobilizace pozitivního plášťového tření  $s_y$ .

Ve výpočtu sedání piloty se NPT uvažuje jako síla, kterou se zatížená pilota přitíží. V následující tabulce (Tabulka 4-16) je výpočet NPT pro 1. variantu v 6. fázi (3 roky provozu,  $t_3-t_4$ ). Z důvodu velkého množství dat jsou zde pro ostatní fáze a jiné varianty uvedeny v následující tabulce (Tabulka 4-17) už přímo síly vypočtené z NPT.

Tabulka 4-16: Určení negativního plášťového tření pro 6. fázi (3 roky provozu) v 1. variantě

| NEGATIVNÍ PLÁŠŤOVÉ TŘENÍ |      |       |       |       |        |        |          |               |         |               |        |
|--------------------------|------|-------|-------|-------|--------|--------|----------|---------------|---------|---------------|--------|
| vrstva                   | h    | $l_i$ | $D_i$ | $d_i$ | a      | b      | $q_{si}$ | $s_{t_3-t_4}$ | $s/s_y$ | neg. $q_{si}$ | neg. R |
|                          | [m]  | [m]   | [m]   | [m]   | [kPa]  | [kPa]  | [kPa]    | [mm]          |         | [kPa]         | [kN]   |
| 1                        | 0,7  | 0,7   | 1,35  | 1,18  | 46,39  | 20,81  | 28,20    | 30,20         | 4,23    | 19,74         | 131,72 |
| 2                        | 2,3  | 1,6   | 1,50  | 1,18  | 46,39  | 20,81  | 30,02    | 22,43         | 3,14    | 21,01         | 124,64 |
| 3                        | 4,4  | 2,1   | 3,35  | 1,18  | 97,31  | 108,59 | 59,06    | 15,05         | 2,11    | 41,34         | 321,84 |
| 4                        | 6,7  | 2,3   | 5,55  | 1,10  | 131,92 | 94,96  | 113,10   | 12,35         | 1,73    | 79,17         | 629,26 |
| 5                        | 7,6  | 0,9   | 7,15  | 1,10  | 131,92 | 94,96  | 117,31   | 8,99          | 1,26    | 82,12         | 255,40 |
| 6                        | 9,7  | 2,1   | 8,65  | 1,10  | 131,92 | 94,96  | 119,84   | 5,59          | 0,78    | 74,19         | 538,44 |
| 7                        | 10,5 | 0,8   | 10,10 | 1,10  | 131,92 | 94,96  | 121,58   | 3,62          | 0,51    | 60,61         | 167,56 |
| 8                        | 11,7 | 1,2   | 11,10 | 1,10  | 131,92 | 94,96  | 122,51   | 1,79          | 0,25    | 42,93         | 178,01 |
| 9                        | 13,0 | 1,3   | 12,35 | 1,10  | 131,92 | 94,96  | 123,46   | 0,00          | 0,00    | 0,00          | 0,00   |
| $\Sigma$                 |      |       |       |       |        |        |          |               |         |               | 2347   |

Tabulka 4-17: Zatížení působící v nejméně zatížené pilotě

| Druh zatížení                         | Varianta | Fáze, zatížení [kN] |      |      |      |      |
|---------------------------------------|----------|---------------------|------|------|------|------|
|                                       |          | 3.                  | 4.   | 5.   | 6.   | 7.   |
| Negativní plášťové tření              | 1.       | 913                 | 941  | 1475 | 2347 | 1978 |
|                                       | 2.       | 739                 | 823  | 1321 | 2317 | 1904 |
|                                       | 3.       | 632                 | 704  | 1130 | 2176 | 1666 |
| Zatížení                              | každá    | 0                   | 271  | 854  | 1962 | 1962 |
| Přítížení                             | každá    | 0                   | 271  | 583  | 1108 | 0    |
| Zatížení působící už v předchozí fázi | každá    | 0                   | 0    | 271  | 583  | 1108 |
| Celkové zatížení                      | 1.       | 913                 | 1212 | 2329 | 4308 | 3940 |
|                                       | 2.       | 739                 | 1094 | 2174 | 4279 | 3865 |
|                                       | 3.       | 632                 | 975  | 1983 | 4137 | 3627 |

Celková hodnota sedání nejméně zatížené piloty je součet sednutí v jednotlivých fázích. Sedání v každé fázi je navíc rozděleno na sednutí podloží v úrovni paty piloty, které se odečte vypočteného sedání podloží a sedání, které se určí podle mezní zatěžovací křivky. Dále se uvažuje, že NPT na konci každé fáze vymizí (protože proběhne sedání a NPT už nepůsobí).

Zatížení přenesené z opěry však v pilotě stále působí a při výpočtu další fáze se začíná na MZK odečítat v bodě, který odpovídá síle od zatížení v minulé fázi. Výpočet probíhal tak, že v každé fázi se spočetlo sedání od celkového zatížení s přitížením od NPT a od tohoto výsledku se odečetlo sedání, které by proběhlo při zatížení, které působilo před touto fází (ovšem bez přitížení od NPT z minulé fáze). Kdyby se totiž tento postup nevyužil, tak by se sedání s jednotlivými přírůstky zatížení neustále počítalo ze začátku první větve MZK a celkové sedání by pak vyšlo daleko menší, protože právě na začátku je nejmenší přírůstek sedání při stejném přírůstku zatížení.

V následující tabulce (Tabulka 4-18) jsou zobrazeny výsledky sedání piloty v jednotlivých fázích pro tři různé varianty postupu výstavby a také celkové sednutí.

Tabulka 4-18: Výsledné sedání piloty v jednotlivých variantách

|   | Varianta | Sedání v jednotlivých fázích [mm] |             |             |             |                  | $\Sigma$ | $t_2 - t_\infty$ |
|---|----------|-----------------------------------|-------------|-------------|-------------|------------------|----------|------------------|
|   |          | 3. fáze                           | 4. fáze     | 5. fáze     | 6. fáze     | 7. fáze          |          |                  |
|   |          | $t_0 - t_1$                       | $t_1 - t_2$ | $t_2 - t_3$ | $t_3 - t_4$ | $t_4 - t_\infty$ |          |                  |
| Relativní sedání piloty vzhledem k vrstvě v úrovni paty | 1.       | 0,44                              | 0,78        | 2,84        | 14,81       | 8,54             | 27,4     | 26,2             |
|   | 2.       | 0,29                              | 0,64        | 2,48        | 14,44       | 7,61             | 25,4     | 24,5             |
|   | 3.       | 0,21                              | 0,51        | 2,05        | 12,66       | 4,95             | 20,4     | 19,7             |
| Sedání podloží v úrovni paty piloty                     | 1.       | 0,73                              | 0,77        | 1,91        | 7,64        | 3,75             | 14,8     | 13,3             |
|   | 2.       | 0,48                              | 0,59        | 1,52        | 7,14        | 3,41             | 13,1     | 11,7             |
|   | 3.       | 0,35                              | 0,43        | 1,11        | 5,22        | 2,49             | 9,6      | 8,8              |
| Absolutní sedání  | 1.       | 1,17                              | 1,55        | 4,75        | 22,44       | 12,29            | 42,2     | 39,5             |
|   | 2.       | 0,77                              | 1,23        | 4,00        | 21,57       | 11,01            | 38,6     | 36,6             |
|   | 3.       | 0,56                              | 0,94        | 3,17        | 17,89       | 7,45             | 30,0     | 28,5             |

#### 4.9.1 Zhodnocení výsledků sedání

Pro posouzení založení není ani tak podstatné, jaké bude celkové sednutí piloty od jejího vybetonování, ale jak moc budou piloty sedat od okamžiku definitivního uložení nosné konstrukce mostu na ložiska na opěře. Tento okamžik nastane někdy během 5. fáze. Podstatné je tedy celkové sednutí od 5. fáze.

Podle očekávání vyšlo největší sedání 39,5 mm pro první variantu bez konsolidačního násypu a se zkrácenou dobou konsolidace a nejmenší sedání 28,5 mm pro třetí variantu s konsolidačním násypem. Mezi první a druhou variantou vyšel až překvapivě malý rozdíl, pouze 2,9 mm. Je to způsobeno tím, že podle tohoto výpočtu bude podloží pod násypem konsolidovat velmi

pomalu a většina konsolidace proběhne až během vlastní stavby a následného provozu konstrukce.

#### 4.10 MSÚ piloty

Pro dimenzování výztuže piloty se stanoví mezní stav únosnosti. Vyšel jsem z prvního výpočetního modelu, kde se uvažuje zatížení na výsek opěry pod jedním ložiskem pro tři piloty. MSÚ se stanoví jako nepříznivější hodnota z kombinačních rovnic 6.10a a 6.10b. (Obrázek 4-13) [8] Kombinace se určí pro největší moment  $M_{max}$ , protože tento stav je pro posouzení ohybové únosnosti rozhodující. Pro posouzení smykové výztuže je třeba najít kombinaci pro maximální posouvající sílu, ta je však stejná jako pro maximální moment. V následující tabulce (Tabulka 4-19) jsou vypočteny kombinace zatížení pro MSÚ.

$$\left\{ \sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} \psi_{0,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right. \quad (6.10a)$$

$$\left\{ \sum_{j \geq 1} \xi_j \gamma_{G,j} G_{k,j} "+" \gamma_P P "+" \gamma_{Q,1} Q_{k,1} "+" \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i} \right. \quad (6.10b)$$

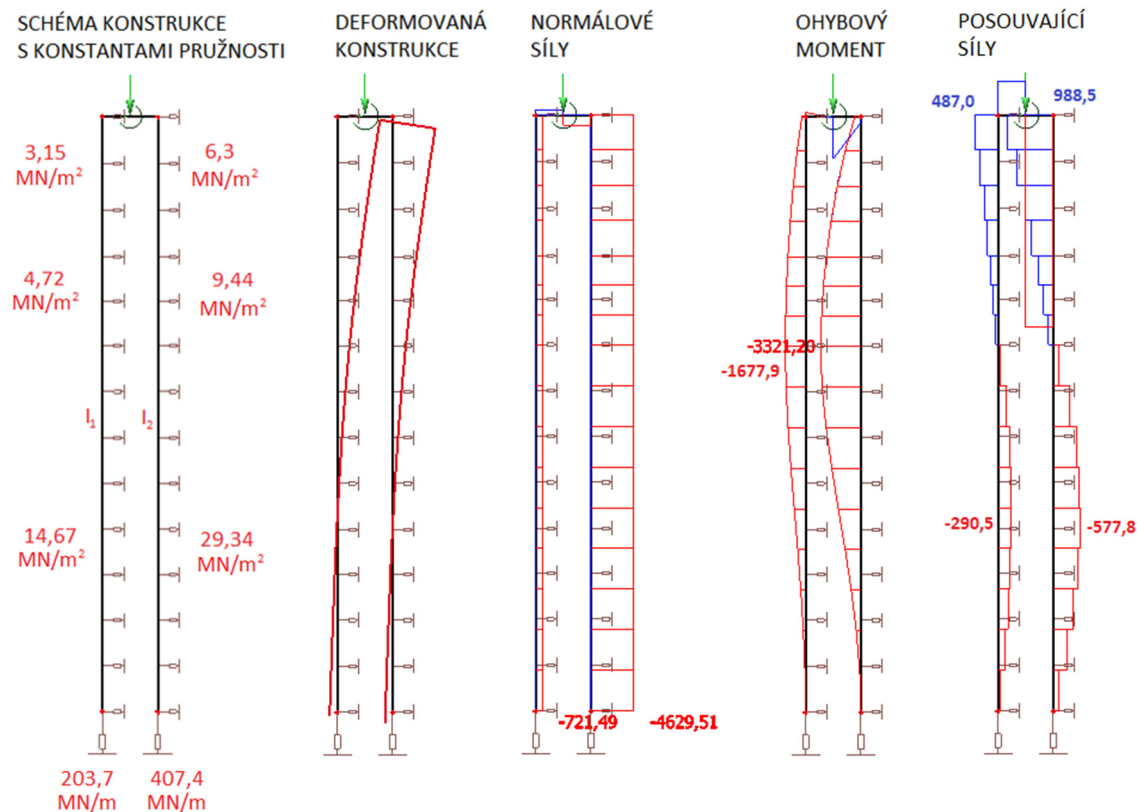
Obrázek 4-13: Kombinační rovnice pro MSÚ [8]

Tabulka 4-19: Kombinace zatížení MSÚ pro  $M_{max}$

| KOMBINACE PRO MSÚ |                  |                  |                   |                       |                       |                     |              | 6.10a             |                    |                    | 6.10b             |                    |                    |
|-------------------|------------------|------------------|-------------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|--------------|-------------------|--------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------------|
| Druh zatížení     | $F_{zk}$<br>[kN] | $F_{xk}$<br>[kN] | $M_{yk}$<br>[kNm] | $\gamma_{inf}$<br>[-] | $\gamma_{sup}$<br>[-] | $\psi_{0,i}$<br>[-] | $\xi$<br>[-] | $F_{zEd}$<br>[kN] | $F_{xEEd}$<br>[kN] | $M_{yEd}$<br>[kNm] | $F_{zEd}$<br>[kN] | $F_{xEEd}$<br>[kN] | $M_{yEd}$<br>[kNm] |
| Z LOŽISEK         |                  |                  |                   |                       |                       |                     |              |                   |                    |                    |                   |                    |                    |
| Stálé             | 1770,1           | 0,0              | 354,0             | 1,0                   | 1,35                  | -                   | 0,85         | 2389,6            | 0,0                | 477,9              | 2031,2            | 0,0                | 406,2              |
| Dopr.             | 1424,2           | 0,0              | 284,8             | 0,0                   | 1,35                  | 0,75                | -            | 1442,0            | 0,0                | 288,4              | 1922,7            | 0,0                | 384,5              |
| Teplota           | 112,0            | 0,0              | 22,4              | 0,0                   | 1,50                  | 0,6                 | -            | 100,8             | 0,0                | 20,2               | 100,8             | 0,0                | 20,2               |
| Vítr              | 81,8             | 0,0              | 16,4              | 0,0                   | 1,50                  | 0,6                 | -            | 73,6              | 0,0                | 14,7               | 73,6              | 0,0                | 14,7               |
| OPĚRA             | 919,5            | 0,0              | -311,4            | 1,0                   | 1,35                  | -                   | 0,85         | 1241,3            | 0,0                | -420,3             | 781,6             | 0,0                | -264,7             |
| Z. TLAK           | 164,2            | 612,9            | 761,1             | 1,0                   | 1,35                  | -                   | 0,85         | 221,7             | 827,4              | 1027,5             | 188,5             | 703,3              | 873,4              |
| DOPRAVA ZA OPĚROU |                  |                  |                   |                       |                       |                     |              |                   |                    |                    |                   |                    |                    |
| TS                | 167,8            | 626,3            | 1267,3            | 0,0                   | 1,35                  | 0,75                | -            | 169,9             | 634,1              | 1283,2             | 226,6             | 845,5              | 1710,9             |
| UDL               | 19,6             | 73,1             | 147,9             | 0,0                   | 1,35                  | 0,40                | -            | 10,6              | 39,5               | 79,9               | 26,4              | 98,7               | 199,7              |
|                   |                  |                  |                   |                       |                       |                     | <b>Σ</b>     | <b>5650</b>       | <b>1501</b>        | <b>2771</b>        | <b>5351</b>       | <b>1648</b>        | <b>3345</b>        |

Pozn.: Pro zatížení dopravou z mostovky, které se přenáší ložisky, bylo zvoleno  $\psi_{0,i} = 0,75$ , protože tato hodnota odpovídá hodnotě pro TS z LM1. Pro ostatní druhy dopravy je tento součinitel menší. Hodnota  $\psi_{0,i}$  byla tedy zvolena na stranu bezpečnou.

Rozhodující je tedy kombinace 6.10b, kde vyšel největší návrhový moment. Síly byly rozneseny stejným způsobem jako pro charakteristickou kombinaci. Vnitřní síly pro MSÚ jsou zobrazeny na následujícím obrázku (Obrázek 4-14) a dále jsou vypsány v tabulce pod ním (Tabulka 4-20).



Obrázek 4-14: Vnitřní síly pro MSÚ

Tabulka 4-20: Návrhové vnitřní síly

| ŘEZ                              | Vnitřní síly   | 2. pilota | 1.,3. pilota |
|----------------------------------|----------------|-----------|--------------|
| $M_{\max}$ v jedné třetině výšky | $N_{Ed}$ [kN]  | -722      | -2315        |
|                                  | $M_{Ed}$ [kNm] | -1678     | -1661        |
|                                  | $V_{Ed}$ [kN]  | 0         | 0            |
| $V_{\max}$ u hlavy piloty        | $N_{Ed}$ [kN]  | -722      | -2315        |
|                                  | $M_{Ed}$ [kNm] | -304      | -250         |
|                                  | $V_{Ed}$ [kN]  | 487       | 494          |

Velikost maximálního momentu a normálové síly je velmi citlivá na velikosti pérové konstanty. Když se zvyšuje tuhost podpory, tak se zmenšuje max. ohybový moment a zvětšuje max. tlaková normálová síla. V krajním případě, kdy by se pérová konstanta blížila k nekonečnu (svíslé podpory by se chovaly jako pevné), spojující základový práh by se mohl natočit jen

v důsledku rozdílného stlačení dřívku piloty, u vetknutí do základového prahu by tedy vznikly záporné momenty a max. moment by klesl téměř na polovinu. Ale zároveň by výrazně stoupla tlaková normálová síla a ve druhé pilotě by se naopak objevila tahová síla. (Ověřeno kontrolním výpočtem). Železobetonový dřív piloty snese namáhání větší normálovou silou bez problému, pro MSÚ je však rozhodující namáhání ohybovým momentem. Očekávané sedání piloty v důsledku vnějšího zatížení není větší jak 10 mm. Stačilo by tedy určit pérovou konstantu pro sedání 10 mm. Já jsem však použil pérovou konstantu pro sedání 25 mm, kdy má menší velikost a max. ohybový moment tedy vyjde větší, což je konzervativnější řešení.

Výztuž průřezu piloty jsem navrhnul a posoudil pomocí programu FIN EC 2017 – Beton. Při výpočtu interakčního diagramu nebyl uvažovaný vzpěr a účinky druhého řádu. Ve výpočtu byla zahrnutá tlačaná výztuž.

#### **Materiál:**

BETON: C 25/30

$f_{ck} = 25,0 \text{ MPa}$

$f_{ctm} = 2,6 \text{ MPa}$

$E_{cm} = 31\,000 \text{ MPa}$

OCEL: B500 B

$f_{yk} = 500,0 \text{ MPa}$

$E_s = 200\,000 \text{ MPa}$

#### **Průřez:**

Kruh:  $d = 1\,100 \text{ mm}$

#### **Podélná ohybová výztuž:**

18 ks x profil 25 mm, krytí 100 mm,  $A_s = 0,00884 \text{ m}^2$

Podle [3] je minimální plocha podélné výztuže pro pilotu, jejíž průřezová plocha  $A_c$  je větší  $0,5 \text{ m}^2$  a menší než  $1,0 \text{ m}^2$   $A_{s,min} \geq 0,0025 \text{ m}^2$ .

Navržené min. vyztužení pro patu piloty:

18 ks x profil 16 mm;  $A_s = 0,00362 \text{ m}^2$

#### **Příčná smyková výztuž:**

Spirála profil 8 mm, stoupání 150 mm, krytí 90 mm

Spirála profil 8 mm, stoupání 100 mm, krytí 90 mm, u hlavy piloty v délce 3,0 m

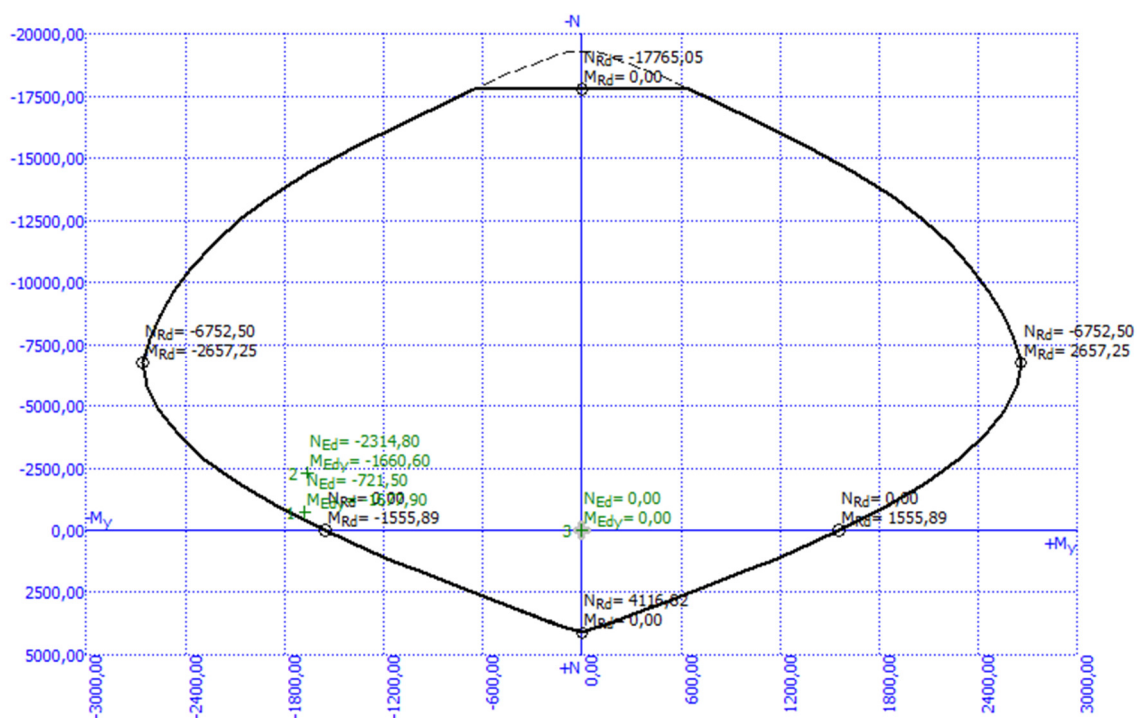
Posouzení průřezu je uvedeno v tabulkách níže. (Tabulka 4-21, Tabulka 4-22). Dále je tu zobrazen interakční diagram piloty (Obrázek 4-15).

Tabulka 4-21: Posouzení max. ohybu a max. smyku ve spodní části piloty

| č. | Název              | $N_{Ed}$<br>[kN] | $N_{Rd}$<br>[kN] | $M_{Edy}$<br>[kNm] | $M_{Rdy}$<br>[kNm] | $V_{Edz}$<br>[kN] | $V_{Rdz}$<br>[kN] | Využití<br>[%] | Posouzení |
|----|--------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----------|
| 1  | M max - 2. pilota  | -722             | -19293           | -1678              | -1775              | 0                 | 0                 | 94,5           | Vyhovuje  |
| 2  | M max - 1.,3. pil. | -2315            | -19293           | -1661              | -2176              | 0                 | 0                 | 76,3           | Vyhovuje  |
| 3  | Posouzení smyku    | 0                | -19293           | 0                  | 1556               | -291              | -358              | 81,1           | Vyhovuje  |

Tabulka 4-22: Posouzení max. smyku u hlavy piloty

| č. | Název                | $N_{Ed}$<br>[kN] | $N_{Rd}$<br>[kN] | $M_{Edy}$<br>[kNm] | $M_{Rdy}$<br>[kNm] | $V_{Edz}$<br>[kN] | $V_{Rdz}$<br>[kN] | Využití<br>[%] | Posouzení |
|----|----------------------|------------------|------------------|--------------------|--------------------|-------------------|-------------------|----------------|-----------|
| 1  | V max - 2. pilota    | -722             | -19293           | -304               | -1775              | 487               | 570               | 85,4           | Vyhovuje  |
| 2  | V max - 1.,3. pilota | -2315            | -19293           | -250               | -2176              | 494               | 777               | 63,6           | Vyhovuje  |



Obrázek 4-15: Interakční diagram piloty



## 5 3D NUMERICKÝ MODEL

### 5.1 Tvorba modelu

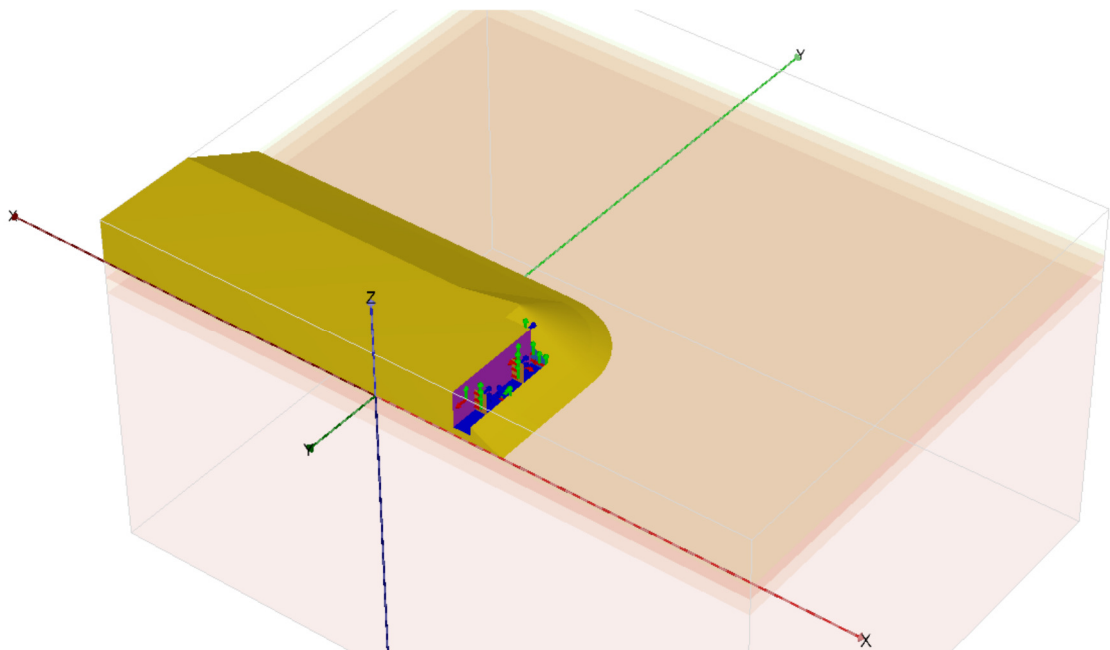
#### 5.1.1 Geometrie modelu

Model obsahuje opěru OP 1 levého mostu a přiléhající část násypu. Druhý most má stejnou geometrii a velmi podobné zatížení, proto bylo možné tuto úlohu modelovat jako symetrickou podél osy dálnice.

Velikost modelu byla zvolena vhodně tak, aby byl model co nejmenší z důvodu výpočetní náročnosti a zároveň dostatečně velký tak, aby okrajové podmínky výrazně neovlivňovaly chování modelu. To znamená, aby jeho svislý rozměr byl větší, než je hloubka deformační zóny a vodorovné rozměry byly takové, aby se v jeho krajích co nejméně projevovaly deformace a změny napětí.

**Celkové rozměry modelu:**

- $X_{\min} = -32,6$  m;     $X_{\max} = 50$  m;     $\Delta X = 82,6$  m;
- $Y_{\min} = 0$  m;     $Y_{\max} = 70$  m;     $\Delta Y = 70$  m;
- $Z_{\min} = -50$  m;     $Z_{\max} = 5,7$  m;     $\Delta Z = 55,7$  m;



Obrázek 5-1: Tvar dokončeného násypu s opěrou

Prostorový model násypu a opěry jsem vytvořil v programu AutoCAD podle půdorysu a příčného řezu a následně importoval do PLAXISU. Detaily, které by neměly významný vliv na výsledek výpočtu, jsem zjednodušil nebo upravil tak, aby nebyl výpočetní model příliš složitý. V příčném řezu má násyp stejné rozměry jako v prvním způsobu výpočtu. Akorát se tu uvažuje jen s jeho polovinou. Tvar násypu je zobrazený na předchozím obrázku (Obrázek 5-1).

### 5.1.2 Geotechnický profil

V Plaxisu se profil podloží zadává pomocí vrtů. Je možné si nadefinovat více vrtů s rozdílnými vrstvami a mocnostmi. Podle polohy vrtů si program již sám stanoví model podloží, které může mít proměnné vlastnosti podle vrtů.

Do modelu by tedy bylo možné zahrnout i další vrty, které byly provedeny v okolí. Avšak jejich profil se nijak zásadně neliší od vrtu J1292 a navíc jsou poměrně vzdálené od opěry OP1. Rozhodl jsem se tedy použít pro stanovení geotechnického profilu pouze vrt J1292. Toto zjednodušení zřehlednilo model, usnadnilo výpočet a také dovolilo lepší porovnání s prvním výpočetním způsobem.

Geotechnický profil jsem tedy použil stejný jako u prvního způsobu výpočtu. Změnil se způsob zadání propustnosti. Součinitel konsolidace  $c_v$ , byl pomocí vzorce (4-2) přepočten na koeficient filtrace  $k$ . Přepočet je uvedený v následující tabulce (Tabulka 5-1).

Tabulka 5-1: Přepočet koeficientu filtrace

|              | $E_{def}$ | $\nu$ | $\beta$ | $E_{oed}$ | $c_v$    | $k$      | $c_v$   | $k$       |
|--------------|-----------|-------|---------|-----------|----------|----------|---------|-----------|
| Zemina       | [Mpa]     | [-]   | [-]     | [Mpa]     | [m/s]    | [m/s]    | [m/den] | [m/den]   |
| GT1b - F4,F5 | 4,00      | 0,37  | 0,57    | 7,07      | 8,19E-04 | 1,16E-06 | 70,75   | 1,000E-01 |
| GT5 - F8     | 4,00      | 0,42  | 0,39    | 10,21     | 1,16E-07 | 1,13E-10 | 0,01    | 9,793E-06 |
| GT6 - R6     | 6,00      | 0,40  | 0,47    | 12,86     | 5,79E-07 | 4,50E-10 | 0,05    | 3,889E-05 |
| GT7 -R5      | 20,00     | 0,30  | 0,74    | 26,92     | 1,16E-06 | 4,30E-10 | 0,10    | 3,714E-05 |
| Násyp        | 20,00     | 0,30  | 0,74    | 26,92     | 3,12E-02 | 1,16E-05 | 2692,3  | 1,000E+00 |

## 5.2 Materiály a vlastnosti prvků

### 5.2.1 Hardening Soil model

Pro zeminy byl jako konstitutivní materiálový model použitý Hardening Soil model (dále HS), jenž je poněkud složitější než klasický Mohr-Coulombův model (dále MC). Liší se od něj

hyperbolickou plochou plasticity a lépe vystihuje skutečné chování zeminy. Je zejména vhodný pro případ konsolidačního násypu, kdy probíhá jeho odtěžení. Pro tento případ model uvažuje odtěžovací modul pružnosti  $E_{ur}$ , který má větší hodnotu než  $E_{oed}$ . HS model je však také náročnější na vlastní výpočet.

HS je definován více parametry. Deformační parametry jsou určeny třemi deformačními moduly, které jsou definovány při referenčním napětí 100 kPa. [6]

- sečnový modul  $E_{50}$  z odvozené triaxiální zkoušky
- tečnový modul  $E_{oed}$  z prvního zatížení v oedometru
- modul pružnosti  $E_{ur}$  stanovený z odtížení a opětovného přitížení vzorku v oedometru
- poissonovo číslo  $\nu_{ur}$  pro odtížení a znovuzatížení
- exponent  $m$  řídící závislost deformačních parametrů na napětí

Tyto parametry je poměrně obtížné stanovit. Pokud nejsou známy z laboratorních zkoušek jako v tomto případě, tak je možné za  $E_{50}$  a  $E_{oed}$  dosadit hodnotu deformačního modulu z oedometru  $E_{oed}$  a za  $E_{ur}$  použít trojnásobnou hodnotu tohoto modulu. Pro nesoudržné zeminy je vhodná hodnota parametru  $m = 0,5$  a pro soudržné zeminy, zejména jíly, je vhodná hodnota  $m = 1$ . [14] Ostatní parametry jsou stejné jako pro MC model.

U všech zemin byl typ odvození nastaven na *Drained*, program tedy počítá s efektivními parametry zemin. Při výpočtu konsolidace Plaxis využívá pro určení pórových tlaků pouze koeficienty filtrace jednotlivých zemin, nezávisle na tom, zda je u zemin nastaveno *Drained* nebo *Undrained*. Toto nastavení program zohledňuje při plastickém výpočtu nebo při výpočtu stupně stability. Pro výpočet konsolidace není tedy třeba zadávat jiný typ odvození. [6]

Tabulka 5-2: Parametry zemin pro HS model

|              | $\gamma$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{sat}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\varphi_{ef}$<br>[°] | $c_{ef}$<br>[kPa] | $\psi$<br>[°] | $E_{50}$<br>[kPa] | $E_{oed}$<br>[kPa] | $E_{ur}$<br>[kPa] | $\nu_{ur}$<br>[-] | $m$<br>[-] | $k$<br>[m/den] |
|--------------|----------------------------------|--|-----------------------|-------------------|---------------|-------------------|--------------------|-------------------|-------------------|------------|----------------|
| GT1b - F4,F5 | 19,5                             | 20,5                                   | 23                    | 5                 | 0             | 7070              | 7070               | 21210             | 0,2               | 1,0        | 1,000E-01      |
| GT5 - F8     | 20,5                             | 21,0                                   | 20                    | 15                | 0             | 10210             | 10210              | 30630             | 0,2               | 1,0        | 9,794E-07      |
| GT6 - R6     | 20,5                             | 21,0                                   | 22                    | 16                | 0             | 12860             | 12860              | 38580             | 0,2               | 1,0        | 7,776E-07      |
| GT7 -R5      | 21,0                             | 21,5                                   | 24                    | 18                | 0             | 26920             | 26920              | 80760             | 0,2               | 1,0        | 3,715E-07      |
| Násyp        | 19,0                             | 20,0                                   | 30                    | 3                 | 1             | 33650             | 33650              | 100950            | 0,2               | 0,5        | 1,000E+00      |

### 5.2.2 Použité prvky

Těleso násypu bylo modelováno jako objemový prvek ze zeminy. Piloty byly vytvořeny prvkem typu *embedded beam* a opěra byla vytvořena pomocí plošného prvku typu *plate*. Aby bylo možné lépe vystihnout interakci mezi opěrou a násypem, tak na jejich rozhraní byl použitý prvek *interface*.

*Embedded beam* je liniový prvek, který má jak ohybovou, tak osovou tuhost a interaguje s okolní zeminou. Mezi tuto interakci patří také plášťové tření a únosnost paty. Jedná se o liniový prvek, jehož vlastnosti jsou dané buď zadaným průřezem anebo přímo momentem setrvačnosti a plochou. Prvku je přiřazen příslušný modul pružnosti  $E$  a objemová tíha. Vzhledem k tomu, že v zemině nezaujímá žádný prostor, tak je třeba zvolit takovou objemovou tíhu, která odpovídá rozdílu objemové tíhy mezi materiálem prvku a okolní zeminou. Ačkoliv tento prvek nezaujímá žádný prostor, tak se jeho okolí v rozsahu piloty chová pouze elasticky a nedochází v něm k žádným plastickým změnám. Tato vlastnost přibližuje chování prvku k objemové pilotě. Interakce mezi pilotou a zeminou se v modelu zobrazuje podél liniového prvku a ne ve vzdálenosti teoretického poloměru piloty.

*Plate* je plošný prvek. Má ohybovou i osovou tuhost a vychází z Mindlinovy deskové teorie. Jeho vlastnosti jsou definované tloušťkou  $d$  a modulem pružnosti  $E$ . Tloušťka je také pouze jen teoretická, protože prvek v prostoru nezaujímá žádný objem. Je proto nutné vhodně stanovit objemovou tíhu, protože část objemu desky již zaujímá zemina se svojí objemovou tíhou.

Aby bylo možné do výpočtu lépe zahrnout interakci mezi zeminou a pilotou, je třeba na jejím rozhraní vytvořit prvek *interface*. Tento prvek nemůže existovat sám o sobě, je vždy spjatý s nějakou strukturou. *Interface* má přiřazenou virtuální tloušťku. Čím je větší, tím vznikají větší pružné deformace. Obecně je po tomto prvku požadováno, aby vznikající deformace byly co nejmenší, proto je vhodné použít spíše menší virtuální tloušťkou. Když se však použije příliš malá hodnota, tak hrozí nestabilita výpočtu. Materiál pro *interface* se zadává stejně jako pro zeminy. Je možné mu přiřadit stejné parametry jako okolní zemině. Důležitý je parametr  $R_{inter}$ , který popisuje drsnost na styku mezi zeminou a konstrukcí. Defaultně je jeho hodnota nastavená na 1. Pokud se drsnost snižuje, tak se zmenšuje i  $R_{inter}$ , teoreticky až k 0. Obvykle se používají hodnoty v intervalu 0,5 – 1 pro různé typy konstrukcí. [6] Já jsem za  $R_{inter}$  zvolil hodnotu 0,6.

### 5.2.3 Materiály a vlastnosti prvků

V následující tabulce (Tabulka 5-3) jsou vypsány vstupní parametry pro pilotu.

Tabulka 5-3: Parametry piloty – prvek typu embedded beam

| Prvek  | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | E [kPa]  | l [m] | d [m] |
|--------|-------------------------------|----------|-------|-------|
| Pilota | 6,0                           | 2,60E+07 | 14,0  | 1,131 |

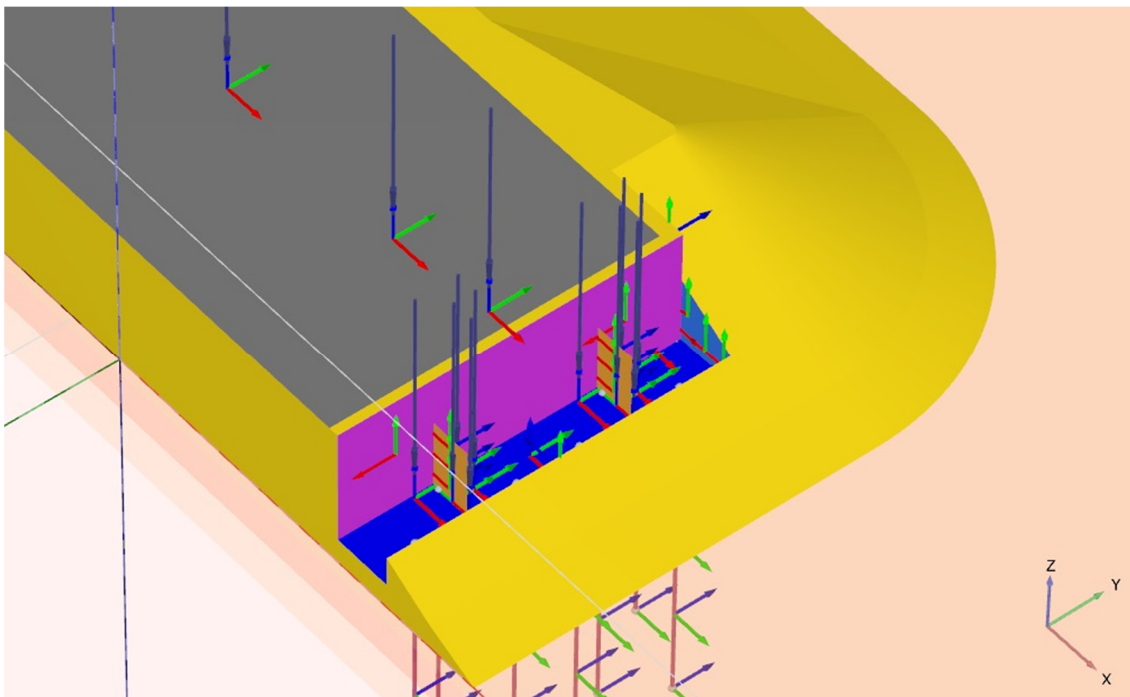
Jelikož ve 3. fázi – Výstavba opěry je postavena samotná opěra a zasypána je až v další fázi, tak jsou k jednotlivým částem opěry přiřazeny většinou dvě objemové tíhy. Ve fázi výstavby opěry působí větší objemová tíha z dvojice hodnot uvedených v následující tabulce (Tabulka 5-4) pro určitý prvek. Pro zasypanou opěru pak platí menší z uvedené dvojice hodnot. Důvod změny objemové tíhy je uvedený v předchozí kapitole (5.2.2). Pro nezasypanou opěru nejsou všechny hodnoty objemové tíhy 25 kN/m<sup>3</sup> z toho důvodu, že střednice základového prahu je posunuta na její základovou spáru, aby byla dodržena délka pilot 14 m a jejich poloha, a proto je výška stěny a křídla o polovinu výšky základového prahu větší. Jejich objemová tíha byla tedy vynásobena poměrem skutečné výšky ku výšce modelové. Objemová tíha zasypaných prvků opěry pak byla stanovena tak, že byla od skutečné tíhy konkrétního prvku opěry odečtena tíha zeminy, jež zaujímala část objemu tohoto prvku a výsledná tíha byla vydělena plochou tohoto prvku.

Prvek bariéra slouží k tomu, aby zadržel zeminu přisýpanou z líce a z boku opěry, nemá proto žádnou tíhu. Jeho tloušťka byla zvolena co nejmenší, aby nijak zásadně neovlivňoval výslednou tuhost opěry.

Tabulka 5-4: Parametry opěry – prvek typu plate

| Prvek               | $\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ] | E [kPa]  | $\nu$ [-] | d [m] |
|---------------------|-------------------------------|----------|-----------|-------|
| Zákl. práh          | 25,0                          | 3,10E+07 | 0,2       | 1,0   |
| Zákl. práh zasypaný | 12,0                          |          |           |       |
| Stěna               | 22,3                          | 3,20E+07 | 0,2       | 0,5   |
| Stěna zasypaná      | 15,0                          |          |           |       |
| Křídlo              | 22,0                          | 3,20E+07 | 0,2       | 0,8   |
| Křídlo zasypané     | 10,0                          |          |           |       |
| Pilíř               | 21,7                          | 3,20E+07 | 0,2       | 1,5   |
| Bariéra             | 0,0                           | 3,10E+07 | 0,2       | 0,1   |

Detail opěry vytvořené z prvků *plate* je na následujícím obrázku (Obrázek 5-2).



Obrázek 5-2: Detail opěry s plošným zatížením

#### 5.2.4 Plášťové tření

Únosnost piloty se v Plaxisu zadává max. plášťovým třením a max. silou na patě. Síla na patě a plášťové tření je aktivováno relativní deformací mezi pilotou a zeminou. Plášťové tření je možné zadat třemi způsoby:

- Lineární
- Závislé na vrstvě
- Průběhem

Lineární způsob je nejjednodušší. Je vhodný do zemin, kde je jen jedna vrstva se stejnými parametry. Pokud je plášťové tření zadáno jako závislé na vrstvě, tak se dopočítává z pevnostních parametrů ( $c_{ef}$ ,  $\varphi_{ef}$ ) a z příslušných  $R_{inter}$  jednotlivých vrstev, kterými pilota prochází. Při zadání plášťového tření průběhem je možné v libovolných bodech na pilotě určit jeho velikost. [6]

Já jsem se rozhodl zadat plášťové tření průběhem, protože při tomto způsobu je možné do modelu implementovat velikosti plášťového tření a síly na patě z MZK. Nepodařilo se mi však zjistit, při jaké deformaci program tyto síly plně aktivuje. Srovnání tedy nebude zcela přesné.

Plášťové tření se zadává jako síla na 1 m délky piloty. Je tedy třeba vynásobit plášťové tření  $q_{si}$ , určené při výpočtu MZK, obvodem piloty a součinitelem  $m_1 = 0,7$  stejně jako při výpočtu  $R_{su}$ , abychom dostali stejné výsledky. Přepočtení je uvedeno v další tabulce (Tabulka 5-5).

Tabulka 5-5: Přepočtení plášťového tření

| z    | h    | $l_i$ | $q_{si}$ | $d_i$ | $O_i$ | $T_{i,max}=0,7*q_{si}*O_i$ |
|------|------|-------|----------|-------|-------|----------------------------|
| [m]  | [m]  | [m]   | [kPa]    | [m]   | [m]   | [kN/m]                     |
| 1,0  | 0,0  | 1,0   | 0,0      | 1,18  | 3,71  | 0,0                        |
| 1,7  | 0,7  | 0,7   | 28,2     | 1,18  | 3,71  | 73,2                       |
| 3,3  | 2,3  | 1,6   | 36,6     | 1,18  | 3,71  | 94,9                       |
| 5,4  | 4,4  | 2,1   | 67,9     | 1,18  | 3,71  | 176,1                      |
| 14,0 | 13,0 | 8,6   | 121,2    | 1,10  | 3,46  | 293,1                      |

Síla na patě je daná sedáním piloty. Jako její maximální hodnotu jsem se rozhodl stanovit sílu, která na patě vznikne při sedání 25 mm. Tato síla odpovídá  $R_{pu}$  vypočtené u MZK.

$$F_{max} = R_{pu} = 1999 \text{ kN}$$

### 5.3 Zatížení

Proměnné zatížení přenášené ložisky je stanoveno z tabulky reakce ložisek (příloha P7) jako průměr z maximální hodnoty z jednoho ložiska a k tomu odpovídající hodnoty z druhého ložiska.

$$F_Q = \frac{1625 + 1297}{2} = 1461 \text{ kN}$$

Zatížení z ložisek od mostovky a dopravy je do modelu vnesené jako plošné zatížení působící na náhradní ploše na střednici základového prahu opěry. Náhradní plochu jsem stanovil roznosem zatížení z půdorysu polopilíře do střednice základového prahu symetricky na všechny strany pod úhlem 45°.

$$\Delta x = 1,4 + 2 * \operatorname{tg}45^\circ * 0,5 = 2,4 \text{ m}$$

$$\Delta y = 1,5 + 2 * \operatorname{tg}45^\circ * 0,5 = 2,5 \text{ m}$$

$$A_{rozno} = \Delta x * \Delta y = 2,4 * 2,5 = 6 \text{ m}^2$$

Síly z ložisek převedené na plošné zatížení jsou v následující tabulce. (Tabulka 5-6)

Tabulka 5-6: Převod síly z ložisek na náhradní plošné zatížení

| Ložisko | Druh zatížení | $F_z$ | $A$               | $\sigma_z$           |
|---------|---------------|-------|-------------------|----------------------|
|         |               | [kN]  | [m <sup>2</sup> ] | [kN/m <sup>2</sup> ] |
| Vnější  | Stálé         | 2006  | 6                 | 334,3                |
|         | Proměnné      | 1461  | 6                 | 243,5                |
| Vnitřní | Stálé         | 1770  | 6                 | 295,0                |
|         | Proměnné      | 1461  | 6                 | 243,5                |

Na násyp působí plošné pásové zatížení šířky 13,0 m. ( $y_1 = 0$ ;  $y_2 = 13$ ) V podélném směru působí od rubu opěry po celé délce násypu. Toto zatížení nahrazuje charakteristické zatížení od krytu vozovky spolu s rovnoměrným zatížením od dopravy (UDL). Jeho velikost je 10 kN/m<sup>2</sup>.

Za rubem opěry působí plošné zatížení dvounápravou (TS). Je roznesené rovnoměrně na délku 1,6 m a šířku 10,75 m přes celou projektovanou šířku vozovky. ( $y_1 = 1,5$ ;  $y_2 = 12,25$ ) Jeho velikost je následující:

$$q_{TS} = \frac{2 * (300 + 200 + 100)}{1,6 * 10,75} = 69,8 \text{ kN/m}^2$$

## 5.4 Okrajové podmínky modelu

### 5.4.1 Statické okrajové podmínky

Globální statické okrajové podmínky modelu jsou podmínky deformační. Jsou nastaveny jako normální, což znamená, že dno modelu je fixováno jak ve vertikálním, tak v horizontálním směru. Stěny modelu jsou horizontálně nepohyblivé, ale vertikálně posuvné. Horní okraj modelu je volný, což znamená, že deformace prvků na tomto okraji není nijak omezena.

### 5.4.2 Vodní režim

Globální hladina podzemní vody je v hloubce 1,25 m. Žádné proudění tu neprobíhá. V počáteční fázi jsou stěny modelu otevřené, akorát dno modelu (souřadnice  $Z_{min}$ ) je uzavřené. Ve všech ostatních výpočtových fázích je kromě dna uzavřena také stěna se souřadnicí  $Y_{min}$ , protože podél této roviny je model symetrický a stěna se souřadnicí  $X_{min}$ , protože dále pokračuje násyp, a tudíž deformace a proudění jsou ve směru  $y$  teoreticky nulové.



## 5.5 Fáze výstavby a její varianty

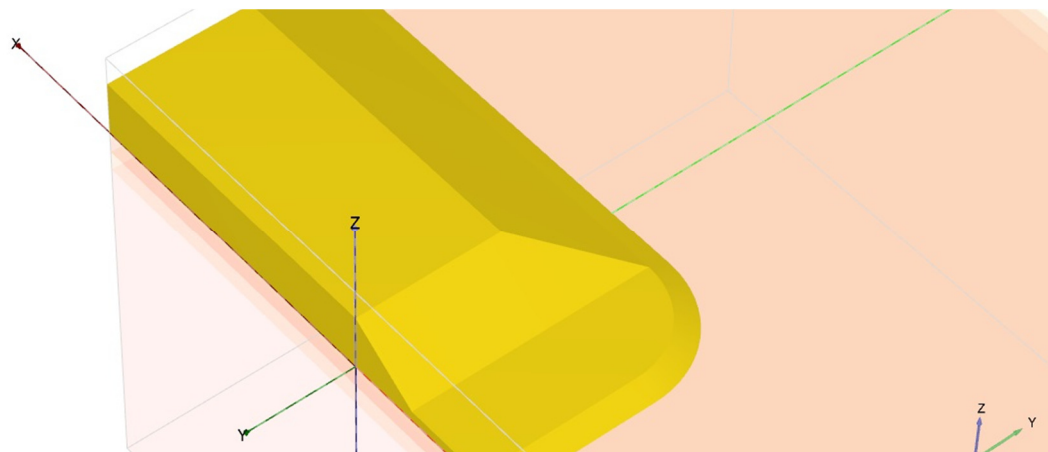
Proces výstavby je rozdělený do podobných fází se stejným časovým průběhem jako při prvním způsobu výpočtu. Liší se v několika bodech:

- První varianta je uspořádána tak, aby se během výstavby nemusela odebrat žádná zemina z násypu, proto je v místě opěry nasypán pouze podnásyp 1,0 m vysoký, ze kterého se později vrtají piloty, a zakládá se na něm opěra (Obrázek 5-3).
- Do druhé a třetí varianty je zařazena mezifáze – Odtížení. Během této doby se odtěží konsolidační násyp.
- V prvním způsobu výpočtu se uvažovalo s tím, že v místě opěry působí 5,7 m vysoký násyp. Ve skutečnosti je situace poněkud složitější, protože tento násyp má plnou výšku až ve vzdálenosti několika metrů od opěry. Prostorový model v Plaxisu tuto situaci vystihuje lépe, kdy v první variantě působí pouze podnásyp a ve druhé je celý půdorys násypu dosypán na výšku 5,7 m a v mezifázi poté odtěžen (Obrázek 5-4).
- Ve třetí variantě je přisypán konsolidační násyp 3,0 m vysoký a je přitížena pata násypu z čelní strany v délce 10 m a výšce 5,7 m (Obrázek 5-5).
- Výpočet poslední fáze – Vymizení pórových tlaků, není stanoven určitou dobou jako u prvního způsobu výpočtu, ale je definován poklesnutím pórového přetlaku na hodnotu nižší než 1 kPa.

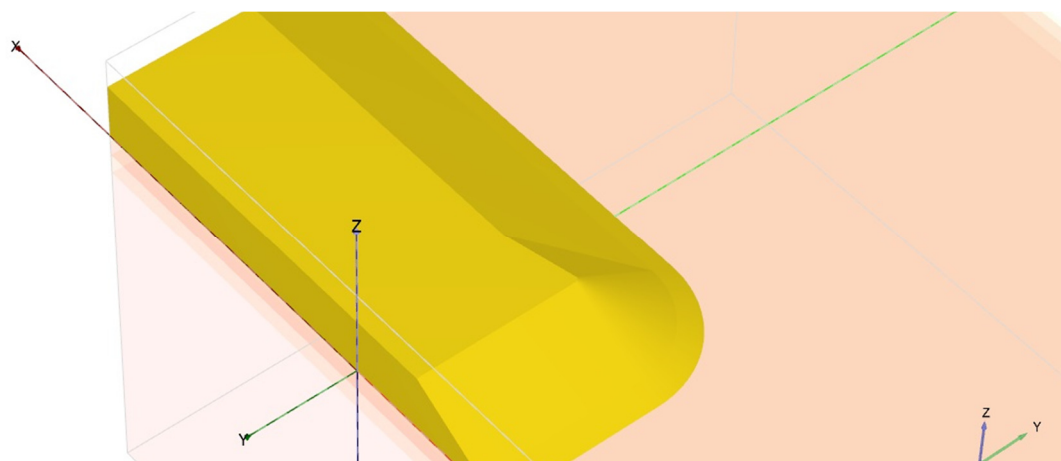
Fáze výstavby pro numerický model jsou uspořádány v další tabulce (Tabulka 5-7). Zvýrazněné fáze se v jednotlivých variantách liší.

Tabulka 5-7: Fáze výstavby – 3D numerický model

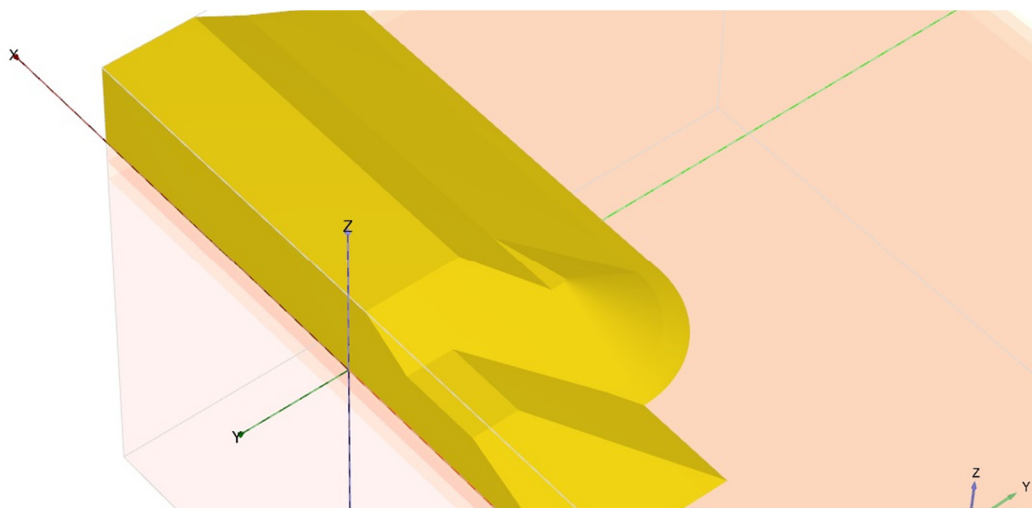
| Fáze výstavby |                   | 1. varianta  |            |            | 2. a 3. varianta |            |            |                     |      |
|---------------|-------------------|--------------|------------|------------|------------------|------------|------------|---------------------|------|
|               |                   | Začátek fáze | Délka fáze | Konec fáze | Začátek fáze     | Délka fáze | Konec fáze | Konec fáze od $t_0$ |      |
|               |                   | [den]        | [den]      | [den]      | [den]            | [den]      | [den]      | [den]               |      |
| 0. fáze       | Sypání násypu     |              | 0          | 30         | 30               | 0          | 30         | 30                  |      |
| 1. fáze       | Konsolidace       |              | 30         | 60         | 90               | 30         | 180        | 210                 | 0    |
| Mezifáze      | Odtížení          | -            | -          | -          | -                | 210        | 5          | 215                 |      |
| 2. fáze       | Piloty            | $t_0$        | 90         | 45         | 135              | 215        | 40         | 255                 | 45   |
| 3. fáze       | Opěra             | $t_1$        | 135        | 60         | 195              | 255        | 60         | 315                 | 105  |
| 4. fáze       | Dostavba          | $t_2$        | 195        | 180        | 375              | 315        | 180        | 495                 | 285  |
| 5. fáze       | Uvádění do prov.  | -            | 375        | 90         | 465              | 495        | 90         | 585                 | 375  |
| 6. fáze       | 3 roky provozu    | $t_3$        | 465        | 1095       | 1560             | 585        | 1095       | 1680                | 1470 |
| 7. fáze       | Vymizení pór. tl. | $t_4$        | 1560       | ?          | ?                | 1680       | ?          | ?                   | ?    |



Obrázek 5-3: 1. variantu v 1. fázi – Konsolidace a pro všechny varianty ve 2. fázi – Piloty



Obrázek 5-4: 2. varianta v 1. fázi s dosypaným násypem do jedné roviny



Obrázek 5-5: 3. Varianta v 1. fázi – konsolidační násyp s přitížením čela násypu

## 5.6 Síť konečných prvků

### 5.6.1 Vlastnosti prvků

Síť konečných prvků vytváří program z modelu automaticky. Není možné si tu nastavit druh prvku, pro všechny struktury je automaticky definován určitý prvek. Základní prvek pro zeminy je desetiuzlový čtyřstěn. Každý uzel má 6 stupňů volnosti. *Embedded beam* je speciální prvek složený z prvku *beam*, který dodává ohybovou a osovou tuhost a z prvku *interface*, který zabezpečuje interakci se zeminou. Prvek *plate* je interpolován šestiuzlovým trojúhelníkem s 5 stupni volnosti v každém uzlu. (3 posuny, 2 pootočení)

Prvek *interface* je definován 12 uzly. Od ostatních prvků se liší tak, že uzly jsou sdruženy vždy po dvou, místo jednoho samostatného uzlu. Vzdálenost mezi těmito uzly je nula. Každý uzel má 3 stupně volnosti (3 posuny). Důsledek toho je takový, že *interface* dokáže páru uzlů přiřadit rozdílné deformace. [6]

### 5.6.2 Hustota sítě

Jemnost sítě se dá v Plaxisu nastavit manuálně. Nejdříve se zjemní nebo zředí konkrétní oblasti, a pak se nastaví globální hustota sítě při automatickém síťování. Celkovou hustotu sítě jsem nastavil na *coarse* a některé části v okolí opěry jsem zjemnil až na poměr 0,080.

V okolí pilot jsem zjemnil síť objemu o délkách stran:  $\Delta x = 22,0$  m;  $\Delta y = 28,0$  m;  $\Delta z = 18,5$  m.

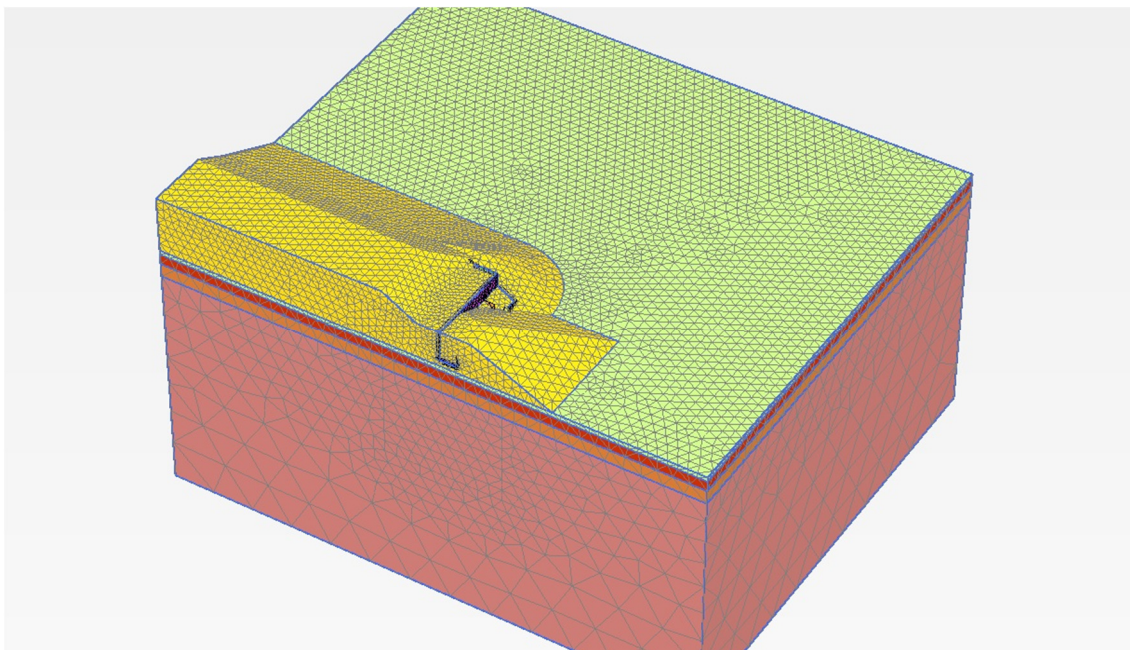
Model má celkem 95 325 prvků a 141 157 uzlů. Průměrná délka strany prvku je 1,719 m.

### 5.6.3 Kvalita prvků

Kvalita prvků je důležitá pro správný výpočet. Je definována poměrem mezi vepsanou a opsanou koulí prvku, kde pro pravidelný čtyřstěn je tato hodnota normalizována na 1. Kvalita může tedy nabývat hodnot od 0 do 1. Se zhoršující se kvalitou prvků se zvětšuje číslo podmíněnosti matice a zhoršuje se přesnost výsledků. [6]

V tomto modelu je nejhorší kvalita prvku 0,2547 a nachází se v okolí opěry. Naopak nejlepší prvek dosahuje kvality 0,9998. Při dalším zjemňování sítě se mi již nepodařilo dosáhnout vyšší kvality prvků.

Model s vytvořenou sítí konečných prvků je na následujícím obrázku (Obrázek 5-6).



Obrázek 5-6: Model s vytvořenou sítí konečných prvků

## 5.7 Výpočet

Před zahájením výpočtu jsem v modelu vybral 10 zájmových bodů v uzlech, ve kterých se budou porovnávat hodnoty deformací a dalších zjišťovaných výsledků. Tyto body se nachází na hlavách pilot č. 1, 2, 3, 6, 7. Další bod je potom na patě piloty č. 6 (Tato pilota vykazuje největší normálovou sílu). A zbylé 4 body se nachází v rovině symetrie ( $Y = 0$ ). Dva body jsou v hloubce 0,7 m pod opěrou a pod násypem v rohu modelu a zbylé dva body jsou na stejných x-ových souřadnicích, a v hloubce přibližně 16 m.

Pro výpočet počáteční fáze mohla být použita  $K_0$  procedura, protože se v modelu podloží nenachází žádné ukloněné vrstvy, hladina podzemní vody je v jedné rovině a nevzniká tu proudění. [6]

Pro všechny ostatní fáze byl použitý výpočet typu *Konsolidace*.

Poslední fáze byla spočítána pomocí nastavení *Minimum excess pore pressure*, k ostatním fázím bylo použito *Stage construction*.

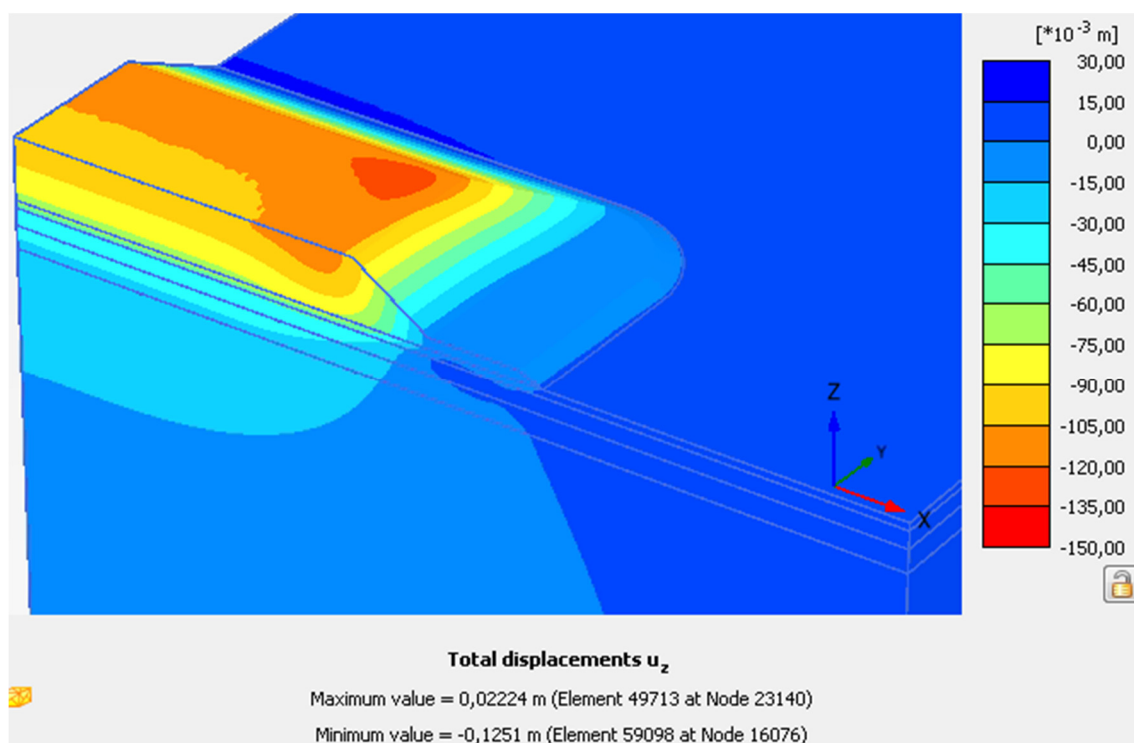
Pro výpočet pórového tlaku ve fázích, kde se mění zatížení, bylo použito nastavení *Phreatic*. Ve fázích, kde se zatížení nemění a probíhá pouze konsolidace, byla použita možnost *Use pressures from previous phase*.

## 5.8 Výstupy

V této kapitole jsou uvedeny výsledky a výstupy z modelu. Pro lepší názornost jsou zpracovány v grafech, kde se porovnávají všechny tři varianty výpočtu. Problém porovnání časového průběhu variant s různou délkou fází (doba konsolidace) jsem vyřešil tak, že jako čas nula jsem stanovil začátek sypání násypu pro druhou a třetí variantu. První varianta začíná v čase 120 dnů, tedy tak, aby další fáze výstavby (mají již stejný časový průběh) probíhaly ve stejnou dobu.

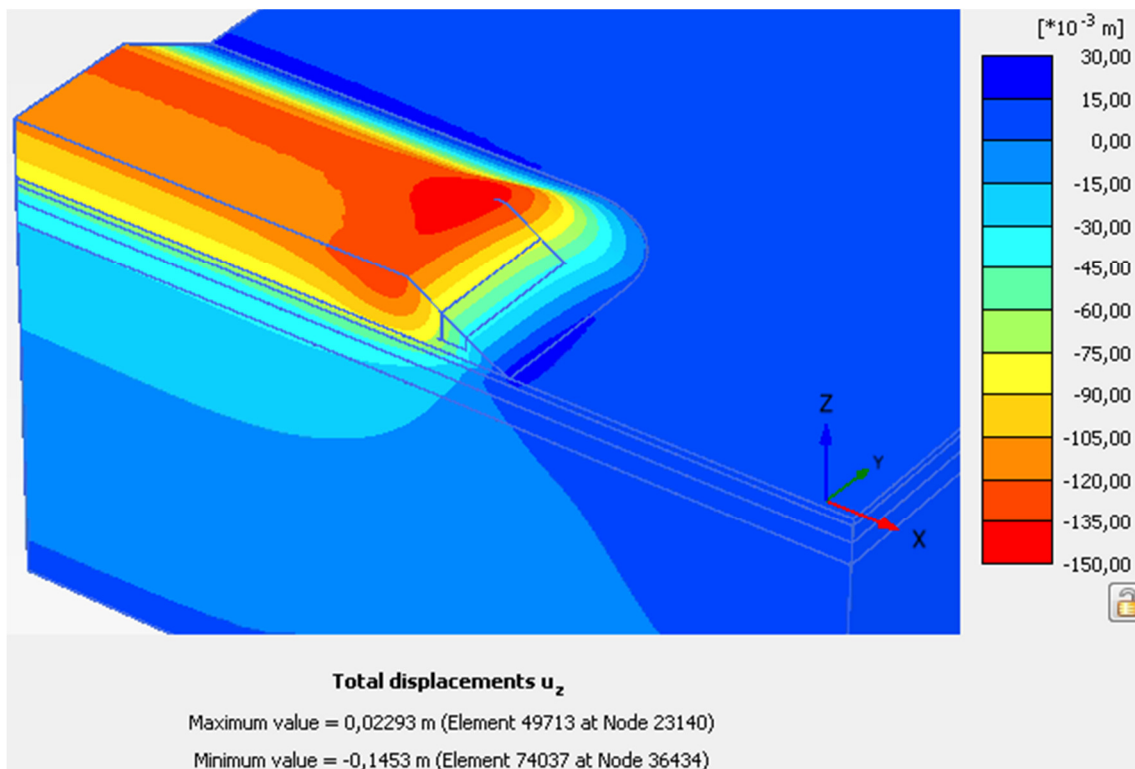
### 5.8.1 Svislé deformace – konsolidace násypu

Nyní následují svislé deformace jednotlivých variant na konci 1. fáze – Konsolidace násypu. Jsou zobrazeny na následujících obrázcích (Obrázek 5-7, Obrázek 5-8, Obrázek 5-9).

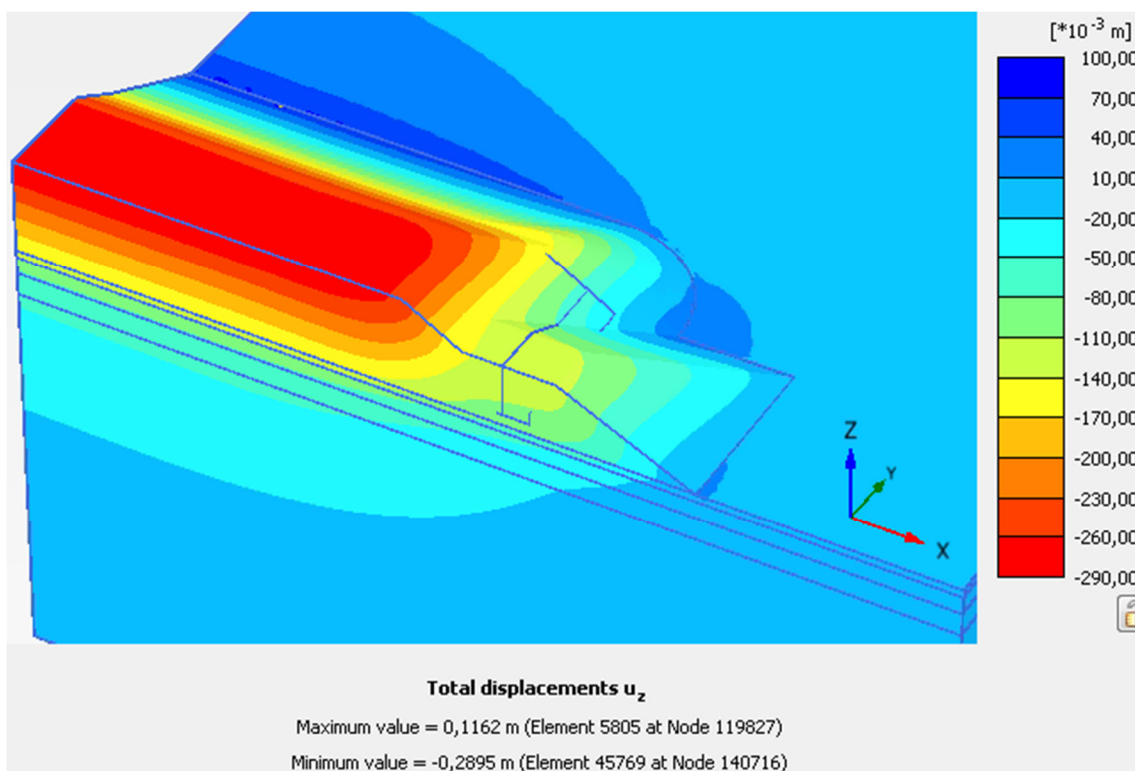


Obrázek 5-7: Sedání – Konsolidace násypu – 1. varianta

Z boku u paty násypu jsou patrná nezanedbatelná nadzdvížení terénu. U prvních dvou variant to znamená, že se model chová příliš „pružně“. Ve třetí variantě jsou však tato nadzdvížení výrazně vyšší a zároveň sednutí násypu je větší než by odpovídalo poměru zvýšeného zatížení. Hlavní důvod je nejspíš takový, že násyp s konsolidačním násypem byly nasypány příliš rychle, pórové tlaky vystoupaly na vysoké hodnoty, na některých místech byla dosažena smyková pevnost a vznikly tedy nadměrné deformace. Tento problém by bylo možné vyřešit určitou



Obrázek 5-8: Sedání – Konsolidace násypu – 2. varianta



Obrázek 5-9: Sedání – Konsolidace násypu – 3. varianta

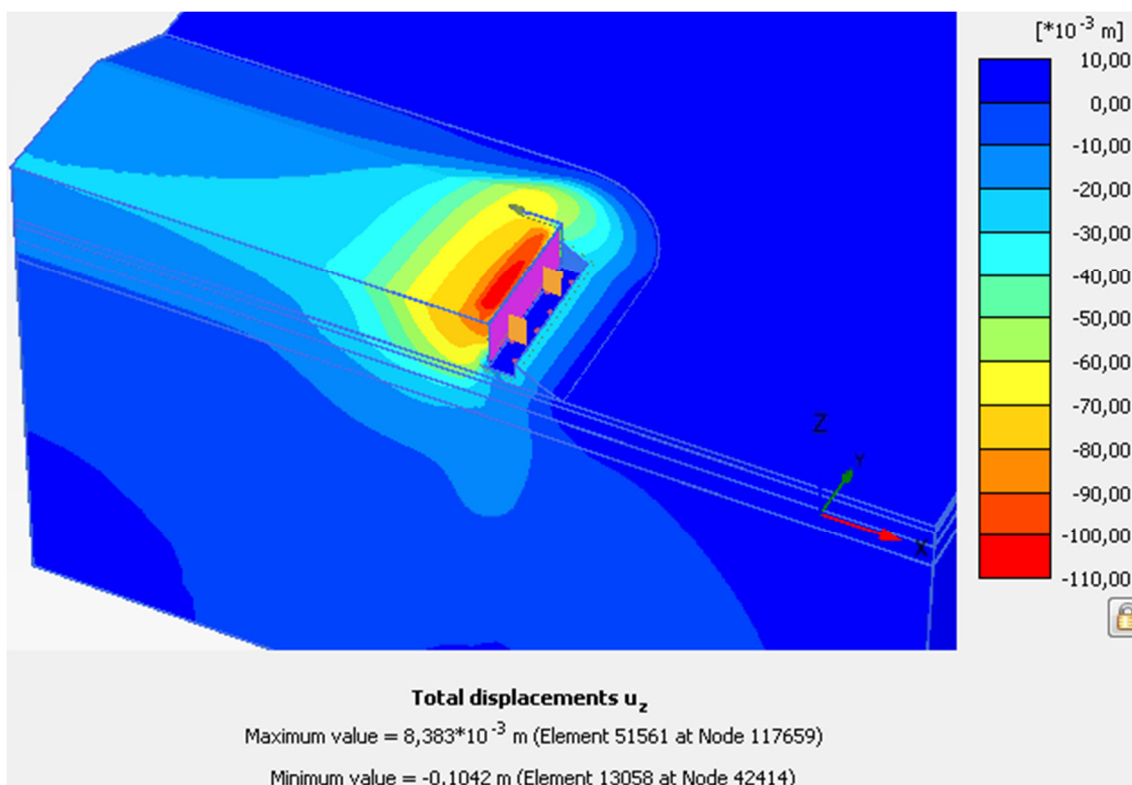


prodlevou mezi dokončením násypu a sypáním konsolidačního násypu. Úkolem této práce však není stanovit, za jakých podmínek bude násyp stabilní, ale určit vliv konsolidace na výsledné sedání pilot. Proto se tedy tímto problémem nebudu již dále zabývat.

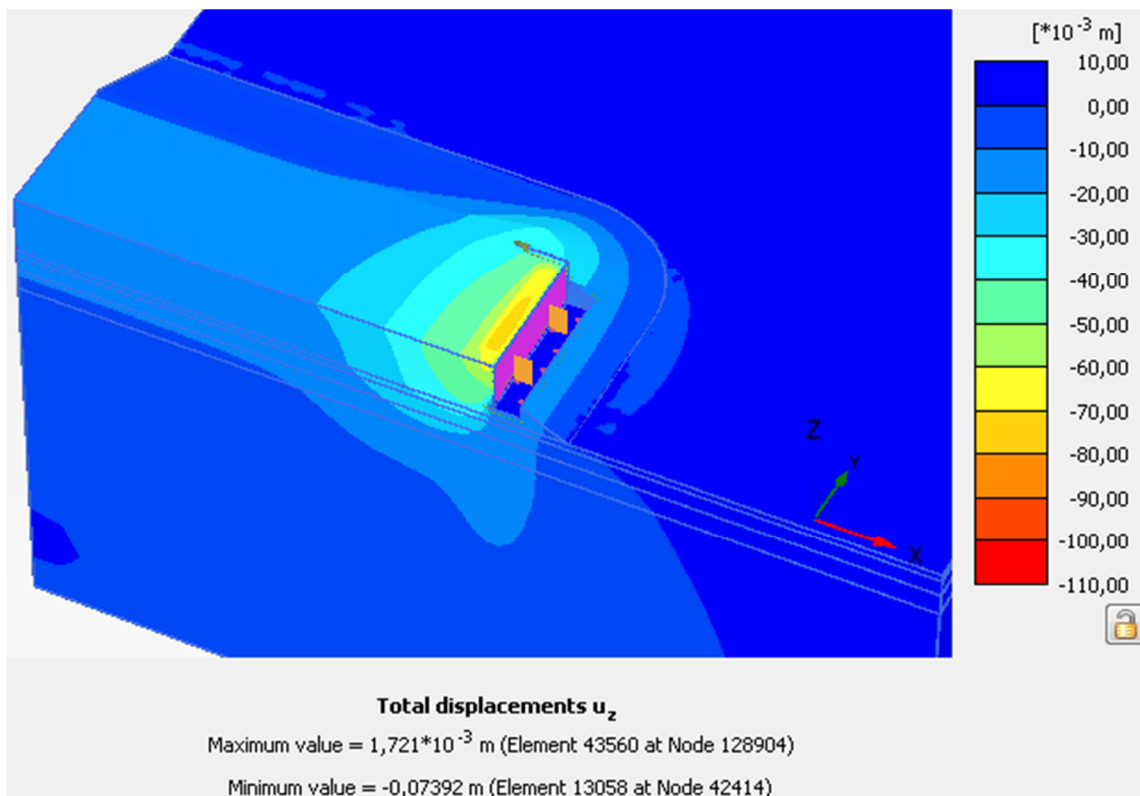
Pro třetí variantu byla v legendě zvolena jiná barevná škála hodnot, protože sednutí a nadzdvížení tu jsou výrazně vyšší než pro první dvě varianty.

### 5.8.2 Svislé deformace – Uvedení do provozu

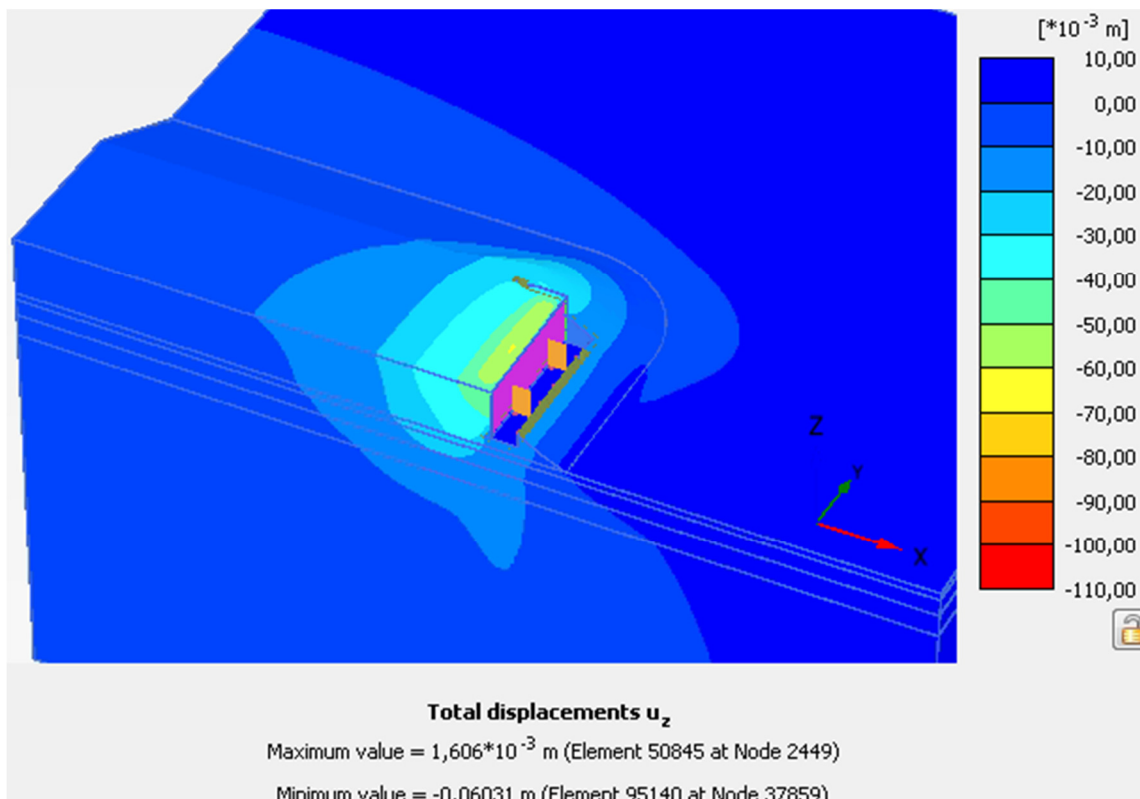
Na následujících třech obrázcích (Obrázek 5-10, Obrázek 5-11, Obrázek 5-12) jsou zobrazeny svislé deformace, které proběhly ve fázích Výstavba NK a Uvedení do provozu. Největší sednutí proběhla za rubem opěry v dosypaném násypu. Z obrázků je patrné zvýšené sednutí pod opěrou v místech, kde se nachází piloty.



Obrázek 5-10: Sedání – Uvedení do provozu – 1. varianta



Obrázek 5-11: Sedání – Uvedení do provozu – 2. varianta

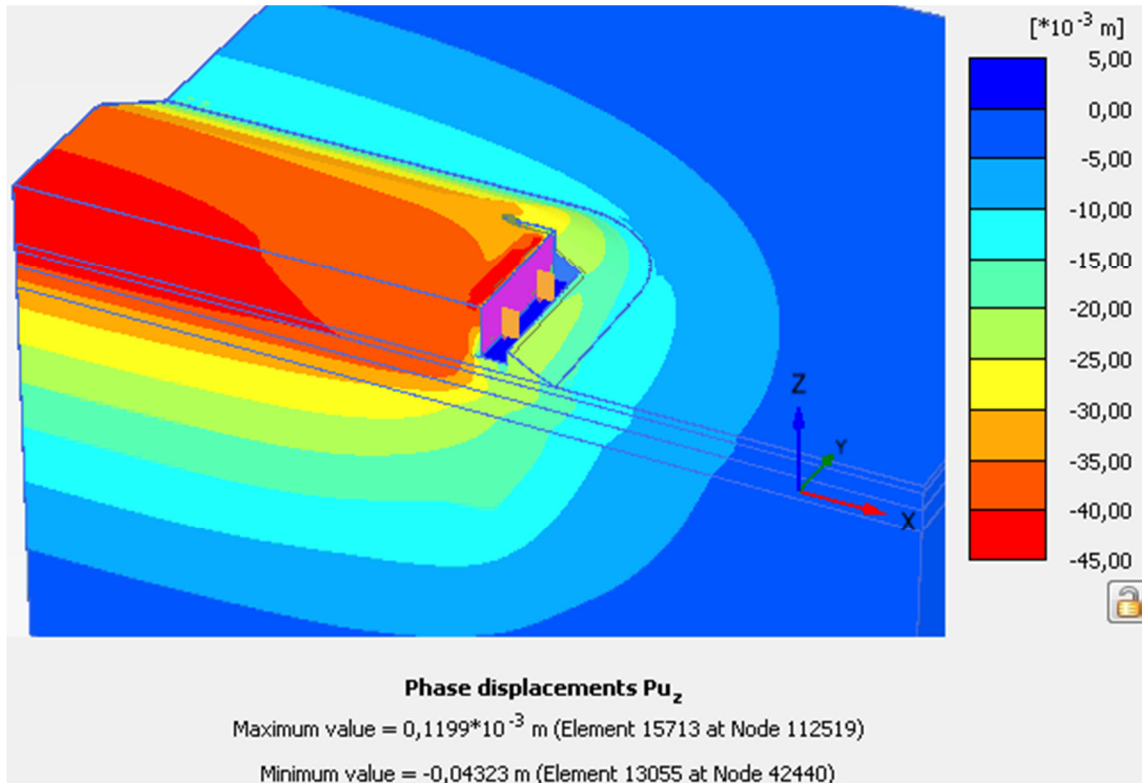


Obrázek 5-12: Sedání – Uvedení do provozu – 3. varianta

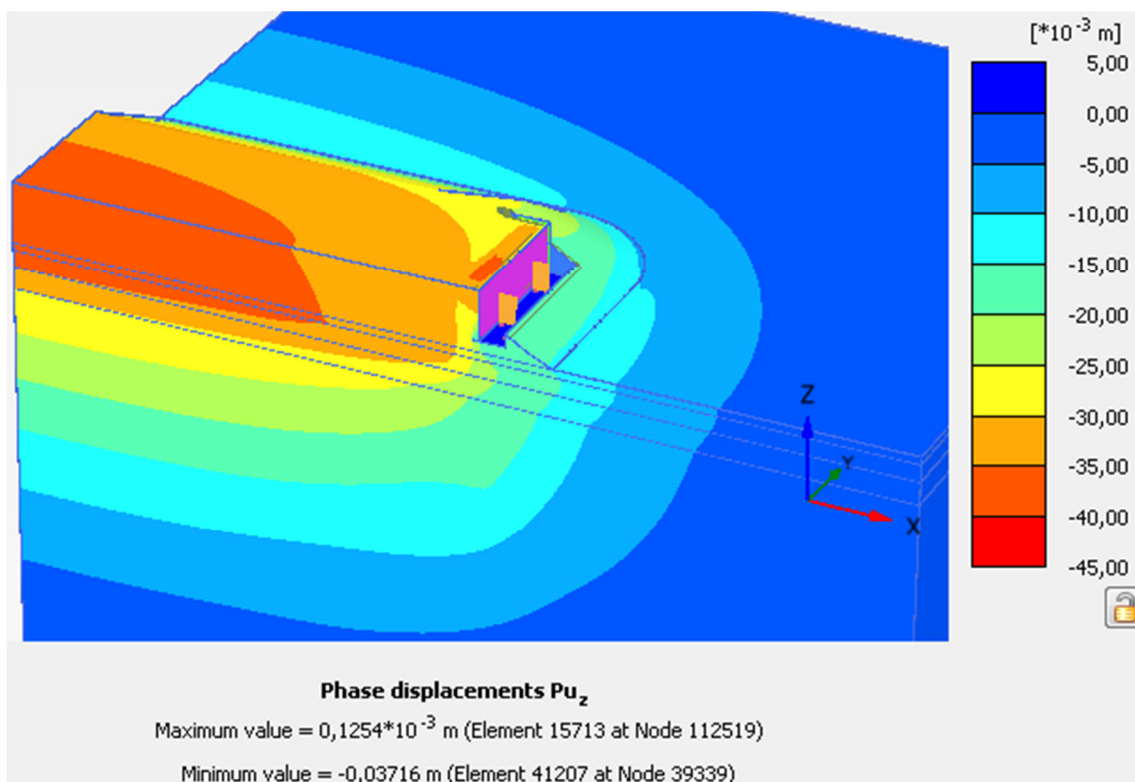


### 5.8.3 Svislé deformace – vymizení pórových tlaků

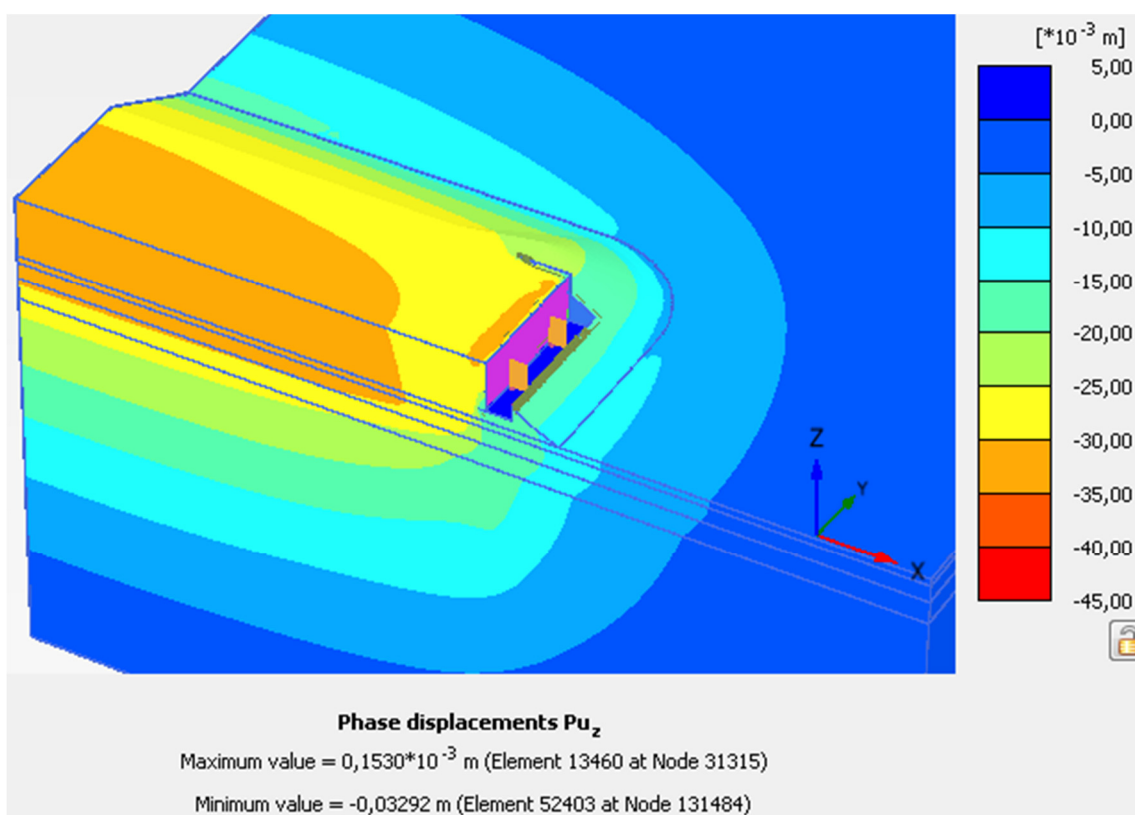
Dále následují na obrázcích (Obrázek 5-13, Obrázek 5-14, Obrázek 5-15) sednutí na konci konsolidace. Jejich hodnota byla vynulována na konci fáze Uvedení do provozu. Sedání probíhá již celkem rovnoměrně pod celým násypem a opěrou.



Obrázek 5-13: Sedání – Vymizení pórových tlaků – 1. varianta

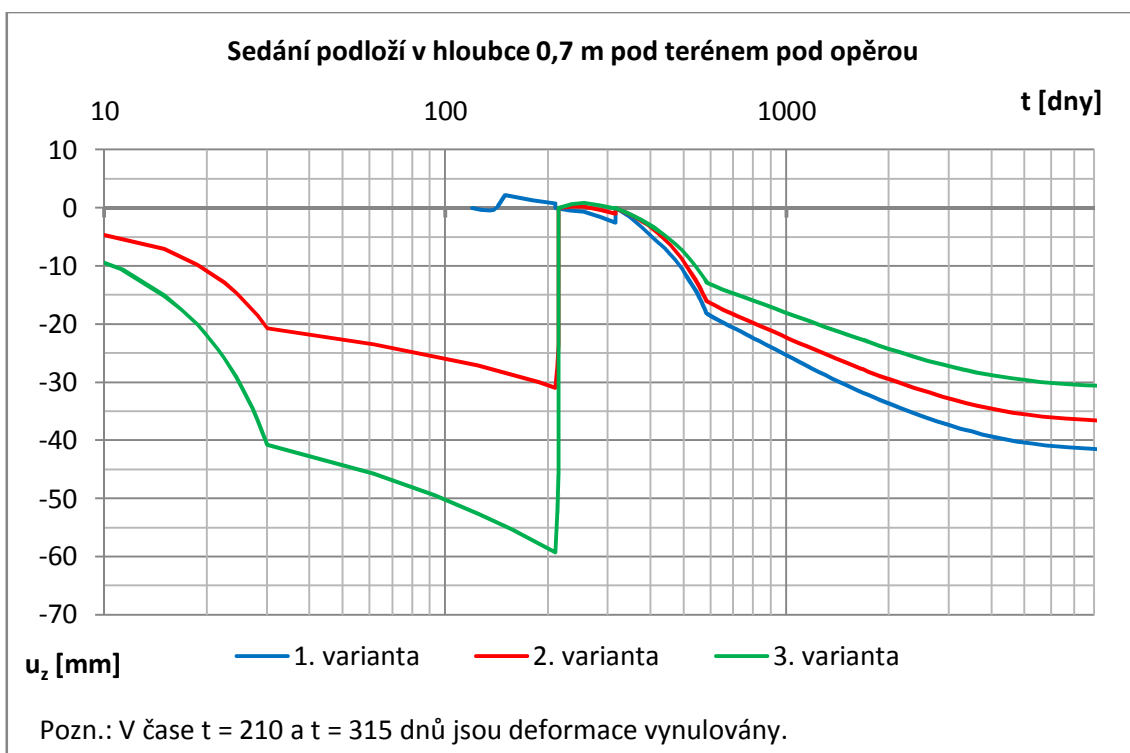


Obrázek 5-14: Sedání – Vymizení pórových tlaků – 2. varianta

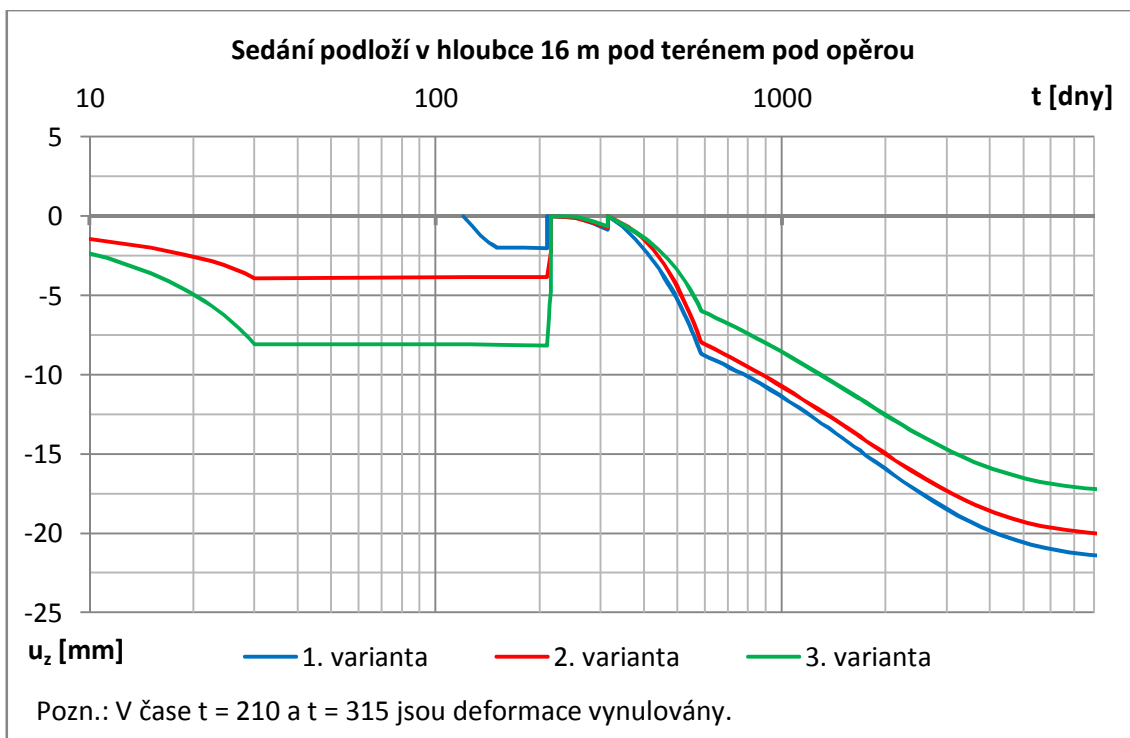


Obrázek 5-15: Sedání – Vymizení pórových tlaků – 3. varianta

Na následujících grafech (Obrázek 5-16, Obrázek 5-17) je znázorněn průběh sedání podloží v hloubce 0,7 m a v 16 m v místě opěry pro jednotlivé varianty.



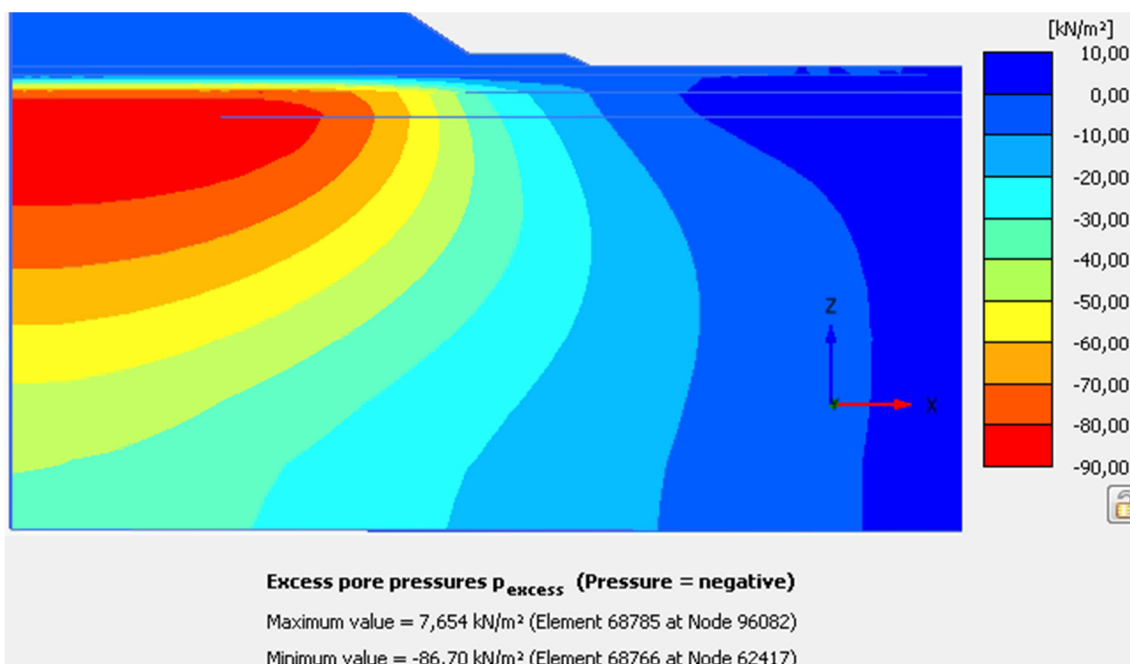
Obrázek 5-16: Sedání podloží v hloubce 0,7 m pod terénem pod opěrou



Obrázek 5-17: Sedání podloží v hloubce 16 m pod terénem pod opěrou

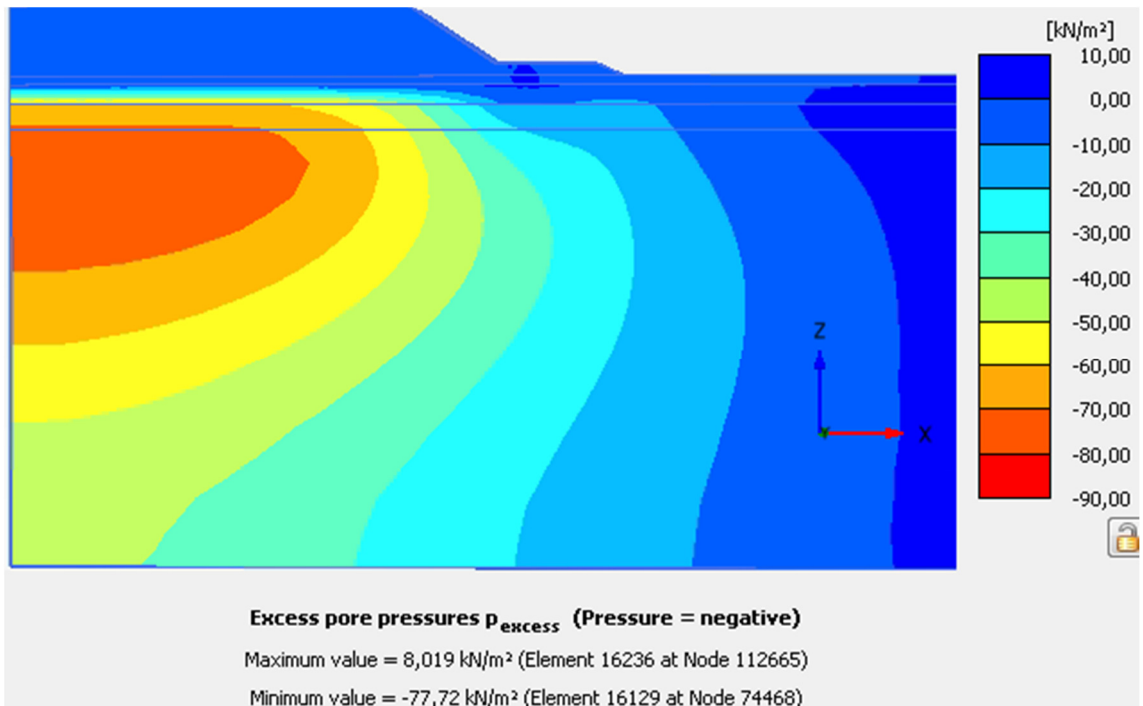
#### 5.8.4 Pórové tlaky – Vrtání pilot

Průběh konsolidace je přímo závislý na vývoji pórových tlaků v podloží. V násypu a v horní vrstvě podloží žádné nevznikají, protože jsou z propustného materiálu. Podstatný je pórový přetlak  $p_{excess}$ , který odpovídá rozdílu celkového pórového tlaku a hydrostatického tlaku od hladiny podzemní vody. Pórové tlaky jsou zobrazeny v pohledu na rovinu symetrie ( $y = 0$ ). Na následujících třech obrázcích (Obrázek 5-18, Obrázek 5-19, Obrázek 5-20) jsou zobrazeny pórové tlaky ve fázi vrtání pilot. Nejvyšších hodnot bylo dosaženo při dosypání násypu, v této fázi se již postupně šíří a zmenšují.

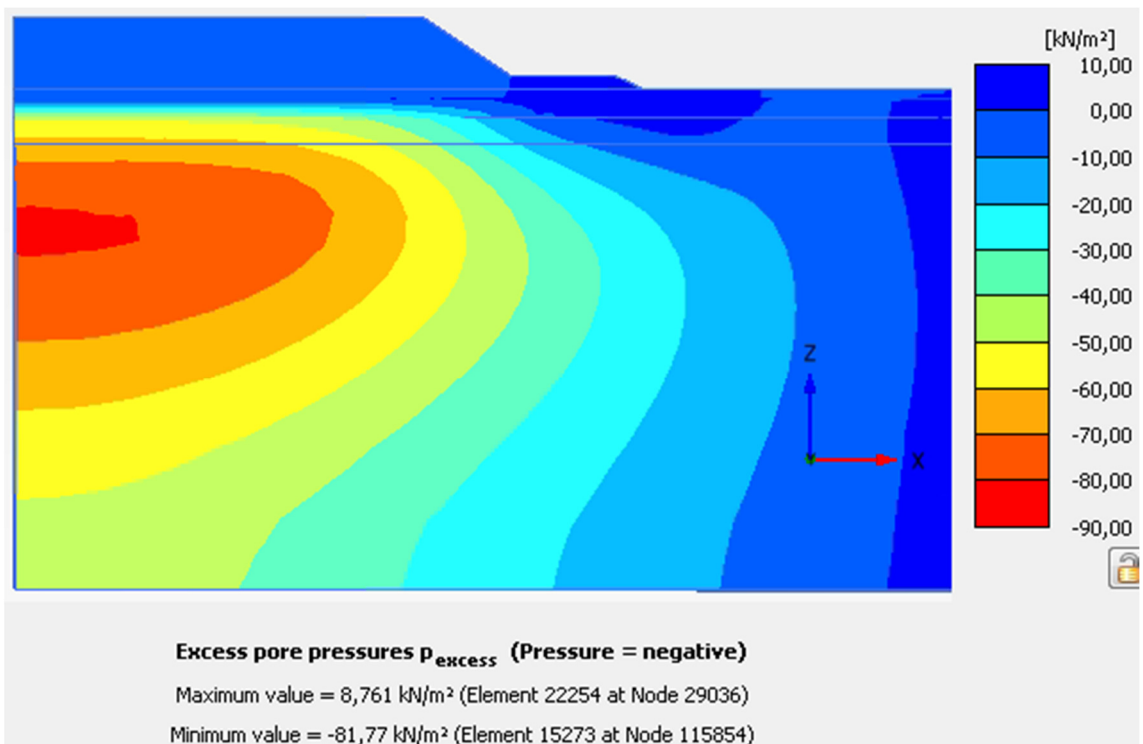


Obrázek 5-18: Pórové tlaky – Vrtání pilot – 1. varianta

U druhé a třetí varianty je maximální hodnota pórového tlaku menší než u první, protože v obou variantách bylo zatížení vneseno dříve a pórové tlaky se již zmenšily. U druhé a třetí varianty se tlaky rozprostřely do větší hloubky. Nejmenší maximální pórový tlak je překvapivě u druhé varianty, ačkoliv by se dalo očekávat, že ve třetí variantě bude menší, protože byla zatížená konsolidačním násypem, který byl později odstraněn. V hloubce 4,4 m (u druhé varianty odpovídá tlaku -70 kPa) je naopak nejnižší tlak u třetí varianty, oblast s nejvyššími hodnotami pórového tlaku se vzhledem k první a druhé variantě posunula do větší hloubky. Další zajímavý rozdíl je v oblasti budoucí opěry. U třetí varianty v hloubce 0 – 4 m se objevil kladný pórový tlak – sání. Je to způsobeno poměrně čerstvým odtěžením konsolidačního násypu a přitížením čela násypu.



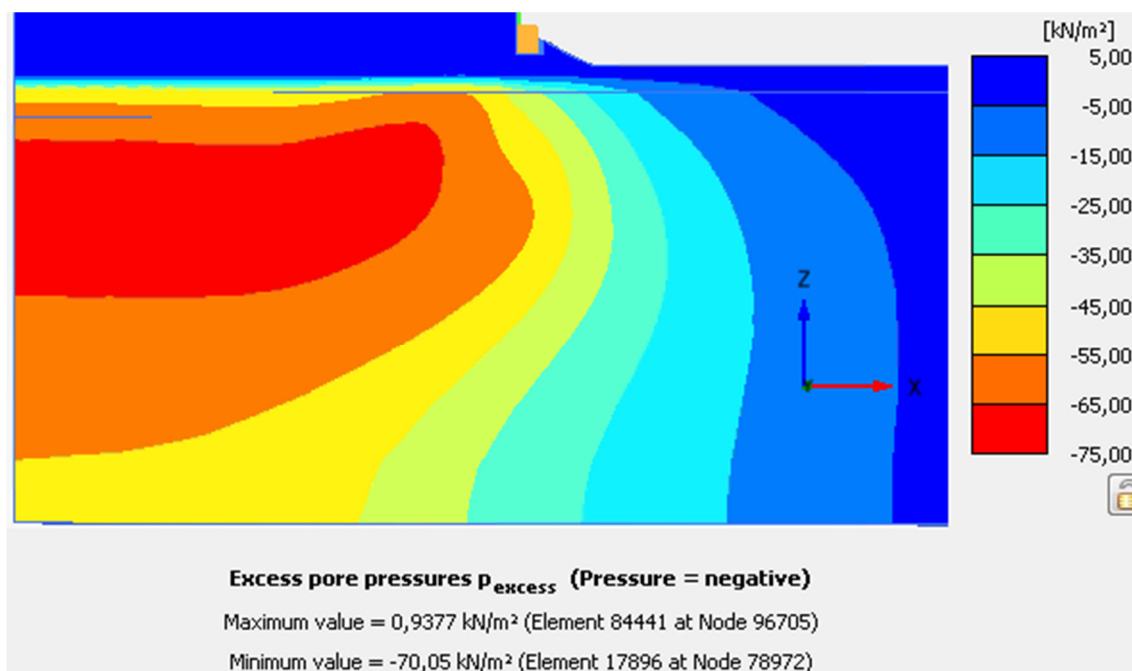
Obrázek 5-19: Pórové tlaky – Vrtání pilot – 2. varianta



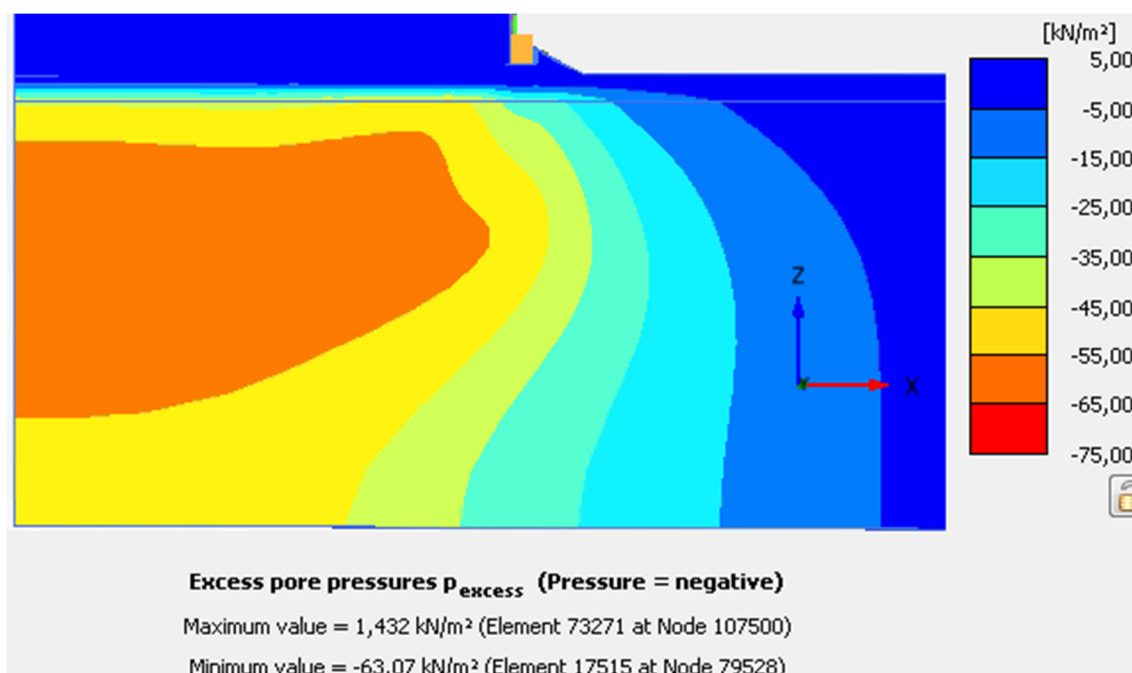
Obrázek 5-20: Pórové tlaky – Vrtání pilot – 3. varianta

### 5.8.5 Pórové tlaky – Uvedení do provozu

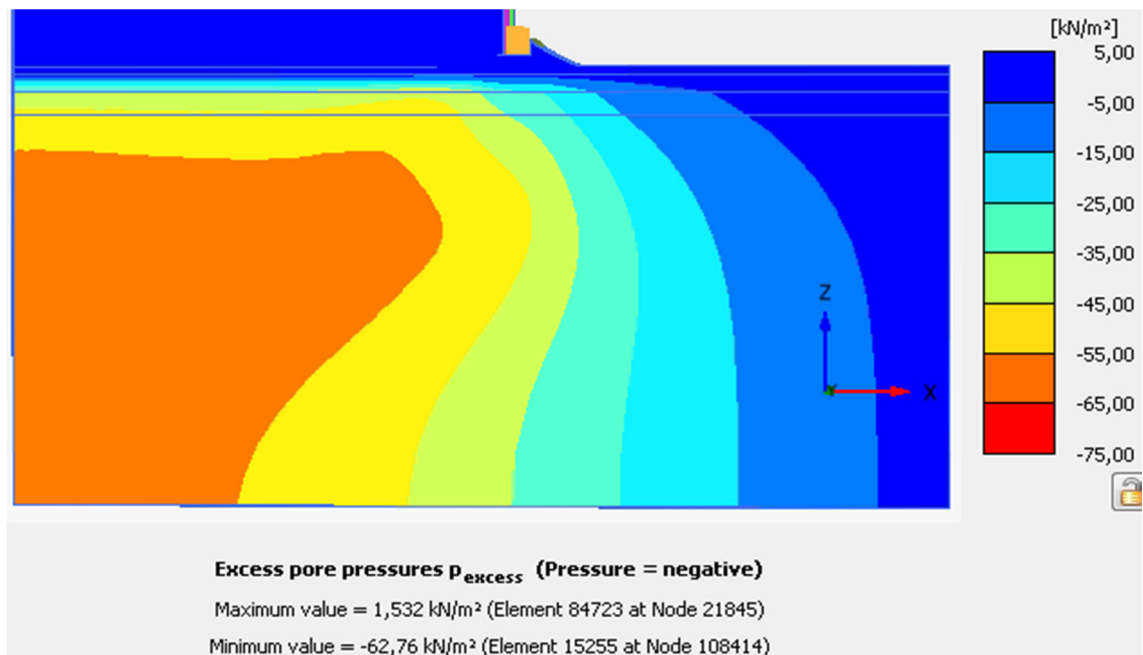
Po zasypání a zatížení opěry ve fázi Uvedení do provozu se pórové tlaky zvýší v oblasti pod opěrou. Jejich rozložení je patrné z následujících obrázků (Obrázek 5-21, Obrázek 5-22, Obrázek 5-23).



Obrázek 5-21: Pórové tlaky – Uvedení do provozu – 1. varianta

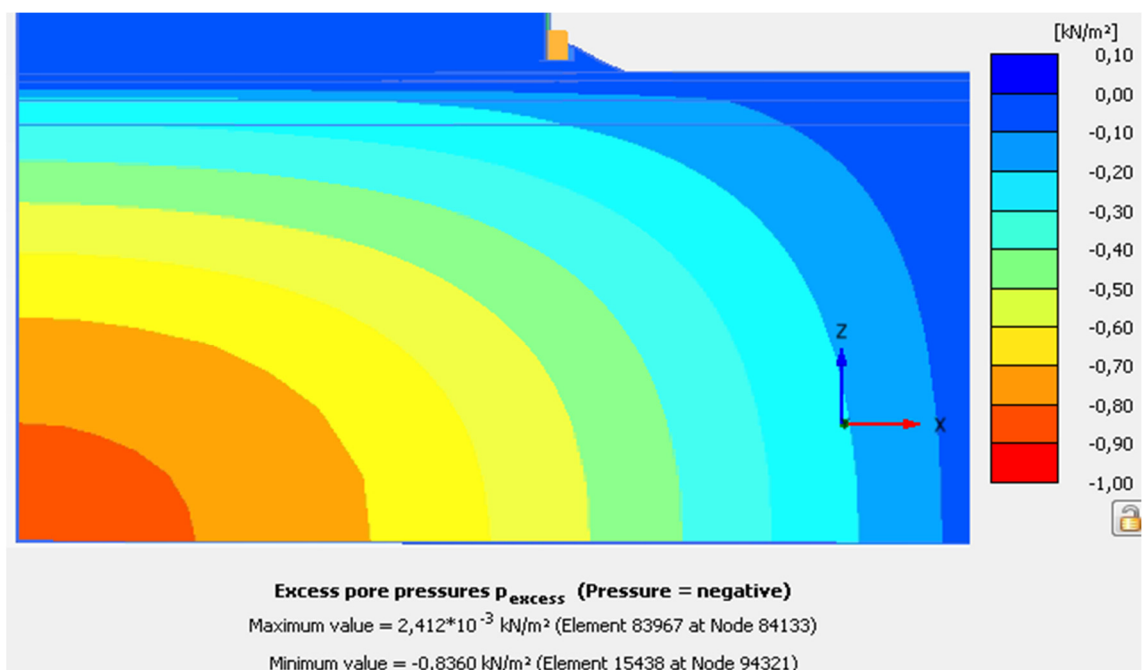


Obrázek 5-22: Pórové tlaky – Uvedení do provozu – 2. varianta



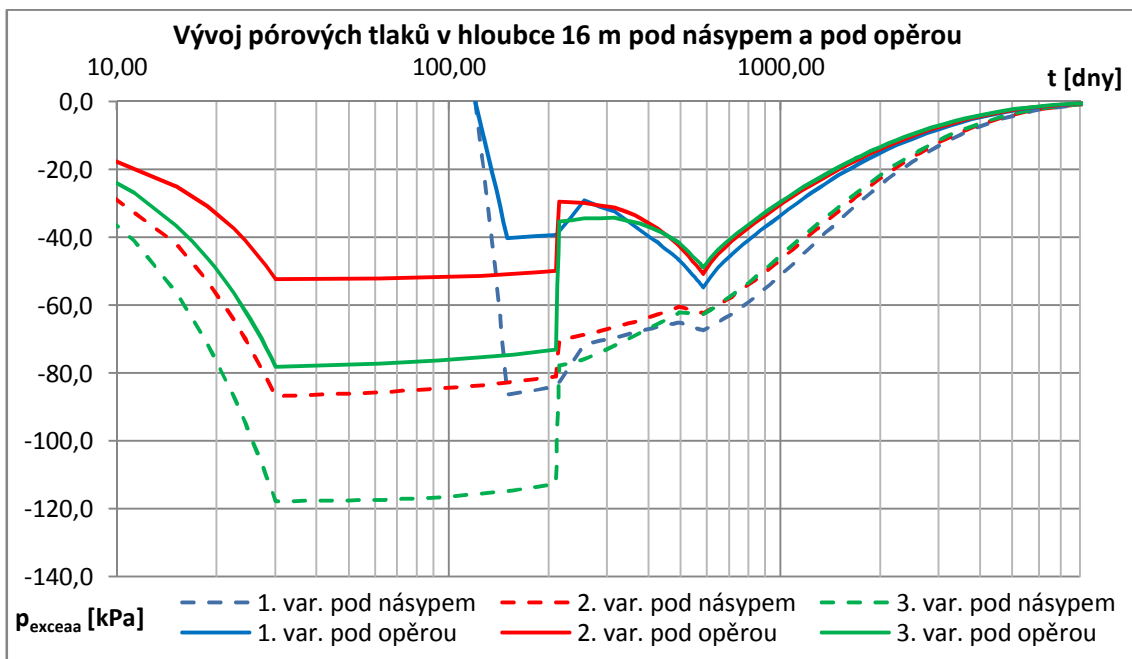
Obrázek 5-23: Pórové tlaky – Uvedení do provozu – 3. varianta

Pro poslední fázi (Vymizení pórových tlaků) vypadá rozložení pórových přetlaků u všech variant stejně (Obrázek 5-24).



Obrázek 5-24: Pórové tlaky – Vymizení pórových tlaků – všechny varianty

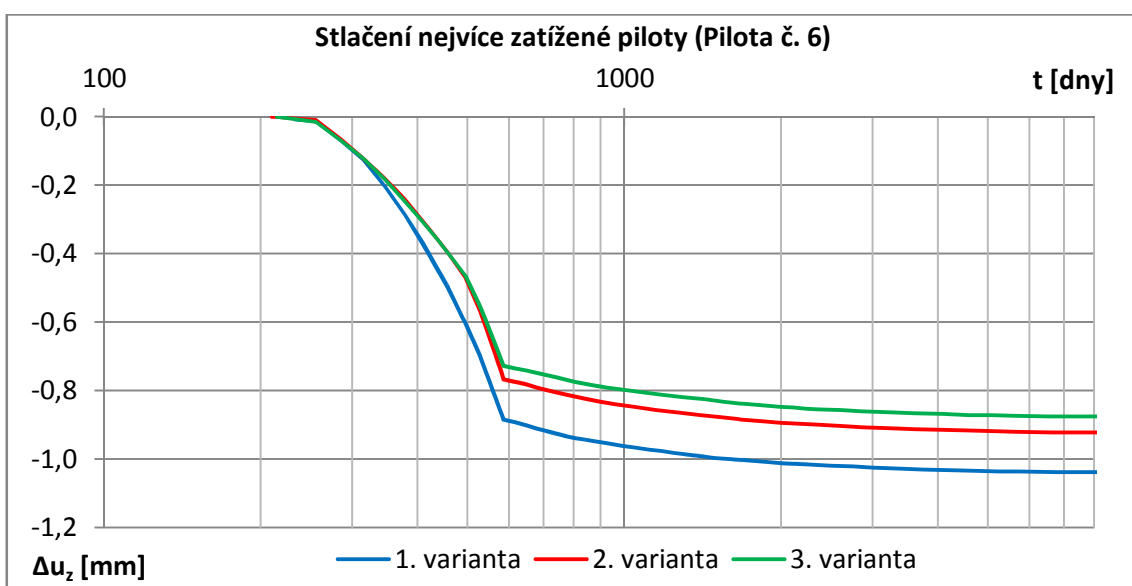
Dále následuje průběh pórových tlaků (Obrázek 5-25) v hloubce 16 m pod terénem ve dvou bodech: v rohu modelu pod násypem a pod opěrou. Oba body se nachází v rovině symetrie ( $y = 0$ ).



Obrázek 5-25: Vývoj pórových tlaků pod násypem a opěrou

### 5.8.6 Svislé deformace pilot

V následujícím grafu (Obrázek 5-26) jsou porovnané časové průběhy stlačení piloty č. 6, u které vyšla nejvyšší normálová síla. Stlačení jsem určil jako rozdíl mezi sednutím hlavy a paty piloty. Ze stlačení je možné přibližně odhadnout, v jaké fázi působí v pilotě největší normálová síla. Z výsledných hodnot stlačení je patrné, že v porovnání se sedáním pilot, které je řádově větší, je vlastní stlačení piloty zanedbatelné ve vlivu na celkové sednutí.



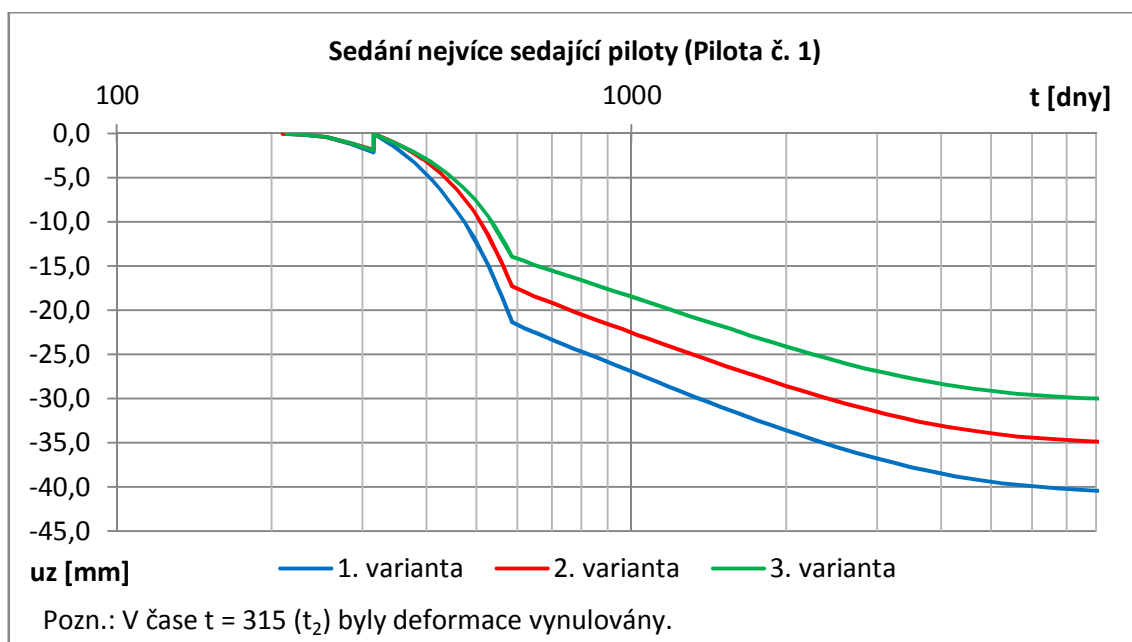
Obrázek 5-26: Časový průběh stlačení pilot



Stlačení piloty se pohybuje okolo 1,0 mm v jednotlivých variantách. Největší stlačení bylo dosaženo u první varianty. U všech variant dochází k max. stlačení po skončení konsolidace.

V následujícím grafu (Obrázek 5-27) je zobrazený časový průběh sedání piloty č. 1, která vykazuje ze všech největší sedání. Je tu zobrazeno pro jednotlivé varianty. V čase 315 dnů (začátek výstavby nosné konstrukce) bylo sedání, které v tom okamžiku dosahovalo asi 2 mm vynulováno a od tohoto momentu se určovalo celkové sedání piloty. Během dalších 270 dní se zatížení na piloty postupně zvětšovalo. Sedání pilot tedy mělo jiný průběh než po uvedení do provozu, kdy se již žádné zatížení neměnilo a další sedání pokračovalo jen z důvodu konsolidace podloží.

Největší sedání bylo dosaženo při první variantě – lehce přes 40 mm. U druhé varianty bylo dosaženo sedání 35 mm a u třetí varianty pilota č. 1 sedla nejméně – 30 mm.

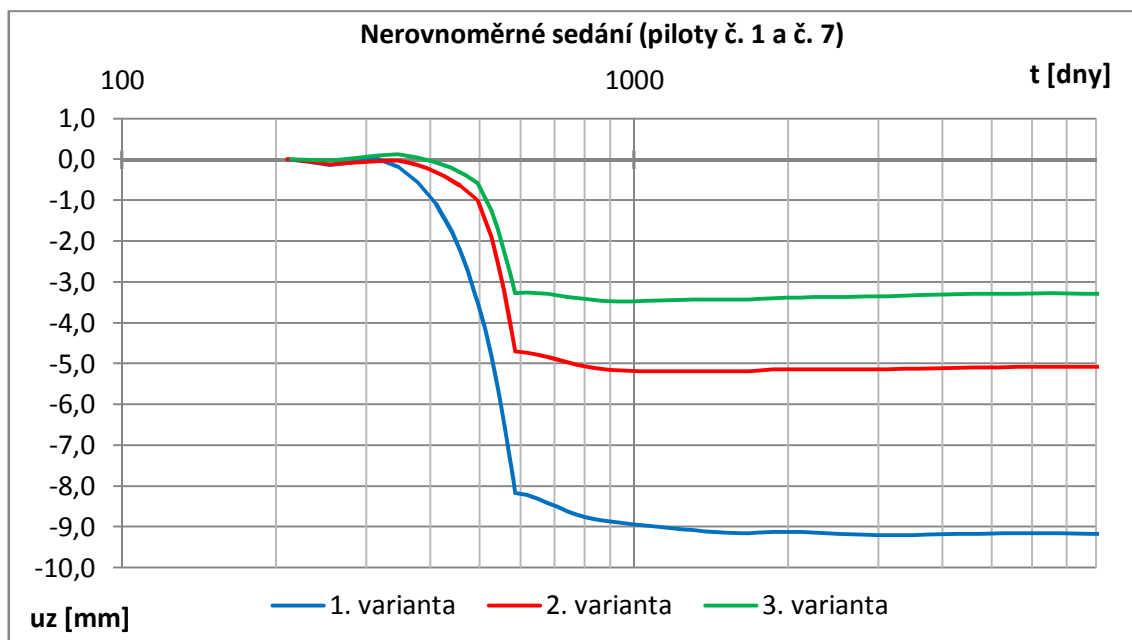


Obrázek 5-27: Sedání piloty č. 1 u jednotlivých variant v čase

### 5.8.7 Nerovnoměrné sednutí pilot

Další jev, který doba předkonsolidace ovlivňuje, je nerovnoměrné sedání opěry. Nejvíce sedá první řada pilot, protože je více zatížená, než druhá. A dále větší sedání se projevuje směrem ke středu násypu. Největší rozdíl v sednutí je tedy mezi pilotami č. 1 a č. 7 (pilota pod křídlem). V následujícím grafu (Obrázek 5-28) je zobrazeno nerovnoměrné sednutí jako rozdíl mezi sednutím hlav pilot č. 1 a č. 7. Naprostá většina nerovnoměrného sednutí se vyvine během stavby. Po uvedení do provozu se během prvního roku ještě nepatrně zvýší, potom se ustálí a

už se dále nemění. U první varianty nerovnoměrné sednutí dosahuje více jak 9 mm, pro druhou variantu je to 5 mm a pro třetí variantu je to pouze něco přes 3 mm, což je třetina oproti první variantě.

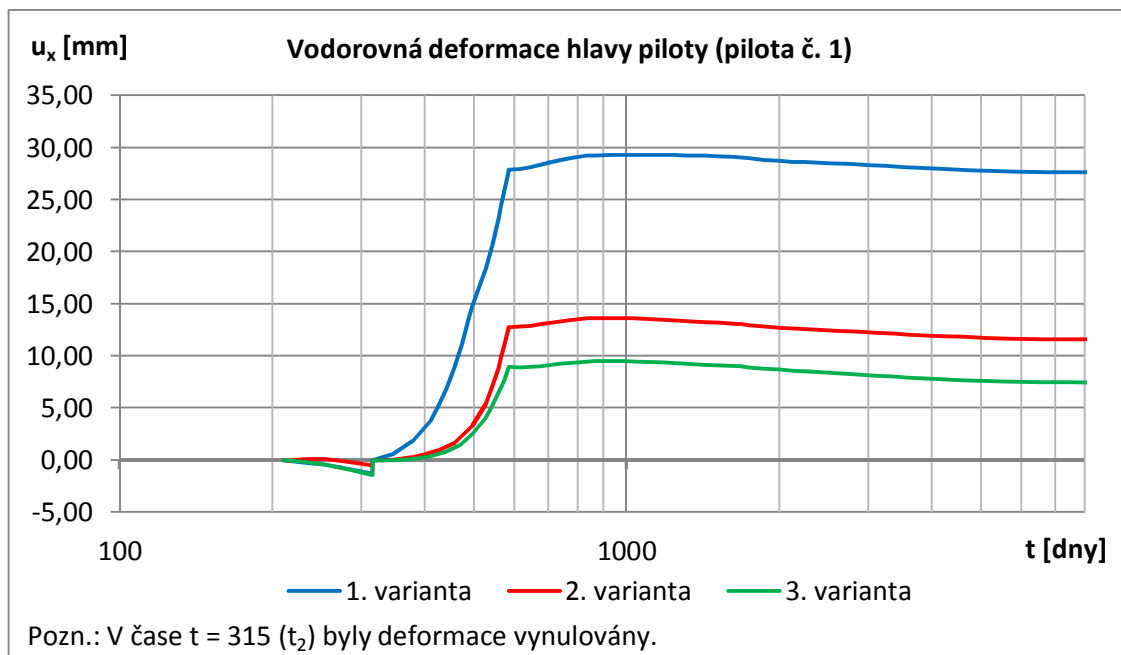


Obrázek 5-28: Nerovnoměrné sedání mezi pilotami č. 1 a č. 7

### 5.8.8 Vodorovné deformace pilot

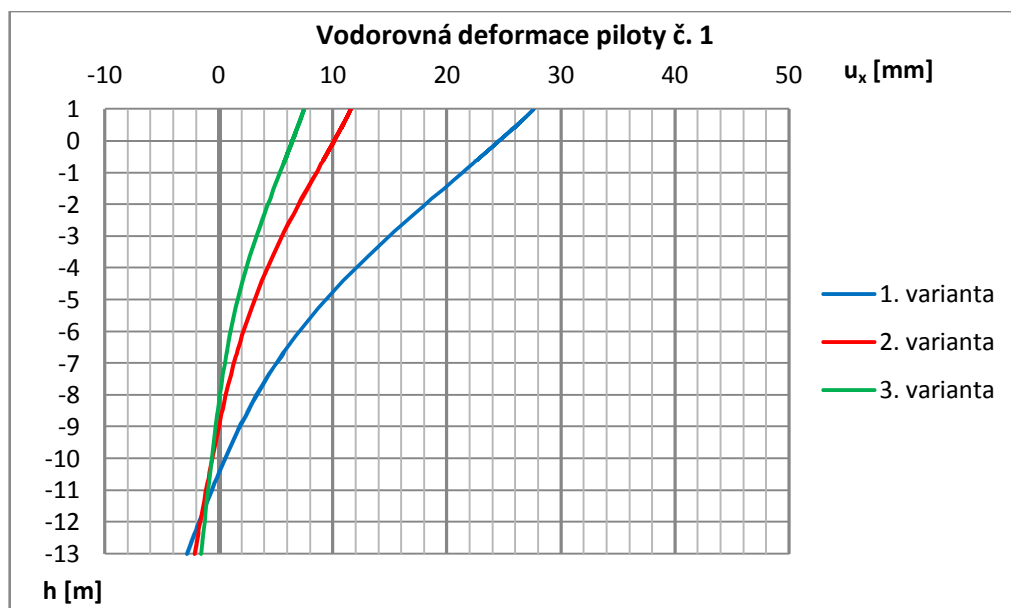
Pro vybrání vhodného způsobu výstavby nejsou podstatné jen svislé deformace (sednutí pilot) ale i vodorovné deformace pilot a z toho plynoucí vodorovné deformace opěry. Tyto deformace sice nevnáší do nosné konstrukce přídavné síly od staticky neurčitěho působení, protože u opěry je podélně posuvné uložení, ale mohou však způsobit problémy s ložisky, která nemusí být nastavena tak, aby pokryla případný posun opěry. Výpočet numerického modelu v Plaxisu ukázal, že vodorovné deformace se pro jednotlivé varianty liší poměrně významně. Průběh vodorovných deformací hlavy piloty č. 1 v čase je znázorněn v grafu na další straně (Obrázek 5-29). Tato pilota vykazovala největší vodorovné deformace. Je zajímavé, že největší deformace je dosažena přibližně v čase 950 dnů, což odpovídá jednomu roku provozu mostu. Po tomto maximálním vychýlení se hlava piloty mírně vrátí zpět.

Výrazně nejvyšší vodorovné deformace hlavy piloty se dosáhne při první variantě. Tato deformace dosahuje až 30 mm. Mezi druhou a třetí variantou již tak velký rozdíl není. Nejvýhodněji vychází 3. varianta, kde vodorovná deformace nedosahuje ani 10 mm v maximální hodnotě.



Obrázek 5-29: Vodorovné deformace hlavy piloty v čase

Na následujícím grafu (Obrázek 5-30) je zobrazen průběh vodorovné deformace piloty č. 1 po její délce v poslední výpočtové fázi – Vymizení pórových tlaků.



Obrázek 5-30: vodorovná deformace piloty č. 1 v konečné fázi

Podle předchozího grafu dojde nejenom k ohybu piloty, která je zatížena ohybovým momentem, ale také k jejímu celkovému natočení ve všech třech variantách. Dle výpočtu tedy piloty v podloží nepůsobí jako zcela vetknuté. V případě, že by byly požadovány menší vodorovné deformace u hlavy piloty, bylo by možné je částečně snížit prodloužením piloty.

## 5.8.9 Vnitřní síly pilot

### Normálové síly

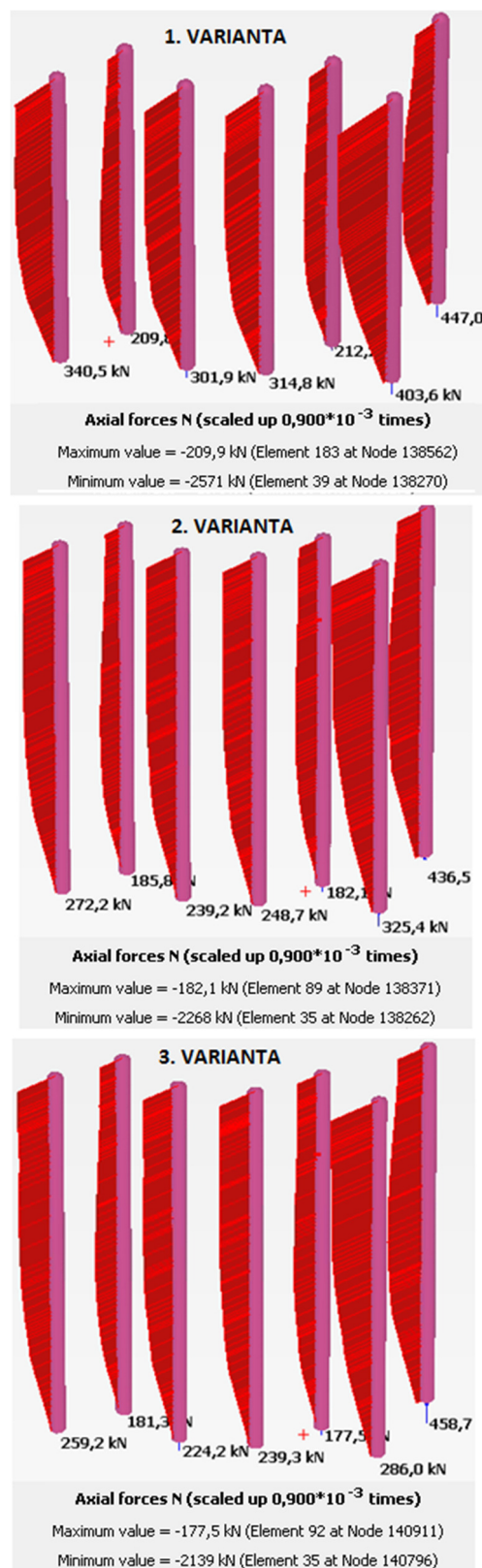
Na obrázku vpravo (Obrázek 5-31) jsou zobrazeny průběhy normálových sil v pilotách v konečné fázi. Piloty jsou zobrazeny v pohledu od čela opěry mírně z vrchu, tedy levá pilota je č. 1.

Na pilotách v zadní řadě je patrný vliv NPT, kdy normálová síla dosahuje svého maxima až ve spodní třetině výšky piloty. U zadní řady pilot je ve všech variantách přibližně podobný průběh normálové síly. Avšak v přední řadě se tato síla zmenšuje. Ve všech variantách je největší dosažená síla v pilotě č. 6. V první variantě normálová síla dosahuje 2571 kN, ve druhé se sníží na 2269 kN a ve třetí klesne na 2139 kN.

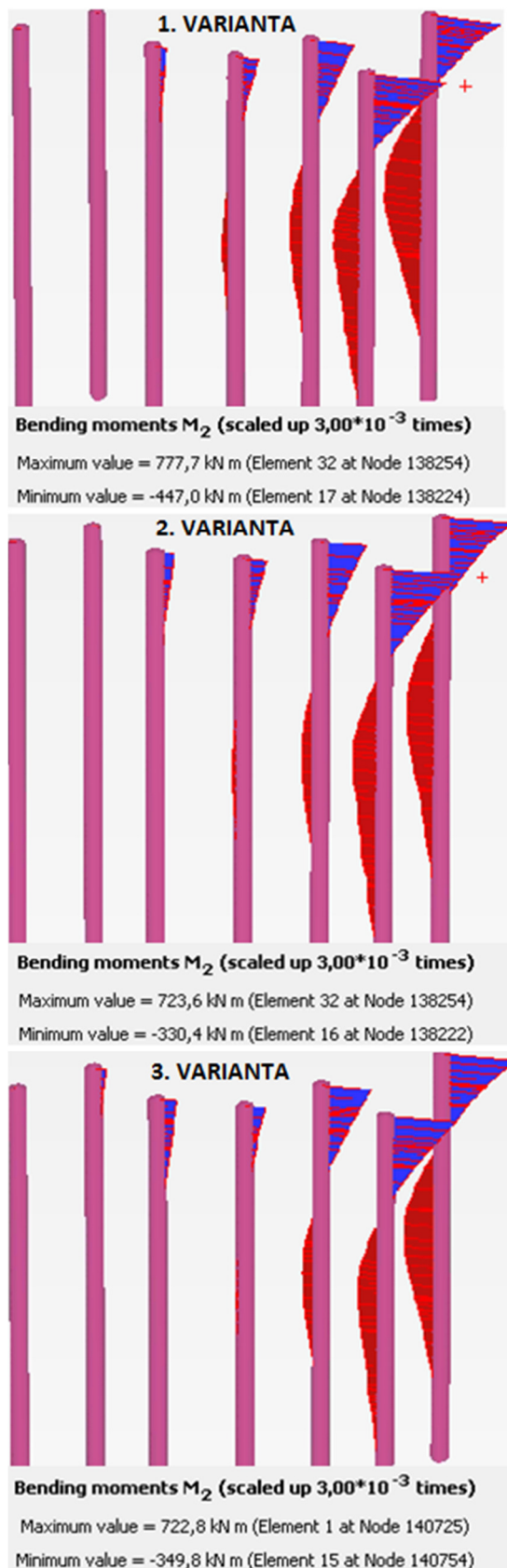
Z obrázků je také možné vyčíst, jaká síla působí na patě piloty.

Při prvním způsobu výpočtu byla vypočtená max. normálová síla v pilotě 1962 kN. Tato síla byla určovaná pro piloty č. 1 a 3. Pro tyto piloty v Plaxisu vyšly následující max. síly: 1955 kN, 1748 kN a 1674 kN pro první, druhou a třetí variantu. Tyto hodnoty se tedy celkem shodují.

Je třeba upozornit na to, že jestliže v klasickém výpočtu vyšla max. normálová síla v pilotě menší než v 3D modelu, tak to neznamená, že byla její hodnota podceněna. V 3D modelu je totiž zahrnuto i negativní plášťové tření, které se v prvním způsobu výpočtu připočítává až později.



Obrázek 5-31: Normálové síly – Vymizení pórových tlaků



Obrázek 5-32: Příčné ohybové momenty  $M_2$  – Vymizení pórových tlaků

## Ohybové momenty

V pilotách vznikají ohybové momenty v obou vodorovných směrech. V podélném směru převážně od vodorovného zatížení opěry a v příčném směru od nerovnoměrného sedání podloží a opěry.

V příčném směru jsou tyto momenty označeny jako  $M_2$ . Jsou zobrazeny pro jednotlivé varianty v konečné fázi na obrázku vlevo (Obrázek 5-32). Tento příčný moment dosahuje nejvyšších hodnot u krajních pilot. Směrem do středu se zmenšuje, až v podstatě vymizí. Největší ohybový moment byl dosažen u první varianty. U druhé naopak nejmenší. Při třetí variantě se nepatrně zvýšil oproti druhé variantě.

V podélném směru jsou ohybové momenty označeny jako  $M_3$ . Jejich průběh na jednotlivých pilotách v jednotlivých variantách v poslední fázi je zobrazen vlevo na obrázku (Obrázek 5-33).

V podélném směru jsou momenty po pilotách rozděleny rovnoměrněji než v příčném směru. O něco větší hodnoty jsou v přední řadě pilot. V této řadě pilot ale také působí větší normálová síla. Nejvyšší hodnoty ohybového momentu byly dosaženy v první variantě – 815 kNm.

V druhé variantě jsou již ohybové momenty výrazně nižší než v první, max. moment je 506 kNm. A ve třetí variantě se jejich velikost ještě trochu zmenšila na 482 kNm.

Z těchto výsledků lze vyvodit, že předkonsolidace podloží před výstavbou pilot má poměrně výrazný vliv na ohybový moment.

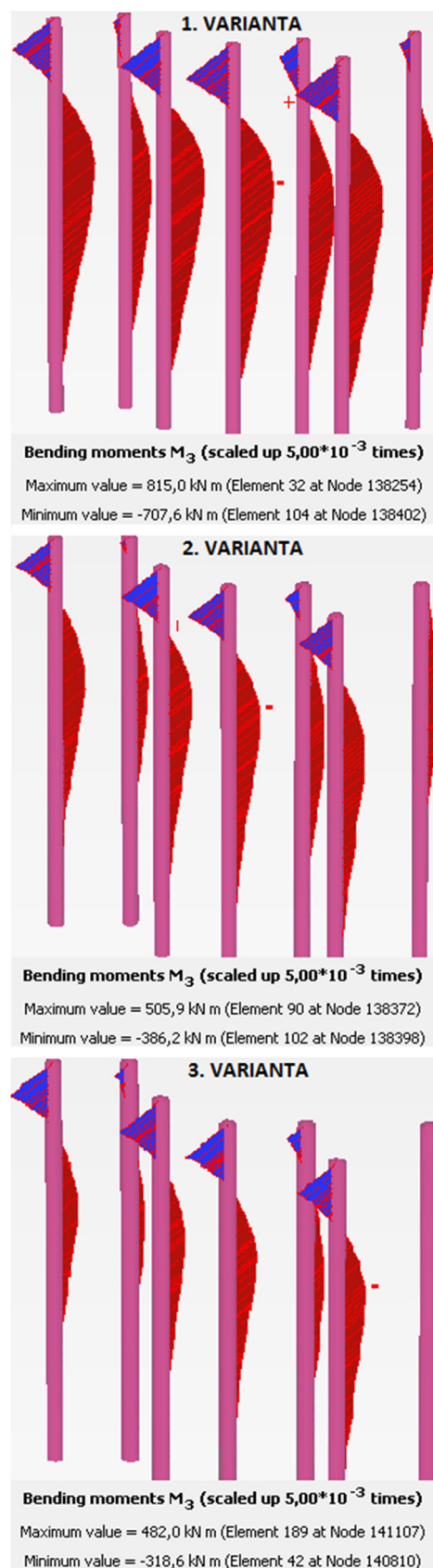
Na pilotu č. 6 působí největší ohybový moment v příčném i podélném směru. Jejich hodnoty jsou 815 kNm a 778 kNm. Působí na ni tedy největší prostorový ohyb. Protože jsou tyto hodnoty podobně veliké, tak je možné odhadnout, že max. moment působí pod úhlem  $45^\circ$ .

$$M_{max} = M_2 * \sin \alpha + M_3 * \cos \alpha$$

$$M_{max} = 815 * \sin 45^\circ + 778 * \cos 45^\circ$$

$$M_{max} = 1127 \text{ kNm}$$

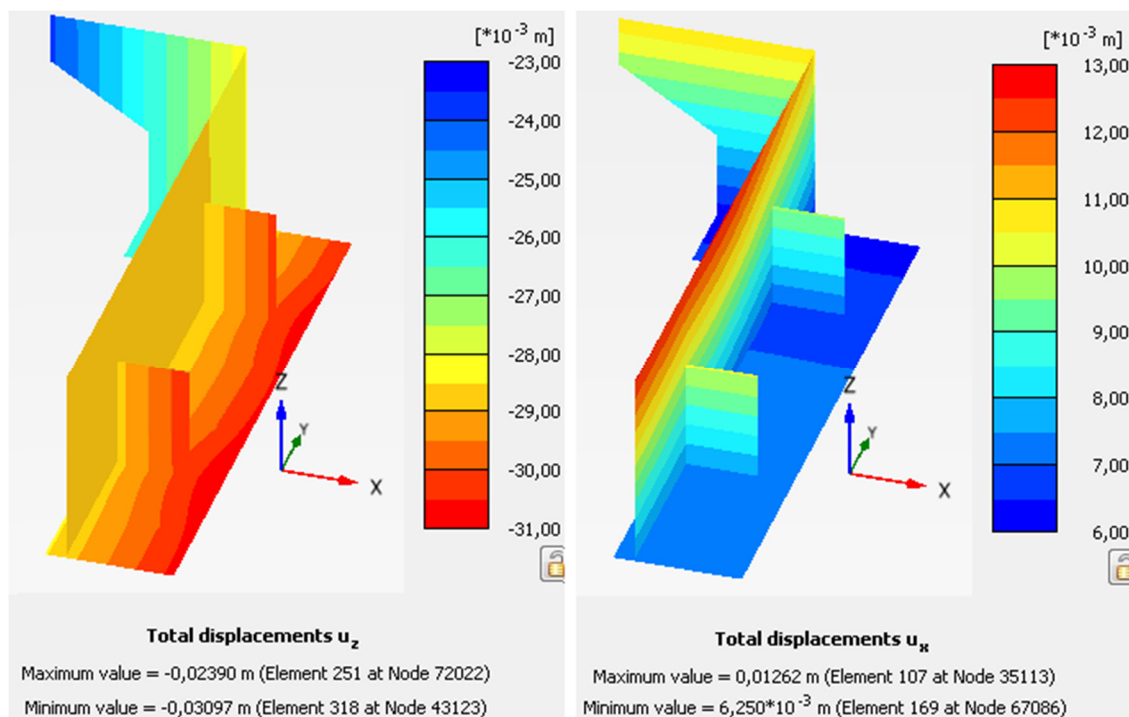
Max. moment vyšel tedy 1127 kNm. Dimenzační moment pro čistý ohyb je 1556 kNm. Tento moment tedy vyhoví s dostatečnou rezervou.



Obrázek 5-33: Podélné ohybové momenty – Vymizení pórových tlaků

### 5.8.10 Deformace opěry

Na následujícím obrázku (Obrázek 5-34) je zobrazena svislá a vodorovná deformace opěry pro konečnou fázi ve třetí variantě. Z obrázku je možné vyčíst, že opěra se vlivem zemního tlaku mírně natočila.



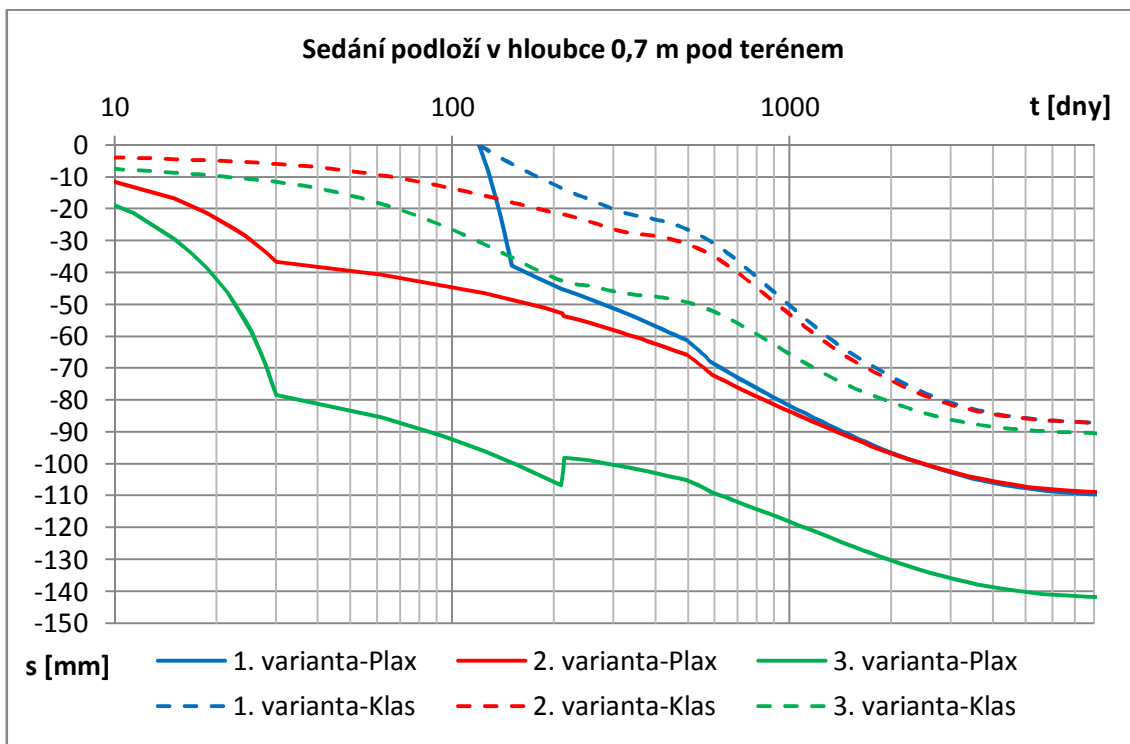
Obrázek 5-34: Deformace opěry v konečné fázi – 3. varianta

## 5.9 Porovnání výsledků klasického výpočtu a 3D modelu

### 5.9.1 Sedání podloží násypu

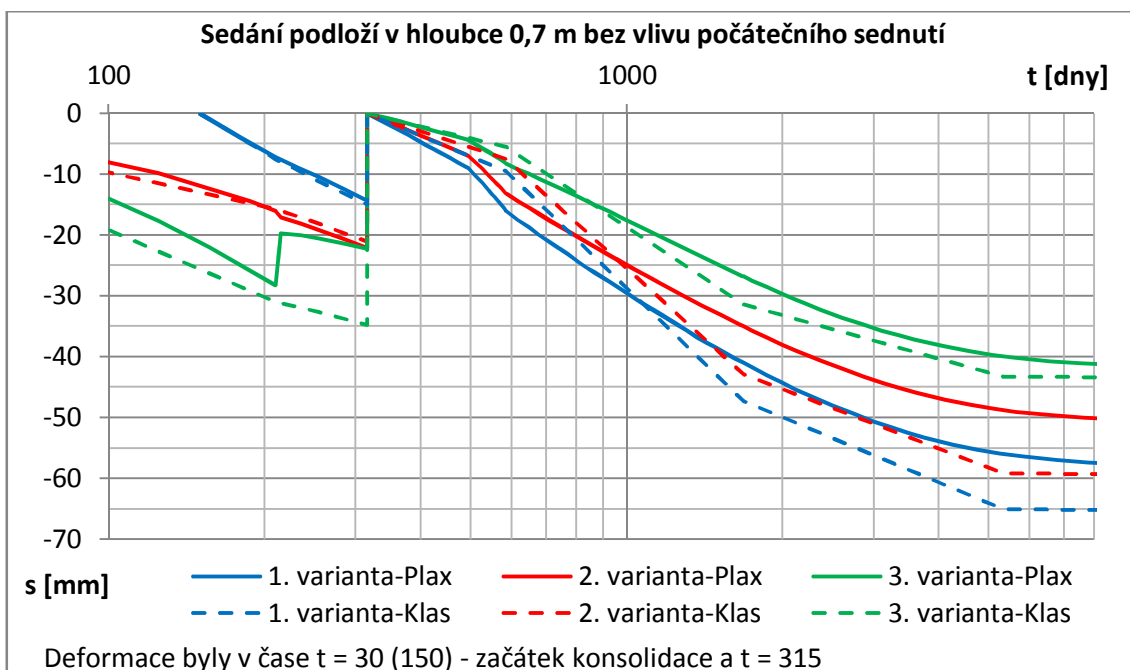
Porovnání průběhu sedání podloží během jeho konsolidace v jednotlivých variantách a pro oba způsoby výpočtu je znázorněno v následujícím grafu (Obrázek 5-35). Výrazný rozdíl mezi oběma výpočty spočívá v tom, že v prostorovém modelu nezanedbatelná část sedání proběhla již během sypání násypu. Nejvýrazněji se toto sedání projevilo u třetí varianty, kdy ve fázi sypání sedlo podloží o více než polovinu celkového sednutí. Zbytek průběhu sedání je velmi podobný pro oba způsoby. Nadzdvižení u třetí varianty 3D modelu v čase 210 dnů je způsobené odtěžením konsolidačního násypu.





Obrázek 5-35: Porovnání průběhu sedání podloží

Na následujícím grafu (Obrázek 5-36) je zobrazeno porovnání sedání podloží bez vlivu počátečního sednutí. Ve všech variantách vyšlo větší sednutí u prvního způsobu výpočtu. Nejvíce se shoduje sednutí u 3. varianty.

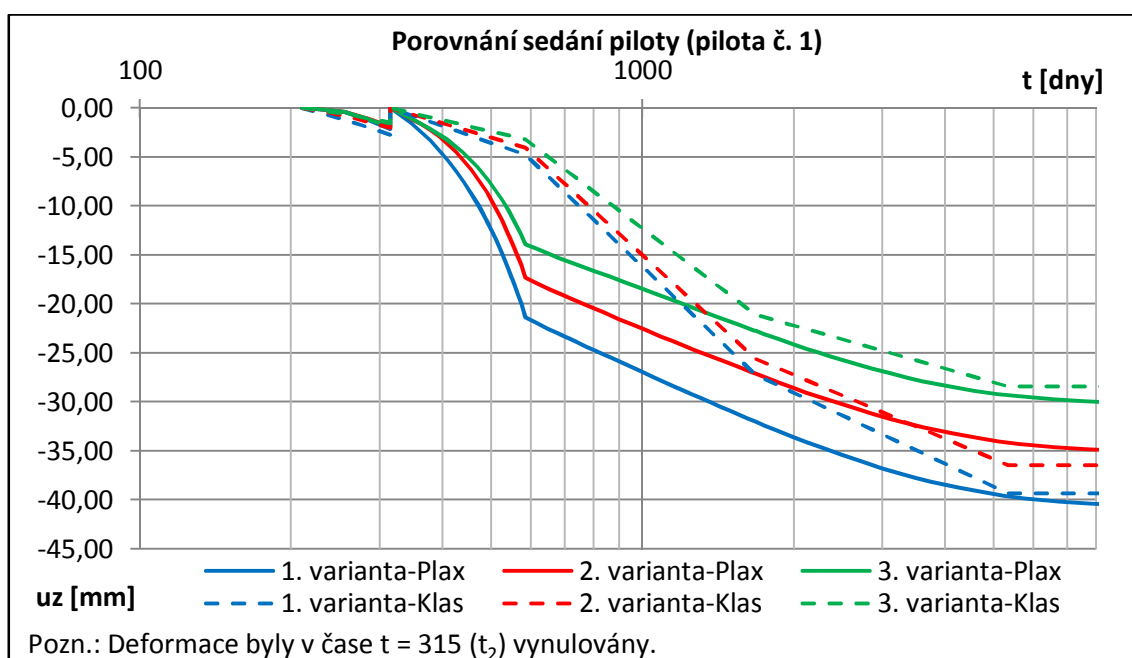


Obrázek 5-36: Porovnání průběhu sedání podloží bez vlivu počátečního sednutí



## 5.9.2 Sedání piloty

Nyní následuje porovnání časového průběhu sedání nejvíce sedající piloty č. 1 (Obrázek 5-37). Sedání je určováno od počátku výstavby nosné konstrukce. Předchozí sedání během výstavby opěry bylo vynulováno. Nejvíce se sedání liší během výstavby. Podle numerického modelu proběhne přibližně polovina sedání již během výstavby, kdežto podle klasického výpočtu to bude pouze nepatrná část. Výsledné hodnoty sedání se však již celkem shodují. Pro první a třetí variantu vyšlo menší sedání v klasickém výpočtu a pro druhou variantu v numerickém modelu.



Obrázek 5-37: Porovnání sedání piloty č. 1

V následující tabulce (Tabulka 5-8) jsou porovnány výsledné hodnoty sednutí piloty od počátku výstavby nosné konstrukce. Pro první variantu výpočtu tedy vyšlo celkové sednutí kolem 40 mm, pro druhou variantu s prodlouženou konsolidací 35 mm a pro třetí variantu s konsolidačním násypem 30 mm.

Tabulka 5-8: Porovnání výsledného sednutí piloty

| POROVNÁNÍ<br>VÝPOČTŮ | Sednutí piloty [mm] |                     | Odchylka od<br>3D modelu [%] |                     | Odchylka od 1.<br>varianty [%] |                     |
|----------------------|---------------------|---------------------|------------------------------|---------------------|--------------------------------|---------------------|
|                      | Numerický<br>model  | Klasický<br>výpočet | Numerický<br>model           | Klasický<br>výpočet | Numerický<br>model             | Klasický<br>výpočet |
| 1.                   | -40,5               | -39,5               | 100                          | 98                  | 100                            | 98                  |
| 2.                   | -34,9               | -36,6               | 100                          | 105                 | 86                             | 90                  |
| 3.                   | -30,0               | -28,5               | 100                          | 95                  | 74                             | 70                  |

## 6 ZÁVĚR

Vytváření modelu v programu Plaxis 3D bylo poměrně náročné, protože nebyly dostupné žádné příručky ani návody v češtině. Musel jsem si tedy vystačit s anglickým manuálem a instruktážními videi na webových stránkách softwaru Plaxis. Přes tyto mírné obtíže mohu říci, že jsem zadání diplomové práce splnil, a že se mi podařilo vytvořit funkční model mostní opěry a přilehlého násypu, který se choval podle očekávání a dával reálné výsledky.

Oba výpočty prokázaly podobnými výsledky, že využití konsolidačního násypu sníží nežádoucí sedání pilot a s ním související sedání mostní opěry. Ještě výrazněji se pak zmenšilo nerovnoměrné sedání a vodorovné deformace pilot. Aby však mohl být konsolidační násyp vytvořený co nejdříve po výstavbě násypu, tak by bylo nutné ověřit krátkodobou stabilitu a provést výpočet za neodvodněných podmínek, protože při rychlé výstavbě konsolidačního násypu numerický výpočet konsolidace vykazoval určité problémy se stabilitou. Vlastnosti materiálu násypu jsem určil odhadem, jeho parametry nebyly nikde přesně popsány. Před dalším výpočtem by tedy bylo vhodné přesněji určit, jaký materiál bude pro stavbu násypu použitý. Aby byl konsolidační násyp dostatečně účinný, je třeba nechat ho co nejdéle působit. Uvažovaná doba 6 měsíců se spíše blíží ke spodní hranici, kdy má konsolidační násyp smysl. O co s větším předstihem se podaří konsolidační násyp vytvořit, o to lepší výsledky pak budou dosaženy. V ideálním případě by bylo třeba přesypat nejen prostor v místě opěry, ale i její užší okolí do vzdálenosti alespoň 10 m. Eliminuje se tím tak možnost nerovnoměrného sedání, kdy by různé části podloží pod opěrou nebyly stejně zkonsolidovány.

Klasický výpočet v porovnání s numerickým modelováním obstál. Dosažené výsledky se shodovaly, odchylka nebyla u žádné varianty větší než 5 %, což je u geotechnického výpočtu více než dostačující shoda. Klasický výpočet dokáže dostatečně zahrnout do celkového sedání vliv negativního pláštového tření. Zásadní vliv na výsledné sedání má správné určení průběhu konsolidace podloží pod násypem. A to je poněkud problematické. První zdroj nepřesností spočívá ve správném určení konsolidačních parametrů (koeficient filtrace  $k$ , součinitel sedání  $c_v$ ). Další problém vzniká při striktním dodržení hloubky deformační zóny jako rozhraní mezi konsolidující vrstvou, kdy dochází k významnému nadhodnocení konsolidační doby a je tedy třeba průběh konsolidace zkorigovat. Jednou z možností je umělé snížení konsolidující

vrstvy pouze na hloubku, kde dochází ještě k významným sednutím – např. 10% celkového sednutí.

V jednotlivých variantách vyšlo sednutí opěry od 30 do 40 mm, což je poměrně hodně. Bylo by vhodné s tímto sednutím uvažovat ve statickém výpočtu mostu a ověřit, zda by toto sednutí nemohlo negativně ovlivnit únosnost mostu. V případě, že by bylo nutné toto sedání zmenšit, tak by bylo možné prodloužit piloty, aby byla jejich pata vetknutá do větší hloubky, kde poloskalní podloží nevykazuje tak velké sedání. Druhou možností, která by nebyla finančně náročnější, avšak byla by náročnější časově, je ponechání konsolidačního násypu po dobu delší než 6 měsíců. Případně by bylo možné zkombinovat oba postupy, jestliže by byly požadavky na sedání velmi přísné.

Pro další postup jsem vybral třetí variantu s konsolidačním násypem, kdy vyšlo nejmenší sedání. Fáze výstavby, konstrukce opěry a technický postup provádění pilot jsou uvedeny v příloze P1 – Technická zpráva. Přílohy P2 – P4 jsou příslušné výkresy.

## Seznam použitých zdrojů

- [1] MASOPUST, Jan. *Vrtané piloty*. Praha: Čeněk a Ježek, 1994. ISBN 8023827553.
- [2] MASOPUST, Jan. *Zakládání staveb 1*. Praha: České vysoké učení technické v Praze, 2015. ISBN 9788001058374.
- [3] MASOPUST, Jan. *Navrhování základových a pažicích konstrukcí: příručka k ČSN EN 1997*. Praha: Pro Českou komoru autorizovaných inženýrů a techniků činných ve výstavbě vydalo Informační centrum ČKAIT, 2012. ISBN 9788087438312.
- [4] VANÍČEK, Ivan. *Mechanika zemin*. Vyd. 3. přeprac. V Praze: České vysoké učení technické, 1996. ISBN 8001014371.
- [5] WEIGLOVÁ, Kamila a Věra GLISNÍKOVÁ. *Příklady: mechanika zemin a zakládání staveb pro kombinované studium*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2003. ISBN 8021425393.
- [6] BRINGGREVE, R.B.J., S. KUMARSWAMY a W.M. SWOLFS. *PLAXIS 2015: Manual*. Netherlands, c2015. ISBN ISBN-13:978-90-76016-19-1.
- [7] CHALMOVSKÝ, Juraj. *Základy matematického modelování v geotechnice s využitím programu Plaxis*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, 2014. ISBN 9788021449381.
- [8] ČSN EN 1990. *Eurokód: Zásady navrhování konstrukcí*. Praha: Český normalizační institut, 2004.
- [9] ČSN EN 1991-2. *Eurokód 1: Zatížení konstrukcí: Část 2: Zatížení mostů dopravou*. 2. dopl. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2005.
- [10] ČESKOSLOVENSKÁ STÁTNÍ NORMA ČSN 73 1001. *Zakládání staveb. Základová půda pod plošnými základy*. Praha: Český normalizační institut, 1987.
- [11] Online nápověda GEO5. *Fine* [online]. Praha [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.fine.cz/napoveda/geo5/cs/pouzivani-napovedy-01/>
- [12] Geologická mapa 1 : 50 000. *Česká geologická služba* [online]. Praha [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: [http://mapy.geology.cz/geocr\\_50/](http://mapy.geology.cz/geocr_50/)

- [13] Geoportál ČÚZK: Prohlížeč služba Esri ArcGIS Server - Geomorfologické jednotky ČR – 1998. ČÚZK [online]. Praha, c2016 [cit. 2016-11-19]. Dostupné z: [http://geoportal.cuzk.cz/\(S\(ta3w2vszpw3g4dm4ozqghc3a\)\)/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.AGS&metadataID=CZ-CUZK-AGS-GEOMORF&metadataXSL=metadata.sluzba&head\\_tab=sekce-03-gp&menu=3144](http://geoportal.cuzk.cz/(S(ta3w2vszpw3g4dm4ozqghc3a))/Default.aspx?mode=TextMeta&side=wms.AGS&metadataID=CZ-CUZK-AGS-GEOMORF&metadataXSL=metadata.sluzba&head_tab=sekce-03-gp&menu=3144)
- [14] TOWNSEND, F C, J. Brian ANDERSON a Landy RAHELISON. *Final Report: Evaluation of FEM Engineering Parameters from Insitu Tests*. United States: Florida Department of Transportation, 2001. UF Proj 4910-4504-720-12. Dostupné také z: [http://www.fdot.gov/research/Completed\\_Proj/Summary\\_STR/FDOT\\_BC354\\_14\\_rpt.pdf](http://www.fdot.gov/research/Completed_Proj/Summary_STR/FDOT_BC354_14_rpt.pdf)
- [15] ©PŘÍSPĚVATELÉ OPENSTREETMAPTREETMAP a © SEZNAM.CZ, A.S. *Mapy.cz* [online]. 2016 [cit. 2016-12-19]. Dostupné z: <https://mapy.cz/zakladni?x=15.8974832&y=50.0896157&z=12>
- [16] AF-CITYPLAN. *Podklady*
- [17] KIPROTICH, Nelson. *Modelling of negative skin friction*. Göteborg, Sweden, 2015. Master's Thesis. Chalmers university of technology. Vedoucí práce Dr. Jelke Dijkstra, Therese Hedman.
- [18] BRIAUD, J.-L. *Geotechnical Engineering: Unsaturated and saturated soils*. New York, USA: John Wiley, 2013.

## Seznam použitých zkratk a symbolů

|                                       |  |
|---------------------------------------|--|
| <b>tř.</b>                            | třída  |
| <b>MZK</b>                            | mezní zatěžovací křivka  |
| <b>OP1</b>                            | opěra 1  |
| <b>P2</b>                             | pilíř 2  |
| <b>NPT</b>                            | negativní plášťové tření   |
| <b>TS</b>                             | tandem system – dvounáprava, model zatížení LM1                      |
| <b>UDL</b>                            | uniformly distributed load – rovnoměrné zatížení, model zatížení LM1 |
| <b>MC</b>                             | Mohr-Coulomb model   |
| <b>HS</b>                             | Hardening Soil model   |
| <b><math>\partial</math></b>          | parciální derivace   |
| <b>k</b>                              | koeficient filtrace  |
| <b><math>c_v</math></b>               | součinitel konsolidace   |
| <b>T</b>                              | časový faktor  |
| <b>T</b>                              | čas  |
| <b><math>\Delta\sigma</math></b>      | totální přitížení  |
| <b><math>\Delta\sigma_{ef}</math></b> | efektivní přitížení  |
| <b><math>\Delta u</math></b>          | neutrální napětí   |
| <b><math>\Delta s_t</math></b>        | stlačení tenké vrstvičky v čase                                      |
| <b><math>s_t</math></b>               | stlačení celé vrstvy v čase  |
| <b>H</b>                              | mocnost vrstvy   |
| <b>U</b>                              | stupeň konsolidace   |
| <b>t</b>                              | čas  |
| <b>A</b>                              | plocha   |
| <b><math>E_{oed}</math></b>           | oedometrický modul   |
| <b><math>E_{def}</math></b>           | deformační modul   |
| <b><math>E_s</math></b>               | sečnový modul deformace zeminy                                       |
| <b>d</b>                              | průměr piloty  |
| <b><math>\gamma</math></b>            | objemová tíha  |
| <b><math>\gamma_{unsat}</math></b>    | objemová tíha vysušené zeminy  |
| <b><math>\gamma_{sat}</math></b>      | objemová tíha nasycené zeminy  |
| <b><math>\gamma_w</math></b>          | objemová tíha vody   |

|                |  |
|----------------|--|
| $\sigma_z$     | napětí od přitížení                                  |
| $\sigma_{or}$  | původní geostatické napětí                           |
| $m$            | součinitel strukturní pevnosti                       |
| $s$            | sedání piloty  |
| $s_y$          | sedání piloty při plné mobilizaci plášťového tření   |
| $\beta$        | přenosový koeficient                                 |
| $q_s$          | plášťové tření                                       |
| $D$            | hloubka od terénu do středu vrstvy                   |
| $R$            | zatížení piloty                                      |
| $R_{bu}$       | celková únosnost piloty při sedání $s_{25}$          |
| $R_{pu}$       | únosnost paty piloty při sedání $s_{25}$             |
| $R_{su}$       | únosnost pláště piloty                               |
| $R_y$          | zatížení piloty při plné mobilizaci plášťového tření |
| $m_1$          | koeficient podle druhu zatížení                      |
| $m_2$          | koeficient vyjadřující ochranu dřívku                |
| $q_p$          | napětí na patě                                       |
| $I$            | příčinkový koeficient sedání                         |
| $I_1$          | základní příčinkový koeficient sedání                |
| $R_k$          | korekční součinitel zohledňující tuhost piloty       |
| $G$            | tíha   |
| $M_g$          | moment od stálého zatížení                           |
| $K_0$          | součinitel klidového tlaku                           |
| $K_A$          | součinitel aktivního tlaku                           |
| $K$            | součinitel zvýšeného aktivního tlaku                 |
| $c_{ef}$       | koheze efektivní                                     |
| $\varphi_{ef}$ | úhel vnitřního tření efektivní                       |
| $\delta$       | úhel tření v zemině                                  |
| $\psi$         | úhel dilatance                                       |
| $S$            | zemní tlak   |
| $S_v$          | svislá složka zemního tlaku                          |
| $S_h$          | vodorovná složka zemního tlaku                       |
| $M_s$          | moment od zemního tlaku                              |
| $q$            | rovnoměrné plošně zatížení dopravou                  |

|                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <b>Q</b>                          | zatížení dvounápravou   |
| <b><math>k_h</math></b>           | modul reakce podloží  |
| <b><math>c_{h,lin}</math></b>     | tuhost lineární pružné podpory                                  |
| <b>C</b>                          | pérová konstanta  |
| <b>u</b>                          | poissonovo číslo  |
| <b><math>R_{inter}</math></b>     | součinitel drsnosti pro <i>Interface</i>                        |
| <b><math>u_{ur}</math></b>        | poissonovo číslo pro odtížení a znovuzatížení                   |
| <b><math>E_{50}^{ref}</math></b>  | sečnový modul z triaxiální zkoušky                              |
| <b><math>E_{oed}^{ref}</math></b> | tečnový oedometrický modul                                      |
| <b><math>E_{ur}^{ref}</math></b>  | modul pružnosti při odtížení a opětovném přitížení              |
| <b>m</b>                          | exponent řídící závislost deformačních charakteristik na napětí |
| <b><math>T_{i,max}</math></b>     | max. plášťové tření   |
| <b><math>F_{max}</math></b>       | max. síla na patě   |
| <b><math>p_{excess}</math></b>    | pórový přetlak  |
| <b><math>u_x</math></b>           | vodorovná podélná deformace                                     |
| <b><math>u_z</math></b>           | svislá deformace  |
| <b>N</b>                          | normálová síla  |
| <b><math>M_2</math></b>           | ohybový moment v příčném směru – $M_x$                          |
| <b><math>M_3</math></b>           | ohybový moment v podélném směru – $M_y$                         |



## Seznam použitých obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 2-1: Izochrona v čase [4] .....  | 6  |
| Obrázek 2-2: Graf závislosti stupně konsolidace na časovém faktoru [5].....                                | 7  |
| Obrázek 2-3: (a)neutrální bod, (b) sedání piloty a podloží,(c) pilota bez NPT, (d) pilota s NPT [18] ..... | 10 |
| Obrázek 3-1: Mapa s plánovanou trasou dálnice D35 [15] .....   | 11 |
| Obrázek 3-2: Letecký pohled na místo stavby [16] .....   | 12 |
| Obrázek 3-3: Půdorys .....   | 13 |
| Obrázek 3-4: Charakteristický podélný řez.....   | 13 |
| Obrázek 3-5: Půdorys levé části opěry OP1.....   | 14 |
| Obrázek 4-1: Mezní zatěžovací křivka piloty [1] .....  | 19 |
| Obrázek 4-2: Schéma piloty ve vrstevnaté zemině [1].....   | 19 |
| Obrázek 4-3: Geometrie násypu .....  | 22 |
| Obrázek 4-4: Geometrie násypu s konsolidačním násypem.....   | 22 |
| Obrázek 4-5: Celkové sednutí ve variantě 1 .....   | 25 |
| Obrázek 4-6: Sedání podloží ve fázi vrtání pilot v čase $t_0$ pro 3. variantu .....                        | 27 |
| Obrázek 4-7: Graf stupňů konsolidace pro jednotlivé varianty .....   | 28 |
| Obrázek 4-8: Řez a půdorys výpočetního modelu opěry .....  | 29 |
| Obrázek 4-9: Model zatížení 1 pro globální ověření [9] .....   | 32 |
| Obrázek 4-10: Roznášecí délka v polovině výšky opěry .....   | 32 |
| Obrázek 4-11: Mezní zatěžovací křivka piloty .....   | 37 |
| Obrázek 4-12: Výstupy ze SCIA Engineer 5. fáze.....  | 39 |
| Obrázek 4-13: Kombinační rovnice pro MSÚ [8] .....   | 42 |
| Obrázek 4-14: Vnitřní síly pro MSÚ.....  | 43 |
| Obrázek 4-15: Interakční diagram piloty.....   | 45 |
| Obrázek 5-1: Tvar dokončeného násypu s opěrou .....  | 46 |
| Obrázek 5-2: Detail opěry s plošným zatížením.....   | 51 |
| Obrázek 5-3: 1. variantu v 1. fázi – Konsolidace a pro všechny varianty ve 2. fázi – Piloty.....           | 55 |
| Obrázek 5-4: 2. varianta v 1. fázi s dosypaným násypem do jedné roviny.....                                | 55 |
| Obrázek 5-5: 3. Varianta v 1. fázi – konsolidační násyp s přitížením čela násypu .....                     | 55 |
| Obrázek 5-6: Model s vytvořenou sítí konečných prvků .....   | 57 |
| Obrázek 5-7: Sedání – Konsolidace násypu – 1. varianta .....   | 58 |

|   |    |
|---|----|
| Obrázek 5-8: Sedání – Konsolidace násypu – 2. varianta .....                      | 59 |
| Obrázek 5-9: Sedání – Konsolidace násypu – 3. varianta .....                      | 59 |
| Obrázek 5-10: Sedání – Uvedení do provozu – 1. varianta .....                     | 60 |
| Obrázek 5-11: Sedání – Uvedení do provozu – 2. varianta .....                     | 61 |
| Obrázek 5-12: Sedání – Uvedení do provozu – 3. varianta .....                     | 61 |
| Obrázek 5-13: Sedání – Vymizení pórových tlaků – 1. varianta.....                 | 62 |
| Obrázek 5-14: Sedání – Vymizení pórových tlaků – 2. varianta.....                 | 63 |
| Obrázek 5-15: Sedání – Vymizení pórových tlaků – 3. varianta.....                 | 63 |
| Obrázek 5-16: Sedání podloží v hloubce 0,7 m pod terénem pod opěrou .....         | 64 |
| Obrázek 5-17: Sedání podloží v hloubce 16 m pod terénem pod opěrou .....          | 64 |
| Obrázek 5-18: Pórové tlaky – Vrtání pilot – 1. varianta .....                     | 65 |
| Obrázek 5-19: Pórové tlaky – Vrtání pilot – 2. varianta .....                     | 66 |
| Obrázek 5-20: Pórové tlaky – Vrtání pilot – 3. varianta .....                     | 66 |
| Obrázek 5-21: Pórové tlaky – Uvedení do provozu – 1. varianta .....               | 67 |
| Obrázek 5-22: Pórové tlaky – Uvedení do provozu – 2. varianta .....               | 67 |
| Obrázek 5-23: Pórové tlaky – Uvedení do provozu – 3. varianta .....               | 68 |
| Obrázek 5-24: Pórové tlaky – Vymizení pórových tlaků – všechny varianty .....     | 68 |
| Obrázek 5-25: Vývoj pórových tlaků pod násypem a opěrou.....                      | 69 |
| Obrázek 5-26: Časový průběh stlačení pilot .....                                  | 69 |
| Obrázek 5-27: Sedání piloty č. 1 u jednotlivých variant v čase.....               | 70 |
| Obrázek 5-28: Nerovnoměrné sedání mezi pilotami č. 1 a č. 7 .....                 | 71 |
| Obrázek 5-29: Vodorovné deformace hlavy piloty v čase.....                        | 72 |
| Obrázek 5-30: vodorovná deformace piloty č. 1 v konečné fázi.....                 | 72 |
| Obrázek 5-31: Normálové síly – Vymizení pórových tlaků .....                      | 73 |
| Obrázek 5-32: Příčné ohybové momenty $M_2$ – Vymizení pórových tlaků.....         | 74 |
| Obrázek 5-33: Podélné ohybové momenty – Vymizení pórových tlaků .....             | 75 |
| Obrázek 5-34: Deformace opěry v konečné fázi – 3. varianta.....                   | 76 |
| Obrázek 5-35: Porovnání průběhu sedání podloží.....                               | 77 |
| Obrázek 5-36: Porovnání průběhu sedání podloží bez vlivu počátečního sednutí..... | 77 |
| Obrázek 5-37: Porovnání sedání piloty č. 1 .....                                  | 78 |

## Seznam použitých tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 3-1: Geotechnický profil .....   | 15 |
| Tabulka 4-1: Fáze výstavby – klasický výpočet .....  | 17 |
| Tabulka 4-2: Geotechnický profil – klasický výpočet .....  | 23 |
| Tabulka 4-3: Vstupní parametry zemin .....   | 24 |
| Tabulka 4-4: Průběh sedání podloží násypu v jednotlivých fázích pro 1. variantu .....            | 26 |
| Tabulka 4-5: Průběh sedání podloží násypu v jednotlivých fázích pro 2. variantu .....            | 26 |
| Tabulka 4-6: Průběh sedání podloží násypu v jednotlivých fázích pro 3. variantu .....            | 28 |
| Tabulka 4-7: Charakteristické hodnoty zatížení pro LM1 [9].....                                  | 32 |
| Tabulka 4-8: Hodnoty regulačních součinitelů $\alpha$ pro ČR [9] .....                           | 32 |
| Tabulka 4-9: Roznos zatížení v polovině výšky opěry.....   | 33 |
| Tabulka 4-10: Zatížení vnitřního úseku základové spáry opěry .....                               | 34 |
| Tabulka 4-11: Fáze výstavby a vnášení zatížení.....  | 35 |
| Tabulka 4-12: Určení příčinkového koeficientu sedání I .....                                     | 35 |
| Tabulka 4-13: Parametry pro výpočet MZK.....   | 36 |
| Tabulka 4-14: Stanovení konstant lineárně pružného uložení .....                                 | 38 |
| Tabulka 4-15: Vnitřní síly v pilotách .....  | 39 |
| Tabulka 4-16: Určení negativního plášťového tření pro 6. fázi (3 roky provozu) v 1. variantě ... | 40 |
| Tabulka 4-17: Zatížení působící v nejvíce zatížené pilotě.....                                   | 40 |
| Tabulka 4-18: Výsledné sedání piloty v jednotlivých variantách .....                             | 41 |
| Tabulka 4-19: Kombinace zatížení MSÚ pro $M_{max}$ .....   | 42 |
| Tabulka 4-20: Návrhové vnitřní síly.....   | 43 |
| Tabulka 4-21: Posouzení max. ohybu a max. smyku ve spodní části piloty .....                     | 45 |
| Tabulka 4-22: Posouzení max. smyku u hlavy piloty.....   | 45 |
| Tabulka 5-1: Přepočítání koeficientu filtrace .....  | 47 |
| Tabulka 5-2: Parametry zemin pro HS model.....   | 48 |
| Tabulka 5-3: Parametry piloty – prvek typu embedded beam.....                                    | 50 |
| Tabulka 5-4: Parametry opěry – prvek typu plate .....  | 50 |
| Tabulka 5-5: Přepočítání plášťového tření .....  | 52 |
| Tabulka 5-6: Převod síly z ložisek na náhradní plošné zatížení.....                              | 53 |
| Tabulka 5-7: Fáze výstavby – 3D numerický model .....  | 54 |
| Tabulka 5-8: Porovnání výsledného sednutí piloty.....  | 78 |

## **Seznam příloh**

- 1) Technická zpráva
- 2) Podélný řez mostu
- 3) Výkres tvaru opěry
- 4) Tvar a výztuž pilot
- 5) Vrt J1292
- 6) Geotechnický pasport
- 7) Reakce z ložisek