

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

ŠTĚRKOVÉ PILÍŘE - VÝZNAM KLENBOVÉHO EFEKTU

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

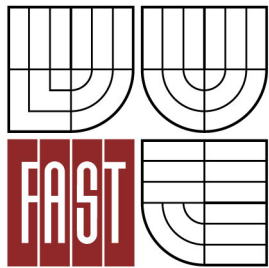
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PETER VANKO

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STAVEBNÍ
ÚSTAV GEOTECHNIKY

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING
INSTITUTE OF GEOTECHNICS

ŠTĚRKOVÉ PILÍŘE - VÝZNAM KLENBOVÉHO EFEKTU

STONE COLUMNS - IMPORTANCE OF ARCH EFFECT

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

BC. PETER VANKO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. LUMÍR MIČA, Ph.D.

BRNO 2015



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3607T009 Konstrukce a dopravní stavby
Pracoviště	Ústav geotechniky

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Diplomant	Bc. Peter Vanko
Název	Štěrkové pilíře - význam klenbového efektu
Vedoucí diplomové práce	doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Datum zadání diplomové práce	31. 3. 2014
Datum odevzdání diplomové práce	16. 1. 2015
V Brně dne 31. 3. 2014	

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

.....
prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc., MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

Podklady a literatura

EBGEO (2009);

BS 8006 (1995) Code of practice for strengthened/reinforced soils nad other fills“;

Internet

Zásady pro vypracování

Štěrkové pilíře patří mezi technologie pro zvýšení únosnosti a tuhosti podloží. Pro jejich návrh se velmi často vychází z klenbového efektu. Cílem práce je shrnout teoretické poznatky o tomto efektu a srovnat je mezi sebou. Poslední fází bude analýza klenby pomocí numerického modelování. Sledování klenbového efektu bude pro různou rozteč, tuhost pilířů a zvoleného konstitutivního modelu zeminy. Výstupy budou grafické závislosti vybraných parametrů.

Předepsané přílohy

Licenční smlouva o zveřejňování vysokoškolských kvalifikačních prací

.....
doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

Abstrakt

Cieľom diplomovej práce je skúmanie vývoja klenbového efektu v závislosti na zmene rôznych parametrov ako sú raster pilierov, výška násypu, materiál násypu a materiál pilierov. V prvej fáze práce budú zhrnuté teoretické poznatky o štrkových pilieroch a klenbovom efekte. Ďalšou fázou bude analýza klenbového efektu pomocou numerického modelovania. V ďalšej časti druhej fázy bude namodelovaná kruhová nádrž založená na štrkových pilieroch, kde budú sledované deformácie a napätia na pilieroch pri zmene konštitučného modelu a aplikovaní náhradných charakteristík. V závere budú zhodnotené dosiahnuté výsledky.

Kľúčová slova

štrkové piliere, klenbový efekt, numerická analýza, kruhová nádrž, napätie, sadnutie

Abstract

The aim of the the thesis is to study the development of arch effect depending on the change of the various parameters such as grid of columns, height of embankments, material of embankment fill and material of columns. The first phase of work summarizes theoretical knowledges of stone columns and arch effect. The next phase deals with analysis of the effect of arch using numerical modeling. In the next part of the second phase circular tank based on stone columns will be modeled, where deformations and stress on columns will be monitored in changing constitutive model and applying substitute characteristics. Obtained results will be evaluated in conclusion.

Keywords

stone columns, arch effect, numerical analysis, circular tank, stress, settlement

...

Bibliografická citace VŠKP

Bc. Peter Vanko *Štěrkové pilíře - význam klenbového efektu*. Brno, 2015. 85 s., 10 s. příl.
Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav geotechniky.
Vedoucí práce doc. Ing. Lumír Miča, Ph.D.

Prohlášení:

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

V Brně dne 16.1.2015

.....
podpis autora
Bc. Peter Vanko

POĎAKOVANIE

Rád by som poďakoval vedúcemu diplomovej práce doc. Ing. Lumírovi Mičovi, Ph.D. za poskytnuté rady a pomoc pri vypracovaní tejto práce.

OBSAH

OBSAH	1
1 ÚVOD	3
2 ŠTRKOVÉ PILIERE (STONE COLUMNS)	4
2.1 Hĺbkové zhutňovanie.....	4
2.2 Realizácia štrkových pilierov.....	6
2.2.1 Pilieri vytvorené vibráciami.....	6
2.2.2 Metóda Franki.....	8
2.3 Spôsoby porušenia.....	8
2.4 Metódy návrhu štrkových pilierov.....	11
3 KLENBOVÝ EFEKT	16
3.1 Terzaghiho metóda.....	18
3.2 Carlssonova metóda.....	19
3.3 Metóda BS 8006.....	21
3.4 Stará nemecká metóda.....	22
3.5 Nemecká metóda EBGEO 2004.....	25
4 ANALÝZA KLENBOVÉHO EFEKTU	27
4.1 Analýza Nemeckou metódou EBGEO 2004.....	29
4.1.1 Diskusia.....	31
4.2 Analýza v programe Plaxis 3D.....	33
4.2.1 Výška násypu.....	34
4.2.2 Uhol vnútorného trenia násypu.....	37

4.2.3	Uhol vnútorného trenia pilierov	39
4.2.4	Tuhosť pilierov	41
4.2.5	Diskusia	44
4.3	Porovnanie výsledkov	45
4.3.1	Výška násypu	45
4.3.2	Uhol vnútorného trenia násypu	48
4.3.3	Uhol vnútorného trenia pilierov	50
5	KRUHOVÁ NÁDRŽ	52
5.1	Geomorfologické a geologické pomery	53
5.2	Numerický model	54
5.2.1	Model MC bez zlepšenia	57
5.2.2	Model MC so štrkovými piliermi	60
5.2.3	Model MC s náhradnými charakteristikami	62
5.2.4	Model HS bez zlepšenia	65
5.2.5	Model HS so štrkovými piliermi	67
5.2.6	Model HS s náhradnými charakteristikami	69
5.3	Porovnanie výsledkov	72
6	ZÁVER	74
	ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV	77
	ZOZNAM OBRÁZKOV	79
	ZOZNAM TABULIEK	82
	ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV	83
	ZOZNAM PRÍLOH	85

1 ÚVOD

Budovanie násypu na málo únosných zeminách ako sú íly je vždy zložitú. Íly nie sú schopné preniesť zaťaženie bez vzniku veľkých deformácií. Jednou z metód zlepšovania takýchto zemín sú aj štrkové piliere. Je to často využívaná metóda, ktorá má svoje uplatnenie v praxi. Návrh násypu na štrkových pilieroch je celkom bežný, aj keď roznos zaťaženia v násype ešte nie je úplne preskúmaný. Jednou takou nepreskúmanou oblasťou je aj tzv. klenbový efekt, ktorý sa môže vyskytovať práve v násypoch budovaných na štrkových pilieroch. Klenbový efekt je typickým prenosom zaťaženia v telese násypu, ktorý zahŕňa prenos vonkajšieho zaťaženia a časti tiaže násypového telesa do pilierov. Cieľom práce bolo skúmanie vývoja klenbového efektu v závislosti na zmene rôznych parametrov ako sú raster pilierov, výška násypu, popr. materiál násypu.

V prvej fáze tejto práce budú zhrnuté teoretické poznatky o štrkových pilieroch a o empirických prístupoch ku klenbovému efektu. Ďalšou fázou bude analýza klenbového efektu pomocou vybranej analytickej metódy a následne pomocou numerického modelovania. Sledovanie klenbového efektu bude pre rôznu výšku násypu, osovú vzdialenosť, tuhosť pilierov, materiál násypu a materiál pilierov. V ďalšej časti druhej fázy bude pomocou numerického modelovania namodelovaná kruhová nádrž založená na štrkových pilieroch, kde budú sledované deformácie a napätia na pilieroch pri zmene konštitučných modelov zemín a pri aplikovaní náhradných charakteristík. V závere budú zhodnotené dosiahnuté výsledky.

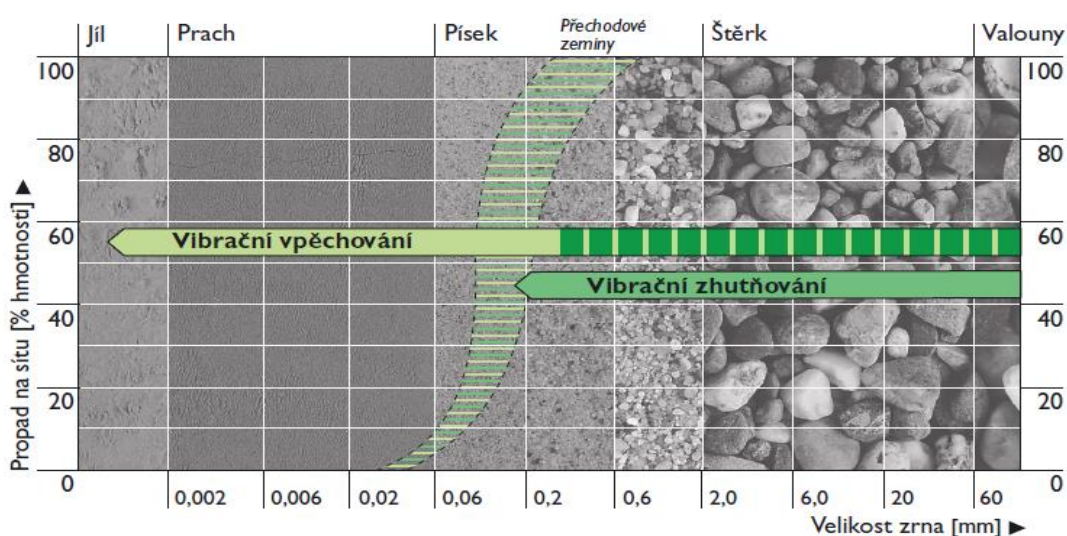
2 ŠTRKOVÉ PILIERE (STONE COLUMNS)

2.1 Hĺbkové zhutňovanie

Hĺbkové zhutňovanie znamená využitie mechanickej energie v základových pôdach do potrebnej hĺbky presahujúci bežný dosah povrchového hutnenia za účelom zlepšenia vlastností základovej pôdy (zvýšenie hustoty základovej pôdy alebo zníženie jej priepustnosti). Hĺbkové zhutňovanie môžeme rozdeliť na:

- vibroflotácia – metóda hĺbkového hutnenia vibračným zhutňovaním v nesúdržných zeminách
- štrkové piliere – prvky hlbinného zakladania v súdržných zeminách, pri ich realizácii sa v základovej pôde vibráciou, baranením alebo predrážaním vytvorí otvor, ktorý sa vzápätí zaplní vhodným materiálom [1]

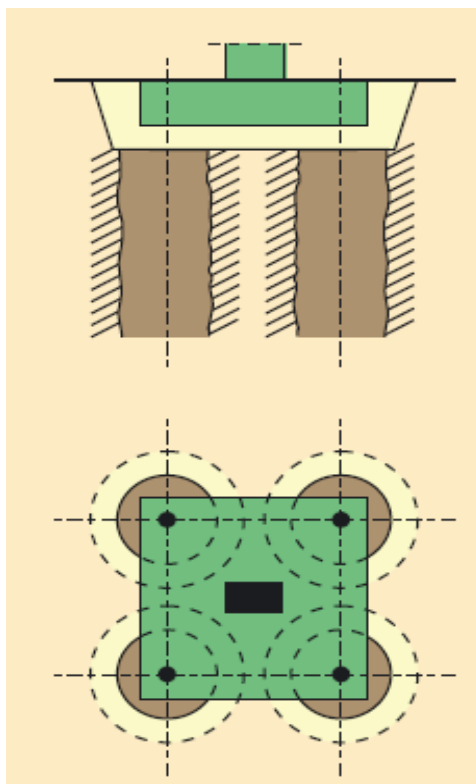
Technológia štrkových pilierov bola vyvinutá za účelom zlepšenia základovej pôdy tvorenej málo únosnými a stlačiteľnými ílmi či hlinami, keď princíp zlepšovania pomocou samotnej vibroflotácie už nebol v týchto podmienkach účinný. Samotný princíp hutnenia vibračným zhutňovaním bol zachovaný, len bol doplnený o možnosť dopĺňania hrubozrnného materiálu. Rozhranie medzi klasickou vibroflotáciou („vibrační vpěchování“) a štrkovými piliermi („vibrační zhutňování“) je na Obrázku 2-1. [2]



Obrázok 2-1: Oblasť použitia hĺbkového vibračného zhutňovania [3]

Štrkové piliere sa realizujú za účelom zvýšenia únosnosti základovej pôdy a obmedzenia deformácií. Sú to výstužné prvky, ktoré majú niekoľkokrát vyššiu tuhosť ako tuhosť okolitej zeminy. Vzhľadom k tomu, že sa vyrábajú ako štrkové, pôsobia súčasne ako zvislé drény a urýchľujú konsolidáciu základovej pôdy. Mechanizmus ich statického pôsobenia je výrazne odlišný ako mechanizmus únosnosti pilót, preto je nevhodné používať názvy štrkové alebo štrkopieskové pilóty. Na rozdiel od pilót, ktoré prenášajú vonkajšie zaťaženie do okolitej základovej pôdy trením na plášti a napätím na päte, prenos zaťaženia štrkovými piliermi je závislý na schopnosti okolitej zeminy vzdorovať „boulení“ týchto prvkov pri rovnomernom zaťažení ich hlavy. Existujú dva rozdielne pohľady na štrkové piliere, a to ako na prvky, ktoré:

- a) sú schopné vzdorovať osovému zaťaženiu (napr. pod základovými pásmi a pätkami)



Obrázok 2-2: Použitie pod základovou pätkou [3]

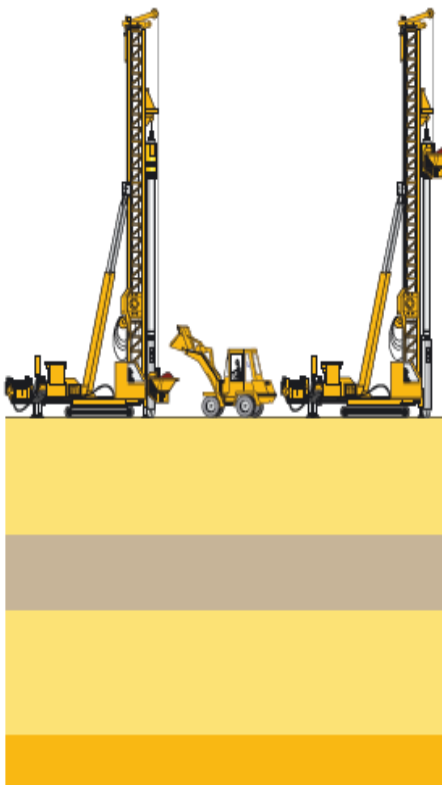
- b) plošne zlepšujú vlastnosti základovej pôdy (zvýšením priemernej veľkosti E_{def} a urýchlenie konsolidácie) [1]

2.2 Realizácia štrkových pilierov

2.2.1 Piliee vytvorené vibráciami

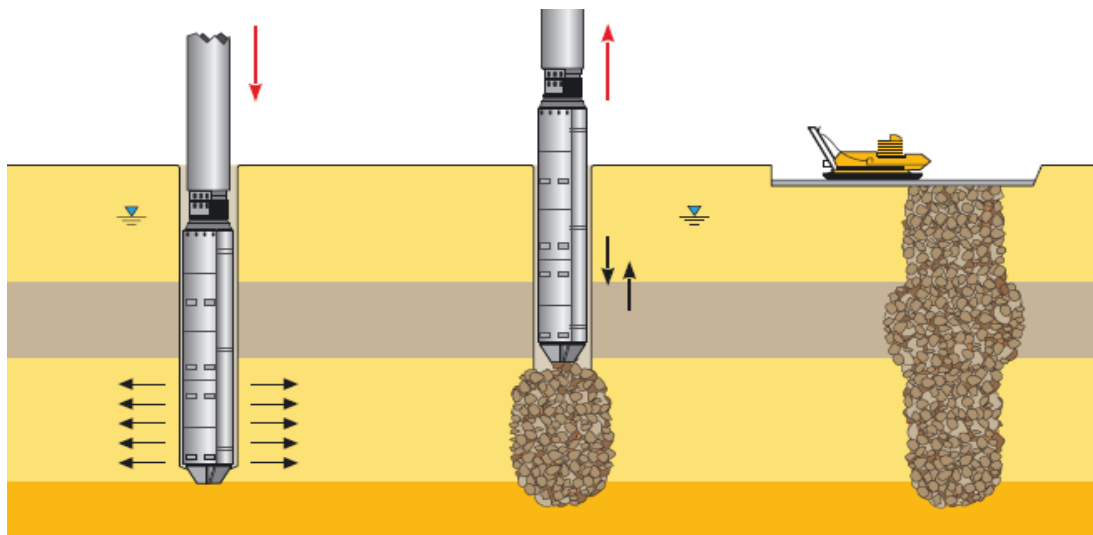
Táto metóda je vhodná pre jemnozrnné zeminy a navážky. Zlepšenie zeminy závisí na vysokej tuhosti a vyššej šmykovej pevnosti štrkových pilierov. Pri tejto metóde sa väčšinou využíva vibrátor, do ktorého je pridávaný materiál vháňaný pomocou stlačeného vzduchu. Na tento účel je nutné použiť stroj - zásobníkový vibrátor, pričom je vytvorený celistvý stĺp. Telo vibrátora plní funkciu paženia, čiže otvor je po dobu plnenia piliera stabilný a to i vo veľmi mäkkých zeminách. Tento efekt je ďalej umocnený pretlakom vzduchu, ktorý je vpúšťaný tryskami v mieste hrotu vibrátora. Technologický postup sa skladá z nasledujúcich krokov:

- a) Príprava – vibrátor sa pripraví na vytýčené miesto a pomocou operných pätiiek sa hydraulicky stabilizuje. Nakladač naplní násypku pridávaným materiálom.
- b) Plnenie – násypka sa vytiahne a vysype svoj obsah do zásobníku. Po uzavretí klapky sa materiál pomocou stlačeného vzduchu dopraví do hrotu vibrátora.



Obrázok 2-3: Príprava a plnenie [3]

- c) Zapúšťanie – vibrátor roztláča zeminu a podporovaný stlačeným vzduchom vniká až do projektovanej hĺbky.
- d) Zhutňovanie – po dosiahnutí konečnej hĺbky sa vibrátor čiastočne vytiahne, pridávaný materiál sa pomocou stlačeného vzduchu vypustí do vytvorenej dutiny a pri spätnom spustení vibrátora sa materiál zatlačuje do zeminu a zhutňuje.
- e) Dokončovacie práce – takýmto spôsobom sa zhotoví celý pilier až do úrovne hlavy. Následne sa hlava upraví jej zarovnaním a dodatočným zhutnením, prípadne sa na ňu položí ďalšia konštrukčná vrstva.



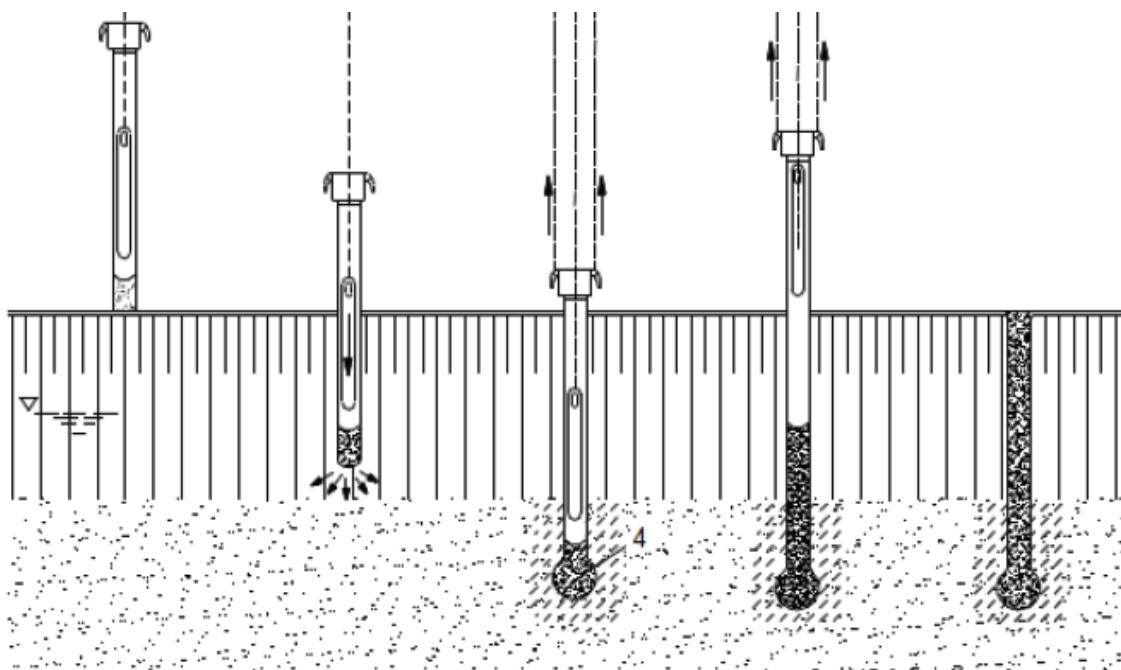
Obrázok 2-4: Zapúšťanie, zhutňovanie a dokončovacie práce (zľava doprava) [3]

Uvedeným postupom, ktorý vznikol koncom 50. rokov minulého storočia, vzniká kompozit tvorený z okolitej zeminu a zhutnených pilierov. Z geotechnického hľadiska sa zlepšené zeminové prostredie chová ako základová pôda pod plošnými základmi s únosnosťou v rozmedzí 150 – 400 kPa. [3]

Pri spustení vibrátora, ktoré možno urýchliť použitím vodného či vzduchového výplachu, je materiál vtlačovaný do okolitej zeminu. Miera zhutnenia okolitej zeminu sa dá určiť penetračnou skúškou. Ďalšie informácie poskytuje záznam z realizácie, v ktorom je uvedená spotreba elektrickej energie a dĺžka štrkového piliera. Výplňovým materiálom býva najčastejšie kamenivo frakcie od 4 mm do 32 mm. [3]

2.2.2 Metóda Franki

V Českej republike ale aj v Európe sa môžeme stretnúť s realizáciou pilierov bez vibrácií. Jedná sa o technológiu belgickej firmy Franki. Princíp zhotovenia pilierov je známa zo železobetónových pilót. Namiesto suchého betónu sa k formovaniu drieku používa drvený štrk frakcie 8 – 32 mm, ktorý možno zhutniť do takej miery, aby modul deformácie dosahoval hodnôt 150 – 200 MPa. K roztlačovaniu zeminy do strán dochádza pri zarážaní ocelej výpažnice v spodnej časti uzavretej zátke. Okolitá zemina sa teda môže len stlačovať do strán. Po dosiahnutí požadovanej hĺbky dôjde k vytlačeniu zátky a začne sa s plnením pridávaného materiálu a s hutnením za postupného vyťahovania výpažnice. Použitím tejto metódy možno dosiahnuť až dvojnásobného priemeru pilierov v porovnaní s priemerom raziacej ocelej rúry. [1] [2]



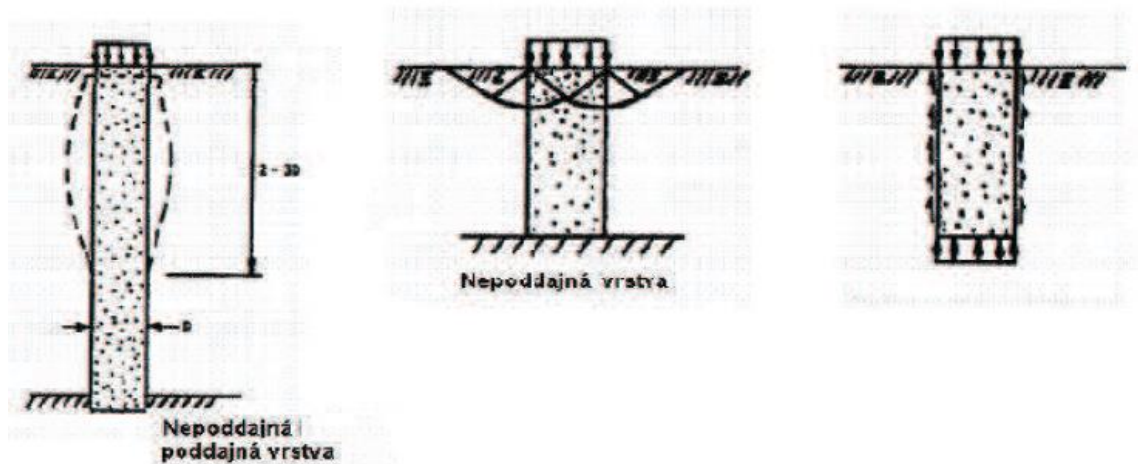
Obrázok 2-5: Systém Franki [2]

2.3 Spôsoby porušenia

Mechanizmus porušenia štrkových pilierov závisí na tom, či pilier svojou päťou spočíva na poddajnej (zlepšovanej) alebo nepoddajnej zemine, respektíve či sa pilier nachádza v jednovrstvovom alebo viacvrstvovom prostredí. Ak sa pilier nachádza v homogénnom

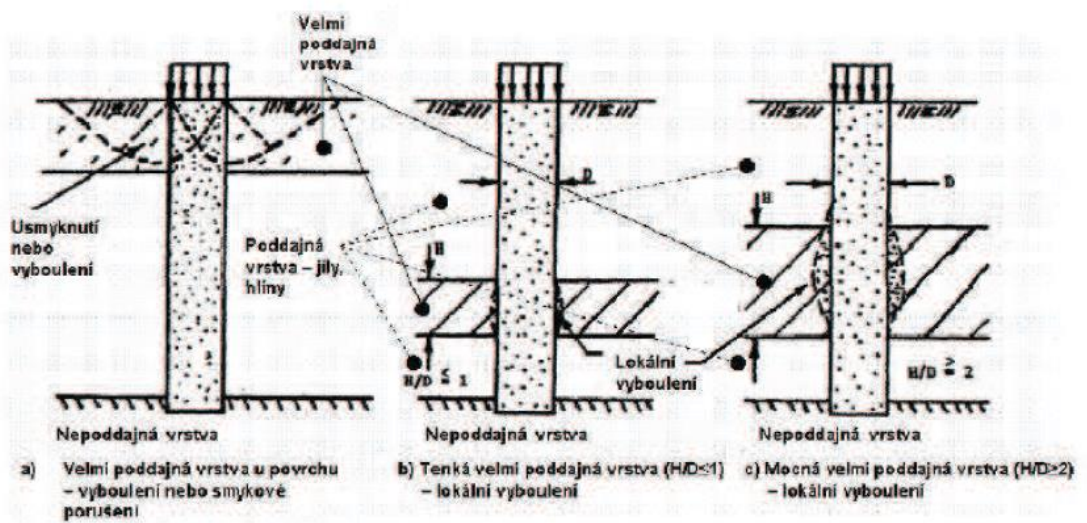
prostredí a je ukončený na nepoddajnej (resp. poddajnej vrstve), môžu nastať dva prípady porušenia:

- a) Dĺžka piliera je väčšia ako 2 až 3 násobok jeho priemeru „D“ a je ukončený na nepoddajnej vrstve, pilier sa „vyboulí“ v hornej časti (Obr. 2-6 vľavo)
- b) Pilier je kratší a ukončený na nepoddajnej vrstve - hrozí strata stability a vznik šmykových plôch, ktoré nastanú pri prekročení medzného stavu únosnosti pod plošnými základmi (Obr. 2-6 v strede)
- c) Pilier je kratší ako 2 až 3 násobok jeho priemeru „D“ a je ukončený v poddajnej vrstve – bude prekročená jeho únosnosť v päte (Obr. 2-6 vpravo)



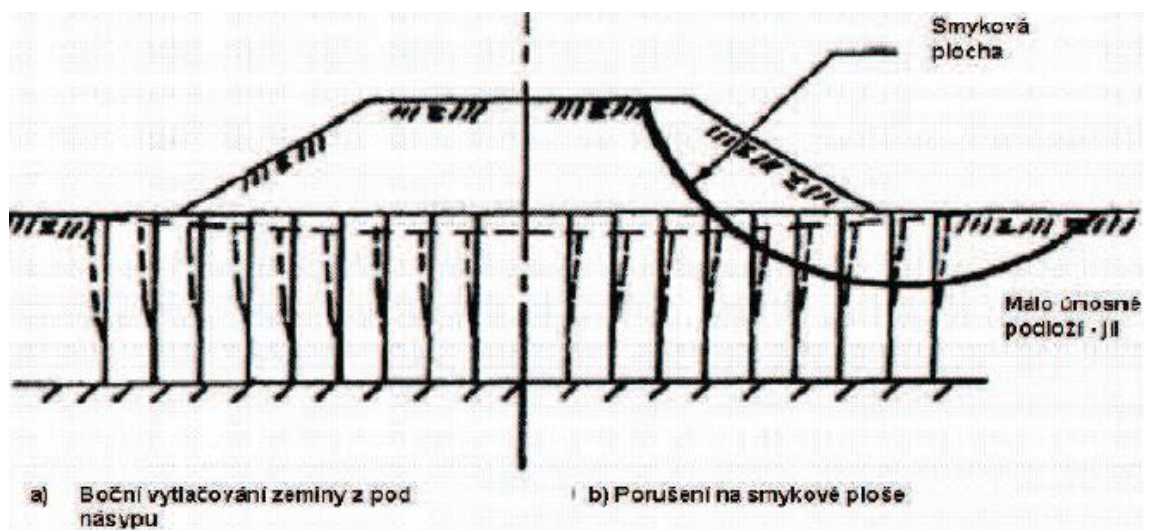
Obrázok 2-6: Mechanizmus porušenia osamelého piliera v homogénnej zemine [2]

Vo väčšine prípadoch sa pilier nachádza vo vrstevnatom podloží, kde sa striedajú stlačiteľné, málo únosné vrstvy s vrstvami veľmi neúnosnými a stlačiteľnými. Kritickým miestom sa teda stáva veľmi neúnosná, stlačiteľná vrstva (Obr. 2-7).



Obrázok 2-7: Mechanizmus porušenia vo vrstevnatom podloží [2]

Pri skupine pilierov sú spôsoby porušenia podobné: „vyboulení“, strata únosnosti v päte. Pribúda ale porušenie na obecnej šmykovej ploche, či bočné posunutie, ktoré je charakteristické pri zaťažení násypom (Obr. 2-8). [2]



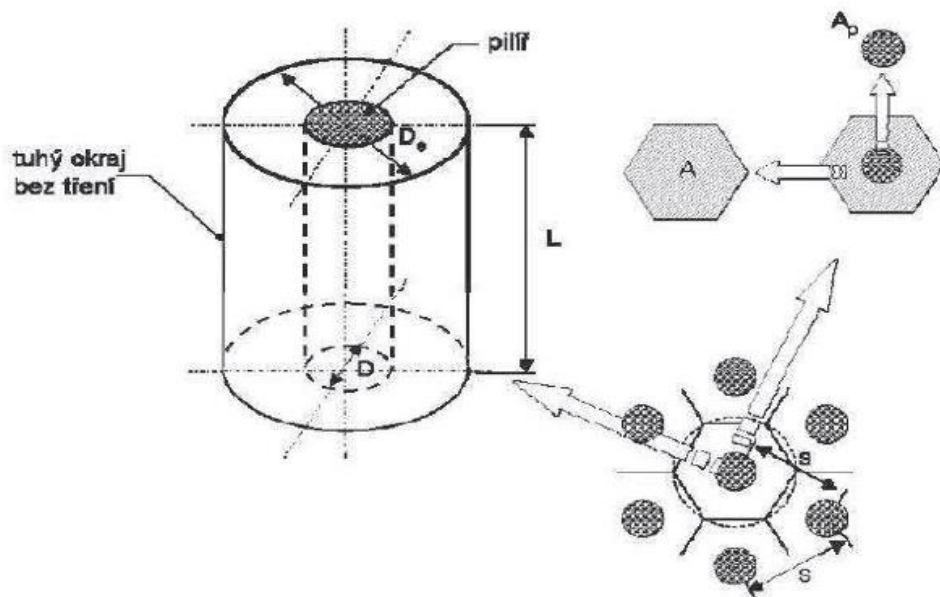
Obrázok 2-8: Spôsoby porušenia skupiny pilierov [2]

2.4 Metódy návrhu štrkových pilierov

Pre návrh zlepšenia podložia pomocou týchto prvkov existuje mnoho teórii. Jedná sa o analytické metódy:

- metóda rovnováhy (Aboshi, Barksdale)
- prírastková metóda (Goughnour, Bayuk)
- metóda Priebe (Priebe)
- metóda Greenwood (Greenwood)
- metóda náhradnej steny (Van Impe)
- metóda konečných prvkov (Balaam, Poulos, Brown)

Väčšina z nich vychádza z konceptu elementárnej bunky. Elementárna bunka predstavuje prvok tvorený pilierom a okolnou zlepšenou zeminou (Obr. 2-9).



Obrázok 2-9: Koncept elementárnej bunky [2]

Rozmery bunky závisia na osovej vzdialenosti medzi piliermi. Ekvivalentný priemer el. bunky D_e , je definovaný:

$$D_e = 1,05.s \quad \text{pre trojuholníkovú sieť,} \quad (2-1)$$

$$D_e = 1,13.s \quad \text{pre štvorcovú sieť,} \quad (2-2)$$

kde s je osová vzdialenosť pilierov. Ďalším základným parametrom pre návrh je faktor plochy nahradenia a_p :

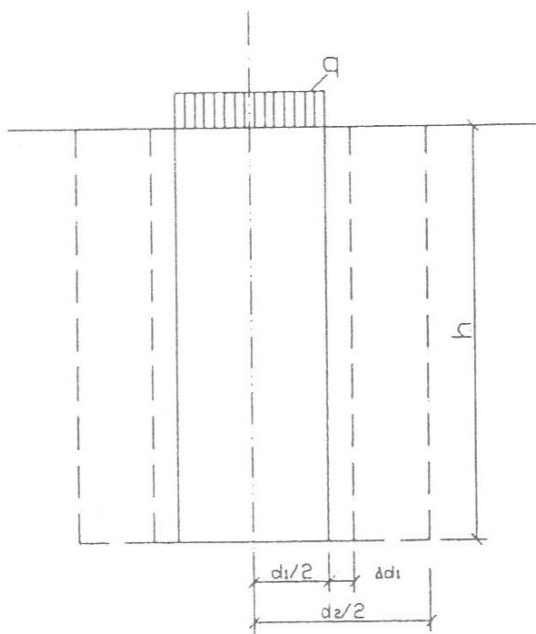
$$a_p = A_p/A. \quad (2-3)$$

Vyjadruje aká časť ovplyvnenej plochy (A) je nahradená plochou piliera (A_p). Rovnicu (2-3) môžeme vyjadriť pomocou priemeru pilierov (D) a ich osovej vzdialenosti:

$$a_p = C \cdot (D/s)^2, \quad (2-4)$$

kde parameter „ C “ charakterizuje rastra pilierov. Pre štvorcové rozmiestnenie je $C = \pi/4$ a pre trojuholníkové $C = \pi/(2\sqrt{3})$.

Jednou z najzákladnejších analytických metód je metóda Priebeho (1976). Predpokladá tuhý základ vyvodzujúci rovnomerné zaťaženie, ktoré pôsobí na nekonečne veľkú sieť štrkových pilierov. Základová pôda je uvažovaná ako izotropný materiál, pričom päty štrkových pilierov ležia na dostatočne únosnom podloží. Ďalej sa predpokladajú rovnaké zvislé deformácie piliera a okolnej zeminy. Chovanie zeminy je uvažované ako pružné. [1] [2]



Obrázok 2-10: Štrkový pilier v pružnom polopriestore [1]

Rozšírenie el. bunky v pružnom polopriestore (Obrázok 2-10) môžeme napísať ako:

$$\Delta d_1 = \Delta \sigma_h \cdot (1 - \nu) \cdot d_1 / E \cdot [(1 - 2 \cdot \nu) \cdot (1 - d_1^2 / d_2^2) / (1 - 2 \cdot \nu + d_1^2 / d_2^2)] \quad (2-5)$$

kde: $\Delta \sigma_h = q \cdot K_a - \Delta \sigma_{v,z}$ (rozdiel horizontálneho tlaku piliera na zeminu a tlaku zeminy na pilier, predpoklad: $\sigma_{v,z} = \sigma_{h,z}$)

K_a - súčiniteľ aktívneho zemného tlaku ($K_a = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$),

E - modul pružnosti základovej pôdy,

d_1 - priemer štrkového piliera

d_2 - priemer náhradnej bunky

ν - Poissonovo číslo základovej pôdy.

Ak použijeme k výpočtu edometrický modul E_{oed} namiesto E , potom

$$E = ((1 - 2 \cdot \nu^2) / (1 - \nu)) \cdot E_{oed} \quad (2-6)$$

$$\Delta d_1 = \Delta \sigma_h \cdot d_1 / E_{oed} \cdot f(\nu, a_p) \quad (2-7)$$

$$\text{kde } f(\nu, a_p) = [(1 - \nu)^2 \cdot (1 - 2\nu) \cdot (1 - a_p)] / [(1 - \nu - 2 \cdot \nu^2) \cdot (1 - 2\nu + a_p)] \quad (2-8)$$

Za predpokladu, že pilier pri deformácii nemení svoj objem, bude radiálnemu rozšíreniu Δd_1 odpovedať axiálne skrátenie, t.j. sadnutie piliera:

$$s_c = 2 \cdot h \cdot \Delta d_1 = 2 \cdot \Delta \sigma_h \cdot f(\nu, a_p) \cdot h / E_{oed} \quad (2-9)$$

kde h je dĺžka štrkového piliera. Sadnutie základovej pôdy za predpokladu nekonečne tuhého základu možno vyjadriť vzt'ahom:

$$s_z = \sigma_{h,z} \cdot h / E_{oed}$$

$$\text{keďže } s_c = s_z, \text{ bude } \sigma_{h,z} = 2 \cdot \Delta \sigma_h \cdot f(\nu, a_p) \quad (2-10)$$

Pomer zvislých napätí na štrkovom pilieri a základovej pôdy bude:

$$\sigma_{v,c} / \sigma_{v,z} = (0,5 + f(\nu, a_p)) / (K_a + f(\nu, a_p)) \quad (2-11)$$

Pre celkové zaťaženie povrchu zlepšenej zeminy bude platiť:

$$A \cdot q = A_c \cdot \sigma_{v,c} + A_s \cdot \sigma_{v,z} \quad (2-12)$$

$$q / \sigma_{v,z} = 1 + a_p [(0,5 + f(v, a_p)) / (K_a \cdot f(v, a_p))] \quad (2-13)$$

Pomer sadnutia nevytuzenej a vytuzenej zeminy:

$$\beta = s / s_z = q / \sigma_{v,z} = 1/n \quad (2-14)$$

kde stupeň zlepšenia zeminy možno vyjadriť ako:

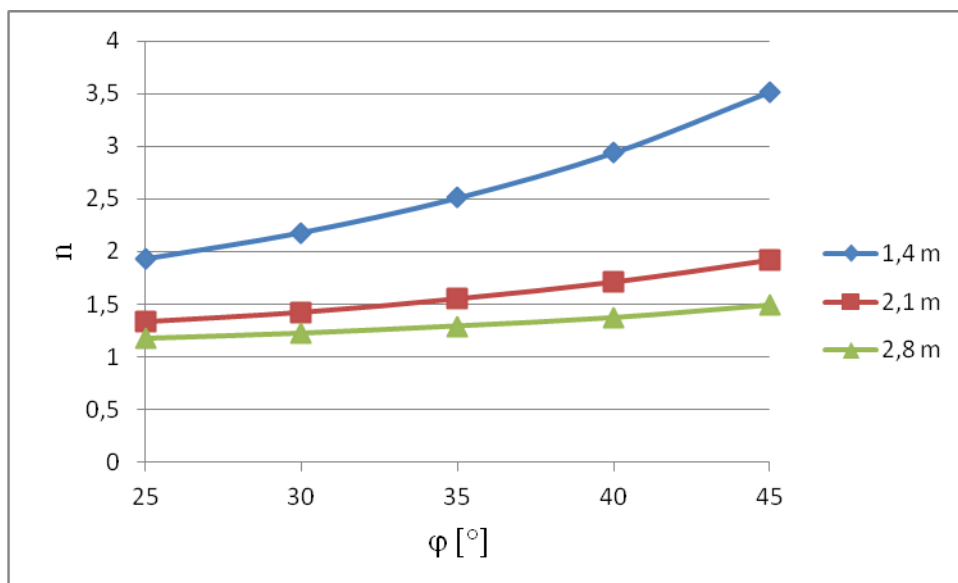
$$n = 1 + a_p [(0,5 + f(v, a_p)) / (K_a \cdot f(v, a_p)) - 1] \quad (2-15)$$

Do výpočtu stupňa zlepšenia zeminy "n" vstupuje aj raster pilierov a uhol vnútorného trenia materiálu pilierov. Bola uskutočnená analýza vplyvu týchto parametrov na hodnotu "n". V Tabuľke 2-1 sú vypočítané hodnoty zlepšenia základovej pôdy pre rôzne osovú vzdialenosť a rôzne uhly vnútorného trenia pilierov. Poissonovo číslo základovej pôdy je uvažované $\nu = 0,3$ a priemer pilierov $D = 0,7$ m v trojuholníkovom rastrí.

Tabuľka 2-1: Hodnoty zlepšenia základovej pôdy "n" štrkovými piliermi, pre rôzne osovú vzdialenosť a rôzne φ pilierov

osová vzd. "s" [m]	uhol vnútorného trenia piliera " φ " [°]				
	25	30	35	40	45
1,4 m	1,93	2,18	2,51	2,94	3,52
2,1 m	1,33	1,42	1,55	1,71	1,92
2,8 m	1,17	1,22	1,29	1,37	1,49

Na Obrázku 2-11 je potom vzťah medzi uhlom vnútorného trenia materiálu pilierov a stupňom zlepšenia zeminy podľa Priebeho pre rôzne osovú vzdialenosť pilierov. Je vidieť, že so stúpajúcou pevnosťou piliera (danou uhlom vnútorného trenia) rastie aj stupeň zlepšenia zeminy. Najvyššie hodnoty "n" získame pri najmenej osovej vzdialenosť 1,4 m (pomer $s/D = 2$), zatiaľ čo pri osovej vzdialenosť 2,8 m ($s/D = 4$) je pomer zlepšenia len $n < 1,5$.



Obrázok 2-11: Vzťah medzi uhlom vnútorného trenia piliera a stupňom zlepšenia zeminy pre rôzne osové vzdialenosti pilierov

Priebe nahradzuje zlepšenú oblasť priemernými hodnotami uhlu vnútorného trenia a súdržnosti. Priemerný uhol vnútorného trenia sa stanovuje ako:

$$\operatorname{tg}\varphi = m' \cdot \operatorname{tg}\varphi_p + (1 - m') \cdot \operatorname{tg}\varphi_z \quad (2-16)$$

kde m' je redukovaný súčiniteľ pomerného zaťaženia na pilier:

$$m' = (n - 1) / n \quad (2-17)$$

Súdržnosť kompozitného materiálu závisí len na okolitej zemine. Preto možno pre náhradnú súdržnosť napísať rovnicu:

$$c = (1 - m') \cdot c_z \quad (2-18)$$

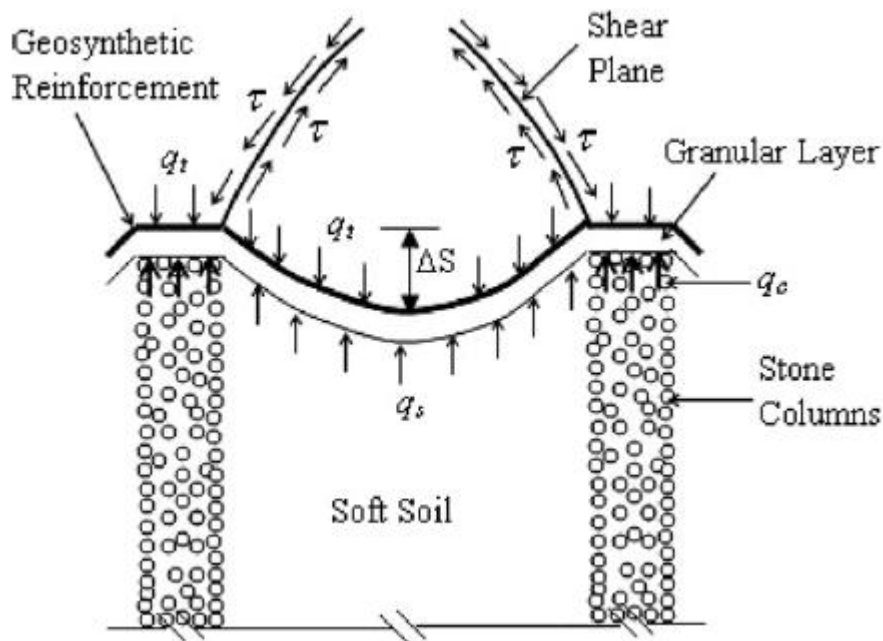
Vzhľadom k tomu, že sa vychádza z koncepcie náhradného materiálu, možno pre priemernú objemovú tiaž napísať:

$$\gamma = \gamma_z \cdot (A_z/A) + \gamma_p \cdot (A_p/A) \quad (2-19)$$

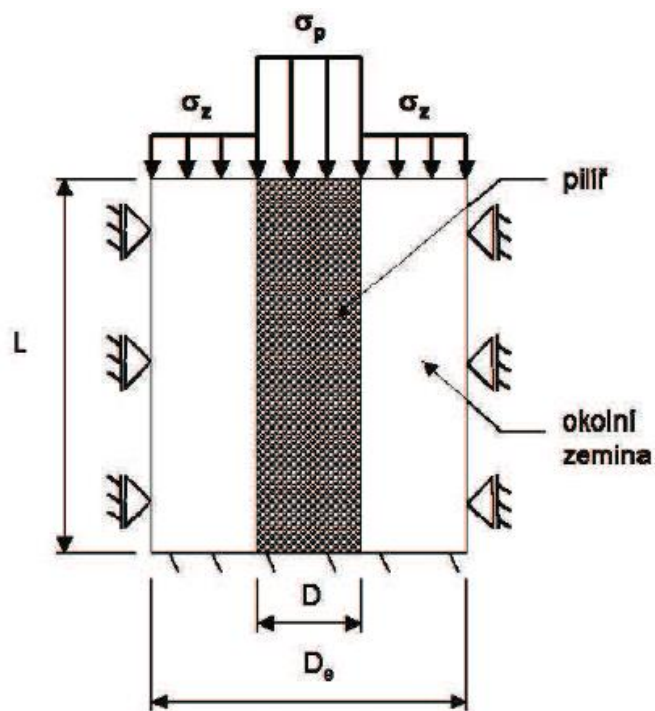
3 KLENBOVÝ EFEKT

Klenbový efekt je fenomén, ktorý sa vyskytuje v násypoch vybudovaných na málo únosných zeminách zlepšených štrkovými piliermi. Klenutie iniciuje zníženie vertikálneho napätia pôsobiaceho na relatívne mäkkú zeminu, zatiaľ čo zvyšuje napätie pôsobiace na hlavy štrkových pilierov. Klenbový efekt vyvoláva nejednotné rozdelenie zvislého napätia pôsobiaceho na základový pôdu.

Klenbový efekt definoval McNulty (1969) ako „schopnosť prenosu zaťaženia z jedného bodu do druhého v dôsledku relatívneho sadnutia medzi týmito bodmi. Systém šmykových napätí je mechanizmus, ktorým je zaťaženie prenášané.“ Materiál násypového telesa medzi štrkovými piliermi (stone columns) má tendenciu sadnúť viac, vďaka rozdielnej tuhosti materiálu štrkového piliera a „mäkkej“ zeminy (soft soil) pod násypom. Sadanie je obmedzené šmykovou pevnosťou materiálu nad štrkovými piliermi (Obr. 3-1). Vďaka tejto pevnosti je zvislé napätie na hlave štrkového piliera väčšie ako v zemine medzi piliermi. [4] [5]



Obrázok 3-1: Klenbový efekt [6]



Obrázok 3-2: Rozdelenie napätia na elementárnej bunke [2]

Nad pilierom sa koncentruje napätie „ σ_p “ a nad zeminou napätie „ σ_z “, ktoré je menšie (Obr. 3-2). Pre zhodnotenie „účinnosti“ klenby bol vybraný faktor koncentrácie napätia (stress concentration ratio) „ n “, ktorý môžeme definovať ako:

$$n = \sigma_p / \sigma_z. \quad (3-1)$$

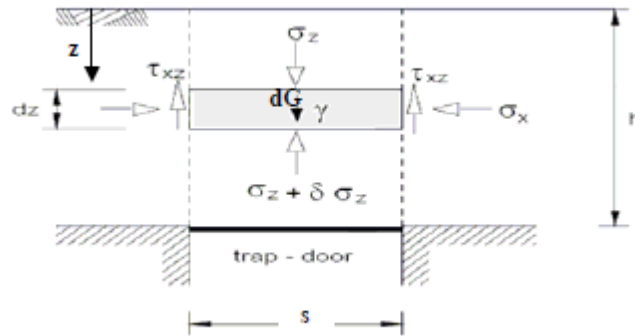
Podľa Han a Ye (2002) sa typická hodnota „ n “ pohybuje v rozpätí 2 – 5. Tento faktor môže byť pri predpoklade pružného chovania zeminy tiež vyjadrený pomocou modulu pružnosti piliera „ E_p “ a modulu pružnosti okolitej zeminy „ E_z “:

$$n = (E_p / E_z). \quad [2] \quad [5] \quad (3-2)$$

Existuje niekoľko empirických prístupov pre návrh zemej klenby. V nasledujúcich kapitolách bude predstavených 5 analytických metód.

3.1 Terzaghiho metóda

Terzaghi opísal kľenuťie na zázklade jeho experimentu (trap door effect).



Obrázok 3-3: Popis kľenbového efektu Terzaghiho metódou [7]

Ako ukazuje Obr. 3-3 môžeme na zázklade zvislej deformácie napísať:

$$(\sigma_z + d\sigma_z) \cdot s - \sigma_z \cdot s + 2\tau_{xz} dz - dG = 0 \quad (3-3)$$

Kde:

σ_z -zvislé efektívne napätie

τ_{xz} -šmykové napätie

s -šírka medzery

G -tiaž zeminy

Šmyková pevnosť môže byť vyjadrená ako:

$$\tau_{xz} = c' + \sigma_x \cdot \tan \phi' \quad (3-4)$$

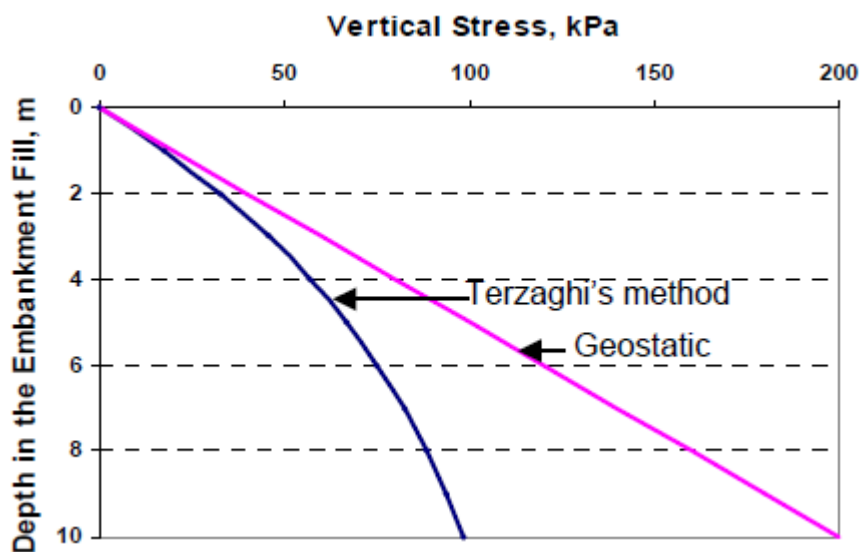
kde c' je súdržnosť a ϕ' je uhol vnútorného trenia zeminy. Efektívne horizontálne napätie je $\sigma_x = K \cdot \sigma_z$. Po dosadení rovnice (3-4) do rovnice (3-3) a jej následnej úprave, dostaneme diferenciálnu rovnicu:

$$\left(\frac{d\sigma_z}{\sigma_z} \right) = \frac{\gamma}{\sigma_z} dz - \frac{2c'}{s \cdot \sigma_z} dz - \frac{2K \cdot \tan \phi'}{s} dz \quad (3-5)$$

Riešením diferenciálnej rovnice dostaneme:

$$\sigma_z = \frac{s \cdot (\gamma - 2 \cdot c'/s)}{2 \cdot K \cdot \tan \varphi'} \cdot \left[1 - e^{-2K \tan \varphi' \cdot \frac{z}{s}} \right] + p \cdot e^{-2K \tan \varphi' \cdot \frac{z}{s}} \quad (3-6)$$

Na základe experimentov, Terzaghi určil hodnotu $K = 1$. Riešením rovnice (3-6) dostávame exponenciálne sa zvyšujúce zvislé efektívne napätie v telese násypu medzi dvoma tuhými základmi.

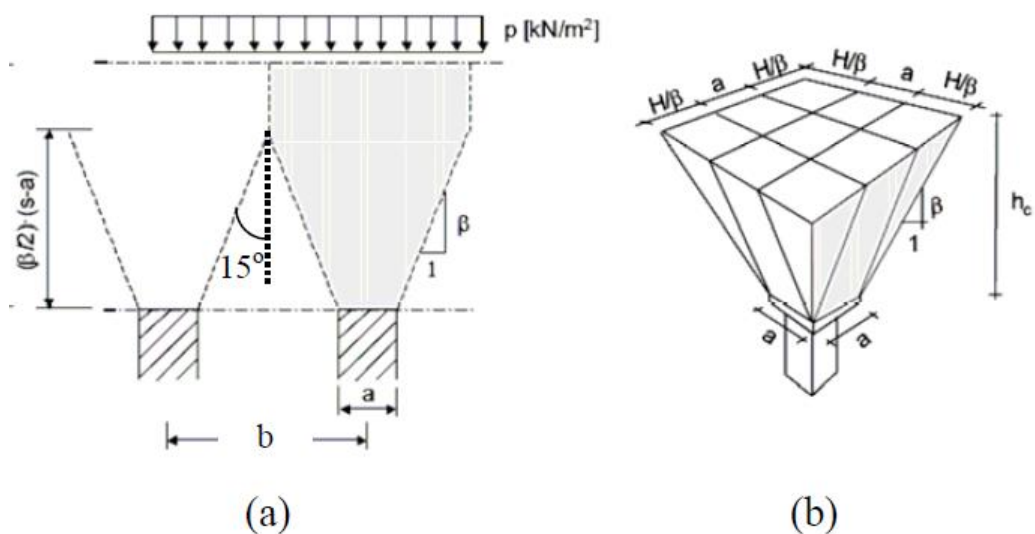


Obrázok 3-4: Rozdelenie napätia v telese násypu podľa Terzaghiho metódy „padacích dverí“ [7]

Na Obr. 3-4 je porovnanie zvislého efektívneho napätia s lineárne narastajúcim geostatickým napätím. Vďaka klenbovému účinku je zvislé napätie pôsobiace na terén pod násypom menšie ako geostatické napätie v rovnakej hĺbke. [7]

3.2 Carlssonova metóda

Carlsson (1987) uvažuje zeminovú klenbu tvaru klinu. Táto metóda uvažuje klin zeminy, ktorého prierezová plocha pod zeminou vytvárajúcou klenbu môže byť aproximovaná ako trojuholník s uhlom vo vrchole rovným 30° (Obr.3-5).



Obrázok 3-5: Model klinu zeminy (a) 2D, (b) 3D [7]

Metóda prevzala prístup tzv. kritickej výšky tak, že ďalšie priťaženie nad vrcholom klinu je prevedené priamo do pilierov. Pre 2D prístup, s výškou násypu nad vrcholom trojuholníkovej plochy, možno tiaž klinu zeminy na jednotku dĺžky vypočítať ako:

$$w = \frac{(b - a)^2}{4 \tan 15^\circ} \gamma \quad (3-7)$$

kde :

w - tiaž zeminy na jednotku dĺžky

a - priemer pilierov

b - osová vzdialenosť pilierov

γ - objemová tiaž zeminy násypu

Tiaž zeminy uvažovaná pre 3D efekt (Obr. 2-3) je uvažovaná nasledovne:

$$w_s = \frac{\gamma}{2a} \left\{ b^2 H - \frac{1}{6 \tan \beta} \left[(a + H \tan \beta)^3 - a^3 \right] \right\} \quad (3-8)$$

Kde:

w_s - tiaž zeminu na plochu hlavy piliera (polovica pyramídy)

a - priemer pilierov

b - osová vzdialenosť pilierov

γ - objemová tiaž zeminu násypu

H - výška násypu

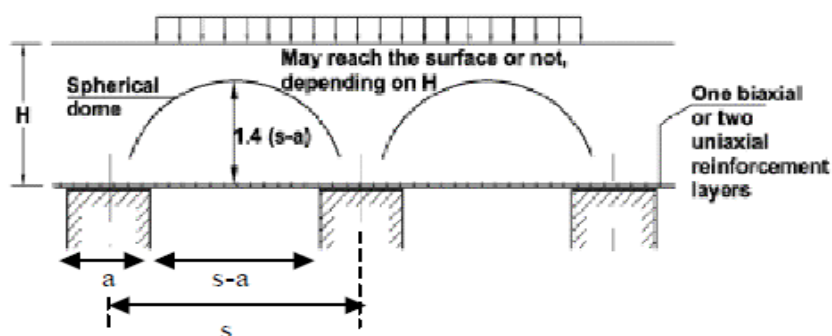
β - sklon naznačený na Obr. 3-3

Táto metóda uvažujúca „klenbu“ tvaru pyramídy je populárna hlavne v severských krajinách. [7]

3.3 Metóda BS 8006

Britská norma „Code of practice for strengthened/reinforced soils nad other fills“ (British Standards Institution 1995) prijala empirickú metódu vypracovanú Jonesom a kol. (1990), ktorá je založená na vzorci stanoveným Marstonom a Andersonom (1913) pre zeminovú klenbu na podzemnom potrubí. V metóde BS 8006, je klenutie uvažované ako pologuľovitá kupola a je nezávislá na type a pevnostných parametroch zeminu v telese násypu (Obr. 3-6). Podľa tejto metódy je na vytvorenie klenby potrebná minimálna výška násypu $h = 0,7 \cdot (s-a)$ (3-9)

a pre plno vyvinutú klenbu je nutný násyp vysoký minimálne $h = 1,4 \cdot (s-a)$. (3-10)



Obrázok 3-6: Klenba podľa Britskej normy (Alexiew, 2004) [7]

Pomer zvislého napätia na hlavách pilierov k priemernému zvislému napätiu v základe násypu, P_c'/σ_v' môže byť odhadnutý ako:

$$\frac{P_c'}{\sigma_v'} = \left[\frac{C_c a}{H} \right]^2 \quad (3-11)$$

Kde:

C_c - koeficient definovaný ako:

$1,95.H/a - 0,18$ pre piliere na pevných základoch

$1,5.H/a - 0,07$ pre ostatné piliere

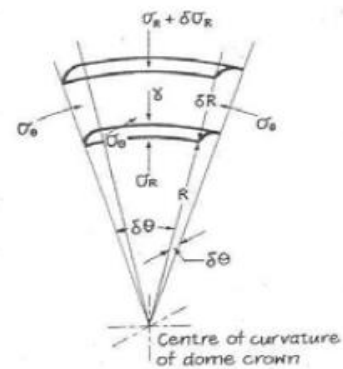
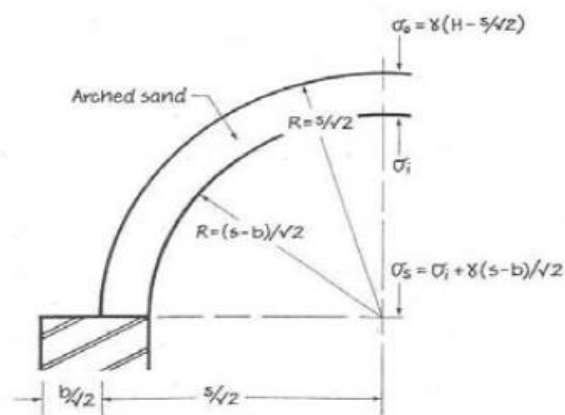
a - priemer pilierov

H - výška násypu

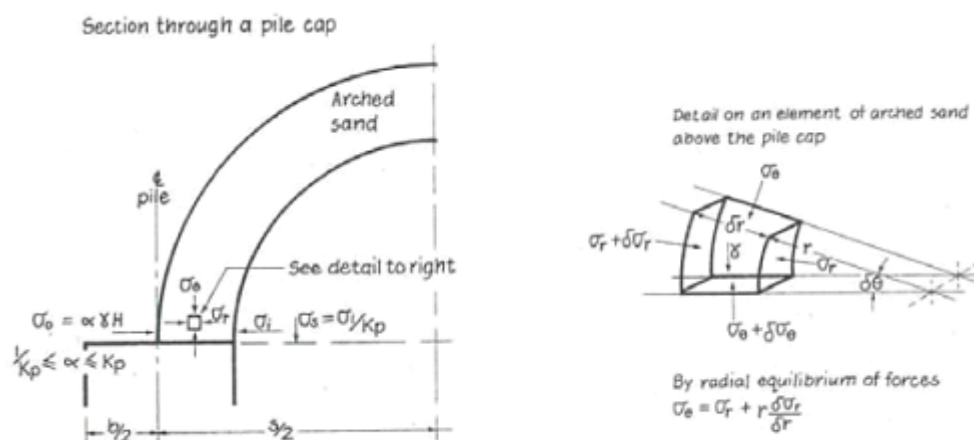
BS 8006 je jednoduchá a oblúbená v inžinierskej praxi, preto väčšina násypov budovaných na pilieroch (pilótách) je navrhovaných podľa tejto metódy.[7] [8] [9]

3.4 Stará nemecká metóda

Táto metóda využíva koncept klenbového efektu, ktorý navrhol Hewlett a Randolph (1988). Metóda predpokladá klenbový efekt vo forme klenbovej vrstvy trau pologuľovitej kupoly (Obr. 3-7).



(a)



(b)

Obrázok 3-7: Klenbový efekt – rovnovážna analýza na korune klenby (a), rovnovážna analýza na hlave piliera (b) [7]

Hrúbka klenbovej vrstvy je $b/\sqrt{2}$, b je priemer piliera. Predpokladá sa, že napätie bude redistribuované len v klenbovej vrstve. Mimo túto vrstvu je rozloženie napätia podobné počiatočnému stavu. To znamená, že nad a pod touto vrstvou napätie rastie lineárne s hĺbkou. Predpokladá sa, že k porušeniu klenutia dôjde len na korune klenby alebo na hlave piliera. Rovnovážna analýza na týchto dvoch pozíciách vedie k dvom rovniciam pre napätie pôsobiace na povrch základovej pôdy (σ_s).

a) Rovnovážna analýza na korune klenby Obr. 3-5 (a)

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2(\sigma_r - \sigma_\theta)}{r} = -\gamma \quad (3-12)$$

Kde $\sigma_\phi = K_p \cdot \sigma_r$, a K_p je Rankinov súčiniteľ pasívneho zemného tlaku, ktorý sa rovná $(1 + \sin\phi)/(1 - \sin\phi)$. Vnútorňý polomer je $R = (s-b)/\sqrt{2}$ a vonkajší polomer je $R = s/\sqrt{2}$. Odpovedajúce zvislé napätie je σ_i a $\gamma(H-s/\sqrt{2})$ ako ukazuje Obr. 3-5 (a), kde H je výška násypu. Vzhľadom na okrajové podmienky vonkajšieho a vnútorného polomeru je riešením rovnice (3-12):

$$\sigma_i = \left[\gamma(1-\delta)^{2(K_p-1)} \right] \cdot \left[H - \frac{s}{\sqrt{2}} \left(\frac{K_p-2}{2K_p-3} \right) \right] + \gamma \frac{s-b}{\sqrt{2}(2K_p-3)} \quad (3-13)$$

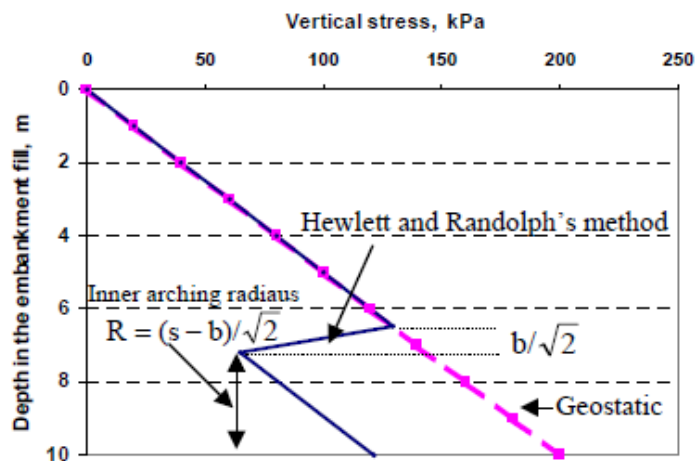
s $\delta = b/s$. Totálne napätie pôsobiace na základovú pôdu je:

$$\sigma_s = \sigma_i + \gamma(H-s/\sqrt{2}) \quad (3-14)$$

b) Rovnovážna analýza na hlave piliera

Napätie pôsobiace na základovú pôdu je:

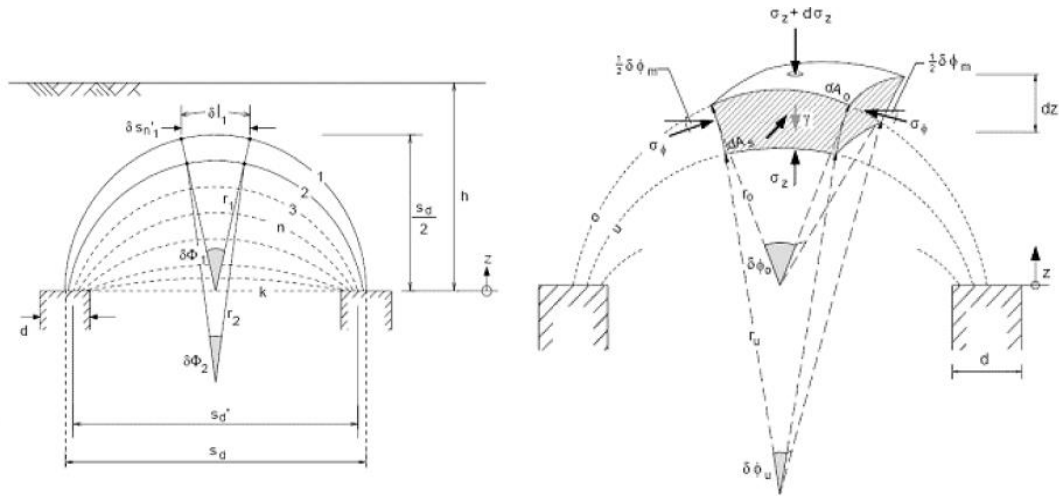
$$\sigma_s = \frac{\gamma \cdot H}{\left(\frac{2 \cdot K_p}{K_p + 1} \right) \cdot \left[(1-\delta)^{(1-K_p)} - (1-\delta) \cdot (1-\delta \cdot K_p) \right] + (1+\delta^2)} \quad (3-15)$$



Obrázok 3-8: Typické rozloženie zvislého napätia v telese násypu [7]

Veľkosť napätia pôsobiaceho na základovú pôdu je určená hodnotou medzi výsledkami z rovníc 3-14 a 3-15. Metódou Hewlitta a Randolpha dostávame typické rozdelenie napätia v telese násypu ako ukazuje Obr. 3-8. Tento prístup prináša lepšie výsledky klenbového efektu ako metóda BS 8006, pretože berie do úvahy pevnostné charakteristiky zeminý násypu. [7]

3.5 Nemecká metóda EBGEO 2004



Obrázok 3-9: „Multi-arching“ model [7]

Nemecká metóda EBGEO (Empfehlungen für den Entwurf und die Berechnung von Erdkörpern mit Bewehrungen aus Geokunststoffen – Odporúčania pre návrh a analýzu geosyntetikami vystužených zemných konštrukcií) 2004 kapitola 6.9 je odporúčanie pre návrh násypov budovaných nad piliermi vydaných Nemeckou geotechnickou spoločnosťou (Deutsche Gesellschaft für Geotechnik) v júli 2004. Táto metóda preberá teóriu viacvrstvovej klenby (multi-arching) podľa Kerperta a kol. (1997). Metóda vychádza z teórie Hewletta a Randolpha (1988) s modifikáciou pre nízke násypy využívajúcu teóriu viacvrstvovej klenby. V novom prístupe, Kerpert a kol. uvažuje kupolovité oblúky klenúce sa medzi piliermi ako ukazuje (Obr. 3-9). Zvislé napätie v najnižšej vrstve (klenbe) σ'_{z0} môžeme napísať ako:

$$\sigma'_{z0} = \lambda_1^\chi \cdot \left(\gamma_{emb,k} + \frac{q_k}{h} \right) \cdot \left[h \cdot (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} + h_g \cdot \left(\left(\lambda_1 + \frac{h_g^2 \cdot \lambda_2}{4} \right)^{-\chi} - (\lambda_1 + h_g^2 \cdot \lambda_2)^{-\chi} \right) \right] \quad (3-16)$$

kde:

$$\chi = \frac{d(K_p - 1)}{\lambda_2 \cdot s_d}; \quad \lambda_1 = \frac{1}{8}(s_d - d)^2; \quad \lambda_2 = \frac{s_d^2 + 2d \cdot s_d - d^2}{2 \cdot s_d^2} \quad (3-17)$$

$$K_p = \text{tg}^2(45^\circ + \phi/2) \quad (3-18)$$

h_g – výška klenby

$$h_g = h \text{ ak } h < s_d/2, h_g = s_d/2 \text{ ak } h > s_d/2 \quad (3-19)$$

$\gamma_{emb,k}$ – objemová tiaž zeminu násypu

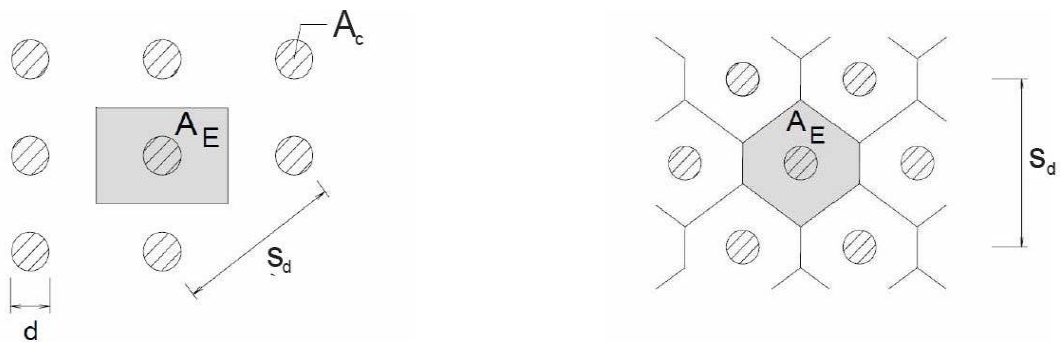
h – výška násypu

q_k – zaťaženie na povrchu násypu

Napätie pôsobiace na hlave pilierov môžeme napísať ako:

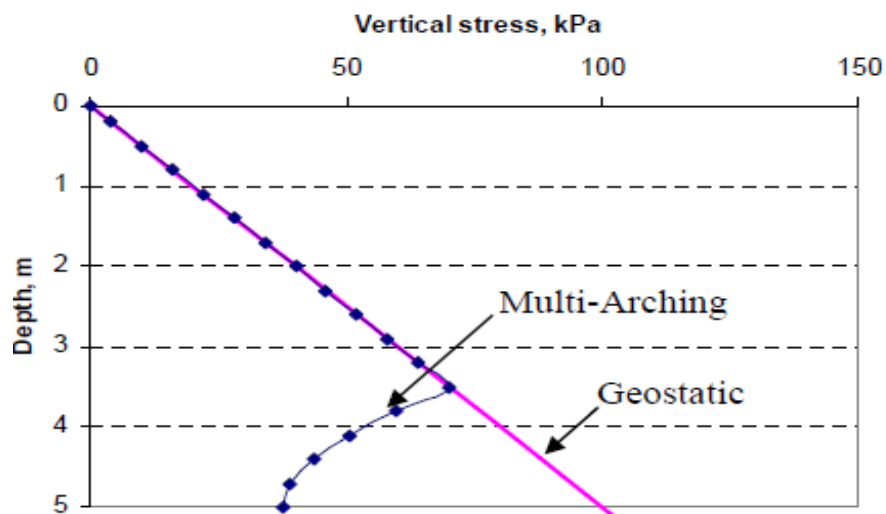
$$\sigma'_p = ((\gamma_{emb,k} \cdot h + q_k) - \sigma'_{z0}) \cdot (A_E/A_C) + \sigma'_{z0} \quad (3-20)$$

Kde A_C je plocha piliera a A_E je plocha elementárnej bunky podľa Obr. 3-8.



Obrázok 3-10: Oblasť uvažovanej elementárnej bunky pre štvorcový a trojuholníkový raster [8]

Obr. 3-11 ukazuje rozdelenie zvislého napätia v telese násypu medzi piliermi. „Multi-arching“ model bol vyvinutý s cieľom zlepšiť model rozdeľovania napätia v telese násypu. [7] [8]



Obrázok 3-11: Rozdelenie napätia v telese násypu podľa „Multi-arching“ modelu [7]

4 ANALÝZA KLENBOVÉHO EFEKTU

Cieľom diplomovej práce je analýza vplyvu zmeny rôznych parametrov na vývoj klenbového efektu. Klenba bola sledovaná pomocou faktoru koncentrácie napätia „ n “ (rovnica 3-1), ktorý je jedným z parametrov zhodnocujúcich klenbu. Čím vyššia je hodnota „ n “, tým je klenbový efekt účinnejší. Klenbový efekt sa neprejavuje, ak je hodnota $n = 1$. Je to pomer napätia koncentrovaného na pilieri " σ_p " k napätiu nad zeminou v úrovni terénu " σ_z ". To znamená, že bola sledovaná koncentrácia napätia nad pilierom a nad zeminou medzi piliermi, v úrovni terénu. Výpočet bol realizovaný analyticky pomocou Novej nemeckej metódy a ďalej numericky. Nová nemecká metóda (NNM) bola zvolená, pretože sa vďaka nej dá určiť napätie na pilieri aj na zemine medzi piliermi a narozdiel od ostatných analytických metód zohľadňuje vplyv rastru pilierov i niektoré materiálové charakteristiky materiálu násypu. Numerické modelovanie bolo uskutočnené prostredníctvom priestorového modelu. Pre účely numerického modelovania bol vybraný program Plaxis 3D.

Násypové teleso je vysoké 4,5 m a pri numerickom modelovaní je uvažovaná výstavba po 6 vrstvách o mocnostiach 4 x 0,5 m, 1 x 1 m a 1 x 1,5 m. Uvažovaná doba vybudovania jednej vrstvy o mocnosti 0,5 m je 1 deň, vrstvy o mocnosti 1 m je 2 dni a vrstvy mocnosti 1,5 m je 3 dni. Celkovo teda 9 dní. Pod násypom sú uvažované štrkové piliere s priemerom 0,7 m. Osová vzdialenosť pilierov je 1,4 m v trojuholníkovom rastru a dĺžka pilierov je 8 m. Hladina podzemnej vody je uvažovaná v úrovni terénu. V priečnom reze je terén uvažovaný vodorovný.

Pri výpočtoch v programe Plaxis bol uvažovaný konštitučný model Mohr-Coulomb (MC). Materiálové charakteristiky uvažovaných zemín sú zobrazené v nasledujúcich tabuľkách.

Íl, materiál podložia (Tabuľka 4-1)

Materiál násypu (Tabuľka 4-2)

Materiál Š.P. (Tabuľka 4-3)

Tabuľka 4-1: Materiálové charakteristiky ílu pre numerický model

γ	kN/m ³	objemová hmotnosť zeminy	16,5
γ_{sat}	kN/m ³	objemová hmotnosť saturovanej zeminy	18,5
ϕ'	°	uhol vnútorného trenia	29
c'	kPa	súdržnosť	1
ψ	°	uhol dilatancie	0
e_{int}	-	číslo pórovitosti	2,0
E_{oed}	kPa	edometrický modul	5100
$k_x=k_y$	m/deň	súčiniteľ priepustnosti v horizontálnom smere	1,00E-04
k_z	m/deň	súčiniteľ priepustnosti vo vertikálnom smere	7,00E-05

Tabuľka 4-2: Materiálové charakteristiky mat. násypu pre numerický model

γ	kN/m ³	objemová hmotnosť zeminy	18
γ_{sat}	kN/m ³	objemová hmotnosť saturovanej zeminy	19,5
ϕ'	°	uhol vnútorného trenia	40
c'	kPa	súdržnosť	1,0
ψ	°	uhol dilatancie	10
e_{int}	-	číslo pórovitosti	0,6
E_{oed}	kPa	edometrický modul	38000
$k_x=k_y$	m/deň	súčiniteľ priepustnosti v horizontálnom smere	1,7
k_z	m/deň	súčiniteľ priepustnosti vo vertikálnom smere	1,7

Tabuľka 4-3: Materiálové charakteristiky materiálu Š.P. pre numerický model

γ	kN/m ³	objemová hmotnosť zeminy	19
γ_{sat}	kN/m ³	objemová hmotnosť saturovanej zeminy	20,5
ϕ'	°	uhol vnútorného trenia	45
c'	kPa	súdržnosť	1,0
ψ	°	uhol dilatancie	15
e_{int}	-	číslo pórovitosti	0,5
E_{oed}	kPa	edometrický modul	69000
$k_x=k_y$	m/deň	súčiniteľ priepustnosti v horizontálnom smere	1,7
k_z	m/deň	súčiniteľ priepustnosti vo vertikálnom smere	1,7

4.1 Analýza Nemeckou metódou EBGEO 2004

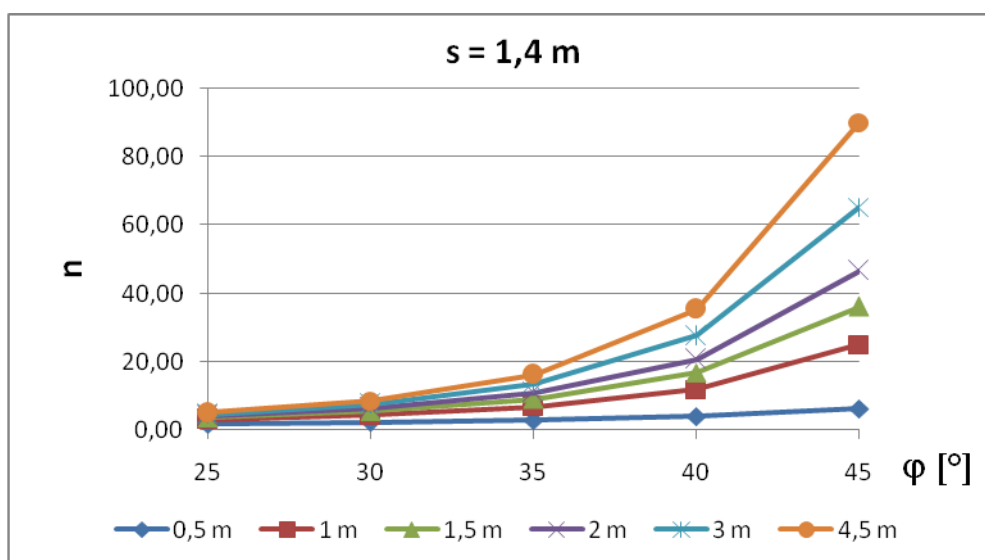
Pre tieto výpočty bol zvolený klasický tabuľkový program MS Excel. Napätie nad zeminou medzi piliermi „ σ_z “ bolo počítané podľa vzorca (3-16) a napätie koncentrované nad pilierom „ σ_p “ podľa vzorca (3-20). Vo vzorci (3-20) je plocha „ A_E “ počítaná ako:

$$A_E = \pi \cdot (D_e)^2 / 4, \quad (4-1)$$

kde D_e je priemer elementárnej bunky počítaný pre trojuholníkový raster podľa vzorca (2-1). Analýza Nemeckou metódou EBGEO 2004 bola založená na sledovaní klenbového efektu pri zmene výšky násypu (0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 3,0 a 4,5 m), zmene uhlu vnútorného trenia materiálu násypu (20, 25, 30, 35, 40 a 45°) a zmene osovej vzdialenosti pilierov (1,4; 2,1 a 2,8 m). Nemennými parametrami ostali objemová hmotnosť násypu $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$, priemer pilierov 0,7 m a zaťaženie na povrchu násypu $q_k = 0 \text{ kN/m}^2$.

Hodnoty vypočítaných napätí σ_z a σ_p sú zobrazené v prílohe. Výsledné hodnoty pomeru zlepšenia "n" sú zobrazené v troch tabuľkách, zvlášť pre každú osovú vzdialenosť. Zároveň je pre každú osovú vzdialenosť vykreslený graf, ktorý ukazuje vzťah uhlu vnútorného trenia násypu a hodnoty n, pre rôzne výšky násypu.

- $s = 1,4 \text{ m}$

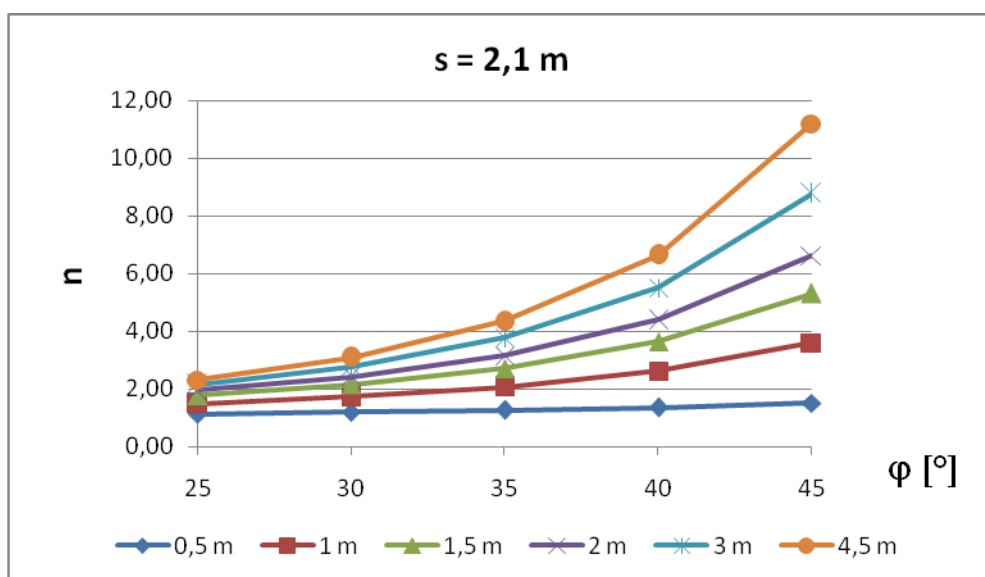


Obrázok 4-1: Vzťah ϕ a n pri osovej vzdialenosti $s = 1,4 \text{ m}$, pre rôzne výšky násypu

Tabuľka 4-4: Hodnoty pomeru "n" v závislosti na zmene výšky a uhlu vnútorného trenia násypu pri osovej vzdialenosti 1,4 m

$s = 1,4 \text{ m}$		uhol vútorného trenia φ [°]				
		25	30	35	40	45
výška násypu [m]	0,5	1,78	2,18	2,85	4,00	6,30
	1	3,02	4,34	6,79	11,93	25,01
	1,5	3,65	5,51	9,06	16,72	36,20
	2	4,07	6,36	10,86	20,79	46,59
	3	4,59	7,52	13,58	27,59	65,32
	4,5	5,02	8,55	16,25	35,33	90,10

- $s = 2,1 \text{ m}$

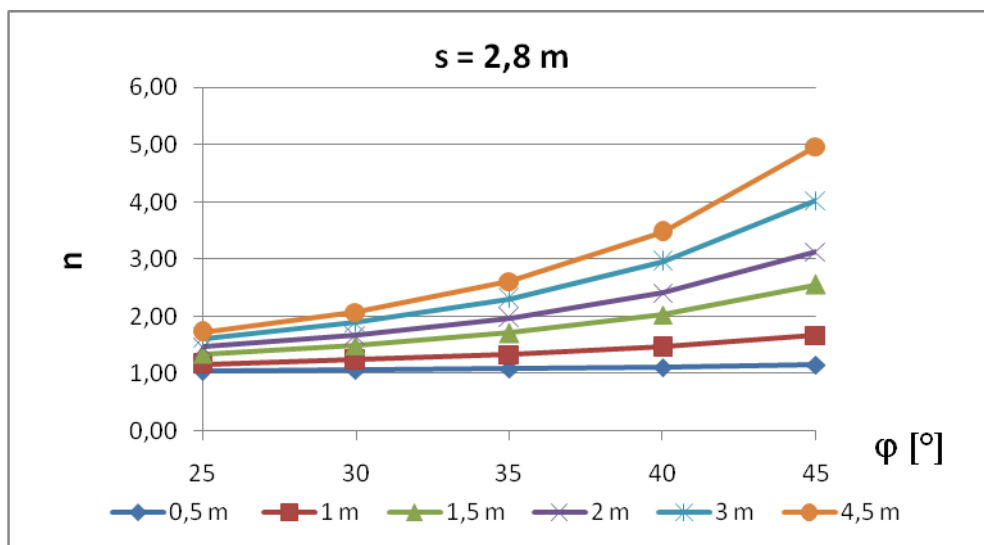


Obrázok 4-2: Vzťah φ a n pri osovej vzdialenosti $s = 2,1 \text{ m}$, pre rôzne výšky násypu

Tabuľka 4-5: Hodnoty pomeru "n" v závislosti na zmene výšky a uhlu vnútorného trenia násypu pri osovej vzdialenosti 2,1 m

$s = 2,8 \text{ m}$		uhol vútorného trenia φ [°]				
		25	30	35	40	45
výška násypu [m]	0,5	1,13	1,18	1,26	1,35	1,50
	1	1,49	1,72	2,06	2,61	3,59
	1,5	1,77	2,14	2,71	3,64	5,3
	2	1,94	2,42	3,16	4,38	6,61
	3	2,15	2,77	3,78	5,50	8,77
	4,5	2,31	3,07	4,34	6,63	11,19

- $s = 2,8 \text{ m}$



Obrázok 4-3: Vzťah ϕ a n pri osovej vzdialenosti $s = 2,8 \text{ m}$, pre rôzne výšky násypu

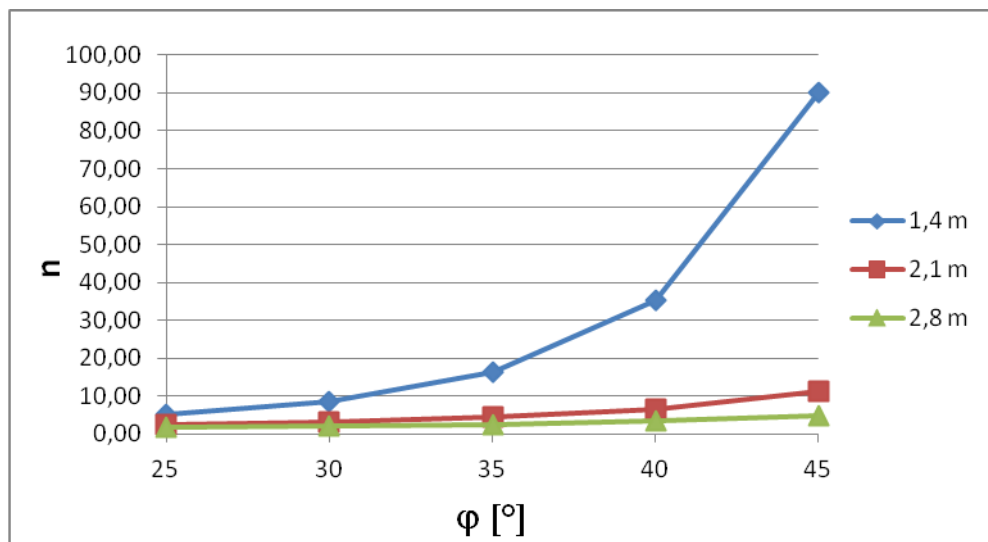
Tabuľka 4-6: Hodnoty pomeru " n " v závislosti na zmene výšky a uhlu vnútorného trenia násypu pri osovej vzdialenosti $2,8 \text{ m}$

$s = 2,8 \text{ m}$		uhol vútorného trenia ϕ [°]				
		25	30	35	40	45
výška násypu [m]	0,5	1,05	1,06	1,08	1,11	1,15
	1	1,17	1,24	1,33	1,46	1,67
	1,5	1,35	1,50	1,71	2,03	2,55
	2	1,47	1,67	1,97	2,41	3,13
	3	1,61	1,90	2,31	2,96	4,03
	4,5	1,73	2,08	2,61	3,47	4,97

4.1.1 Diskusia

Ako je vidieť z predchádzajúcich grafov (Obrázky 4-1, 4-2 a 4-3), podľa nemeckej metódy EBGeo hodnota pomeru " n " stúpa so zvyšujúcou sa pevnosťou násypu (charakterizovanou uhlom vnútorného trenia násypu) pri všetkých troch skúmaných osových vzdialenostiach. Najväčšie hodnoty sú pri $\phi = 45^\circ$, najmenšie pri $\phi = 25^\circ$. Zároveň sa hodnota " n " zväčšuje s rastúcou výškou násypu. Vo všetkých prípadoch bol pomer napätí najmenší pri výške násypu $0,5 \text{ m}$ a najväčší pri výške $4,5 \text{ m}$. Obrázok 4-4 ukazuje porovnanie závislostí " ϕ " a " n " pre rôzne osové vzdialenosti pilierov pri výške

násypu 4,5 m. Pri najmensej hodnote $s = 1,4$ m (pomer $s/D = 2$) sú hodnoty "n" až nereálne vysoké ($n = 90,1$), zatiaľ čo pri $s = 2,8$ m ($s/D = 4$) je hodnota pomeru napätí maximálne 4,97. Celkovo sú hodnoty n väčšie pri menšej osovej vzdialenosti Š.P.

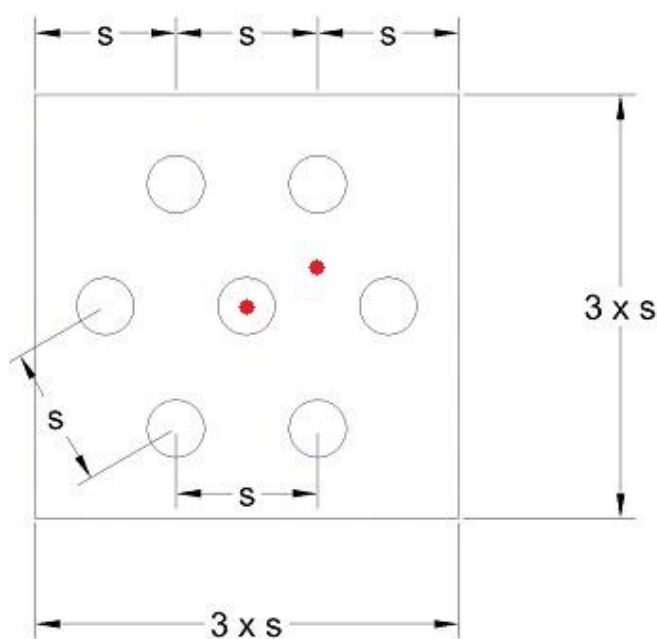


Obrázok 4-4: Porovnanie vzťahu uhlu vnútorného trenia násypu a "n" pri rôznych osových vzdialenostiach (hodnoty n sú pri výške násypu 4,5 m)

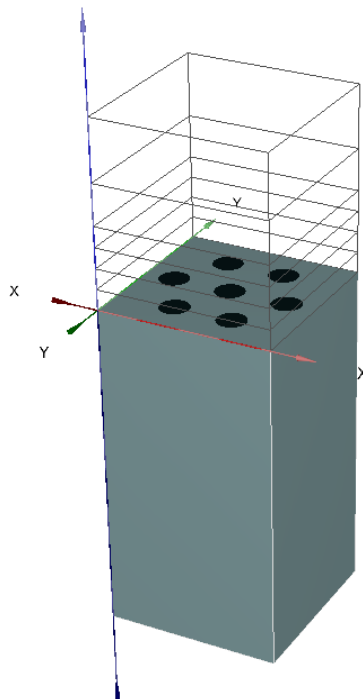
Analýza Nemeckou metódou EBGeo ukázala vplyv zmeny rôznych parametrov na vývoj klenbového efektu, resp. faktoru koncentrácie napätia. Bola sledovaná zmena hodnoty „n“ pri zmene výšky násypu, osovej vzdialenosti pilierov a uhlu vnútorného trenia. Nová nemecká metóda ale nedokáže zohľadniť zmenu ďalších parametrov, akými sú tuhosť štrkových pilierov, resp. deformačný modul „E“ alebo uhol vnútorného trenia materiálu Š.P. Aj tieto parametre boli zohľadnené pri numerickom modelovaní a budú opísané v nasledujúcich kapitolách.

4.2 Analýza v programe Plaxis 3D

Pre účely numerického modelovania bol zvolený program Plaxis 3D. Výpočty boli uskutočnené pre konštitučný model Mohr-Coulomb. Materiálové charakteristiky sú uvedené v Tabuľkách (4-1, 4-2, 4-3). Násypové teleso je vysoké 4,5 m. Je uvažovaná výstavba po 6 vrstvách o mocnostiach 4 x 0,5 m, 1 x 1 m a 1 x 1,5 m. Uvažovaná doba vybudovania jednej vrstvy o mocnosti 0,5 m je 1 deň, vrstvy o mocnosti 1 m je 2 dni a vrstvy mocnosti 1,5 m je 3 dni. Celkovo teda 9 dní. Hladina podzemnej vody je uvažovaná v úrovni terénu. V pričnom reze je terén uvažovaný vodorovný. Pre základný model boli uvažované štrkové piliere s priemerom 0,7 m. Osová vzdialenosť pilierov je 1,4 m v trojuholníkovom rastru. Dĺžka pilierov je 8 m a boli modelované 2 možnosti, pre neodvodnené aj odvodnené podmienky. Bolo sledované priemerné napätie v úrovni terénu na zemine (medzi štrkovými piliermi) a na hlave piliera (v strede modelu), tak ako je naznačené na Obrázku 4-5.



Obrázok 4-5: Pôdorys modelu v programe Plaxis 3D (s – osová vzd. pilierov), s vyznačenými miestami sledovania napätia (červené body)



Obrázok 4-6: Celkový pohľad na model

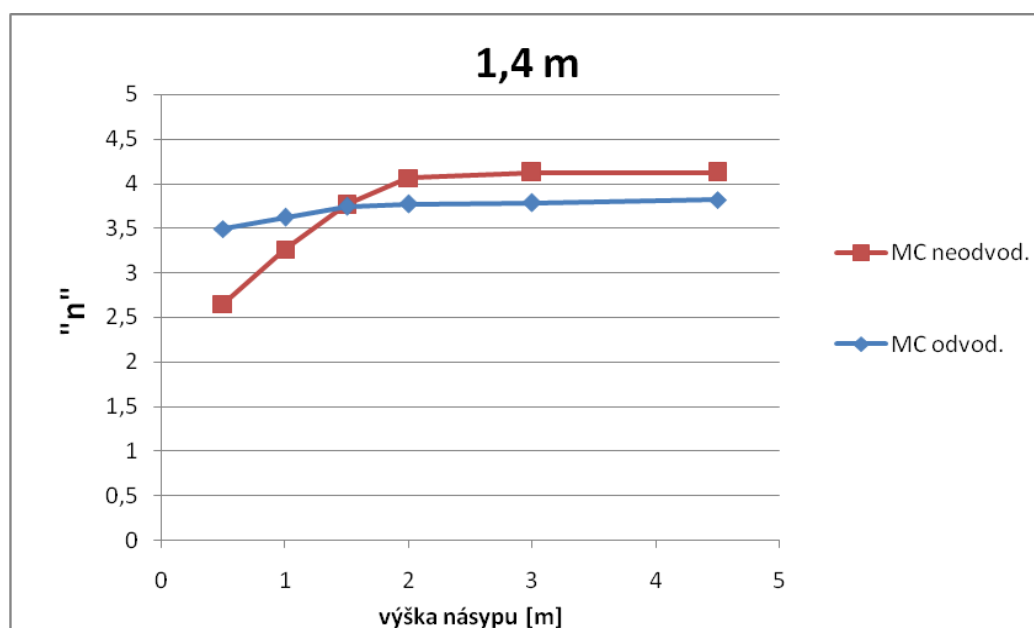
Podobne ako pri analýze metódou EBGeo, aj programom Plaxis 3D bol analyzovaný vplyv výšky násypu, osovej vzdialenosti pilierov a uhlu vnútorného trenia materiálu násypu a na klenbový efekt. Navyše bol sledovaný vplyv zmeny deformačného modulu materiálu Š.P. a uhlu vnútorného trenia materiálu Š.P. Hodnoty vypočítaných napätí σ_z a σ_p sú zobrazené v prílohe. Výsledné hodnoty pomeru zlepšenia "n" sú zobrazené v tabuľkách v nasledujúcich kapitolách.

4.2.1 Výška násypu

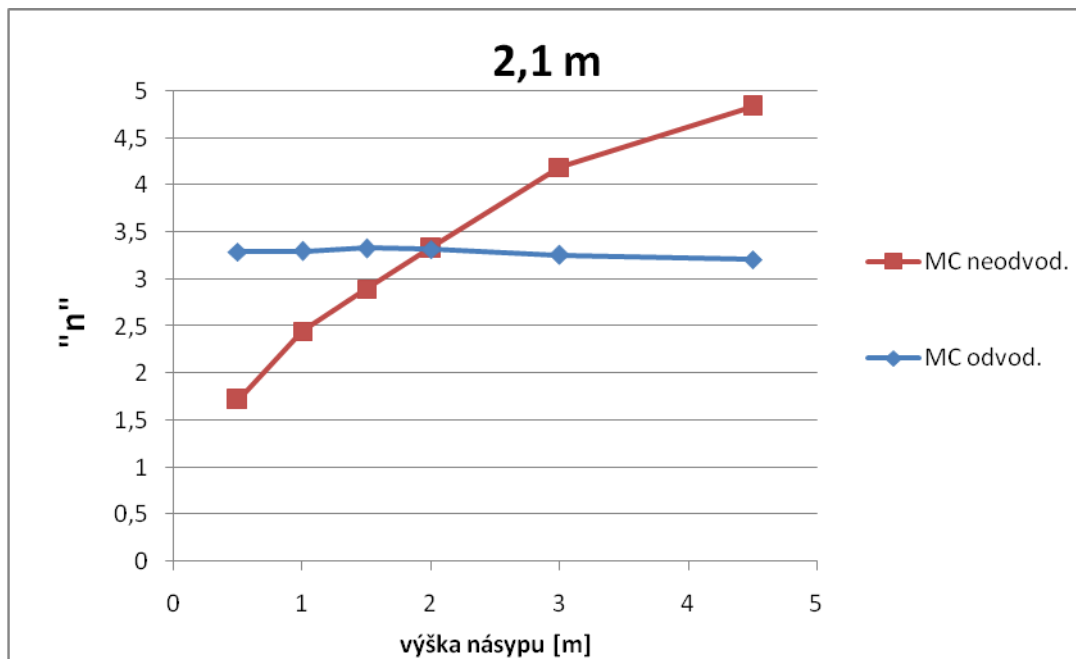
Pri analýze vplyvu výšky násypu sa vychádzalo zo základného modelu, menila sa výška násypového telesa, ktorého konečná výška je 4,5 m. Je uvažovaná výstavba po 6 vrstvách o mocnostiach 4 x 0,5 m, 1 x 1 m a 1 x 1,5 m. Materiálové charakteristiky sú uvedené v Tabuľkách (4-1, 4-2, 4-3). Výsledné hodnoty pomeru napätí sú spracované v Tabuľke 4-7 pre tri skúmané osové vzdialenosti. Pre každú osovú vzdialenosť bol uskutočnený výpočet pre odvodnené aj neodvodnené podmienky.

Tabuľka 4-7: Dosiahnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu výšky násypu

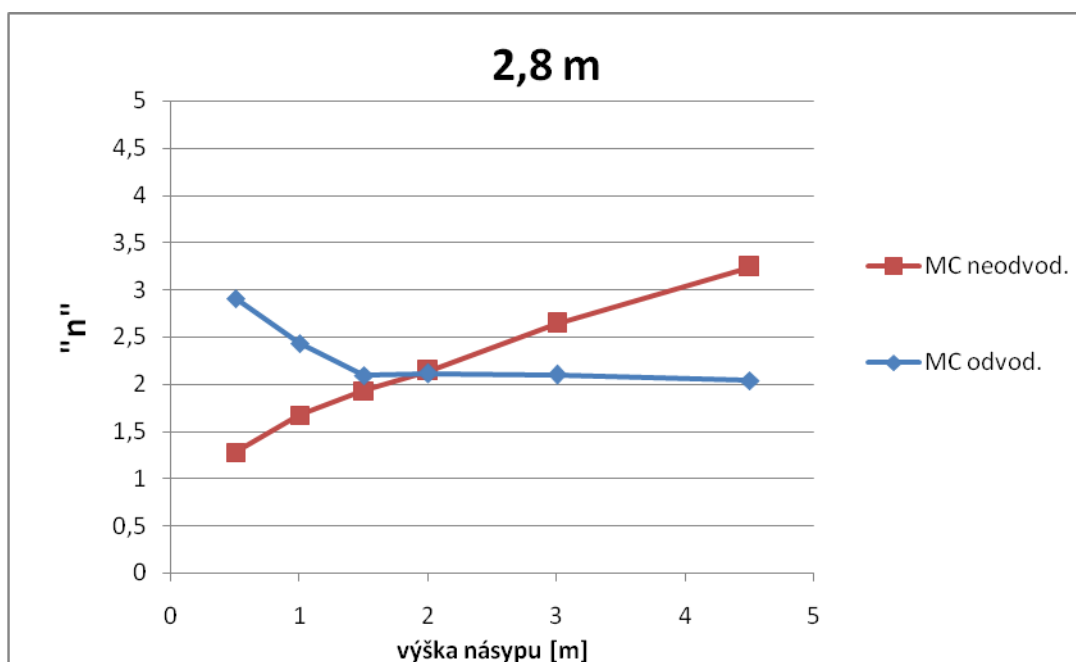
osová vzd.[m]	podmienky	konštitučný model	výška násypu [m]					
			0,5	1	1,5	2	3	4,5
1,4	neodvodnené	MC	2,65	3,26	3,76	4,06	4,12	4,12
	odvodnené	MC	3,49	3,62	3,74	3,77	3,78	3,82
2,1	neodvodnené	MC	1,72	2,45	2,9	3,33	4,19	4,84
	odvodnené	MC	3,29	3,3	3,33	3,32	3,26	3,21
2,8	neodvodnené	MC	1,28	1,67	1,93	2,14	2,64	3,24
	odvodnené	MC	2,91	2,43	2,09	2,11	2,1	2,04



Obrázok 4-7: Vplyv výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m



Obrázok 4-8: Vplyv výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m



Obrázok 4-9: Vplyv výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

Na Obrázkoch 4-7, 4-8, 4-9 sú grafy závislosti výšky násypu na faktor koncentrácie napätia. Je vidieť, že pri neodvodnených podmienkach hodnota „n“ narastá s výškou násypu, zatiaľ čo pri odvodnených podmienkach zostáva konštantná a pri osovej vzdialenosti 2,8 m dokonca hodnota „n“ klesá s rastúcim násypom. Najvyššie hodnoty

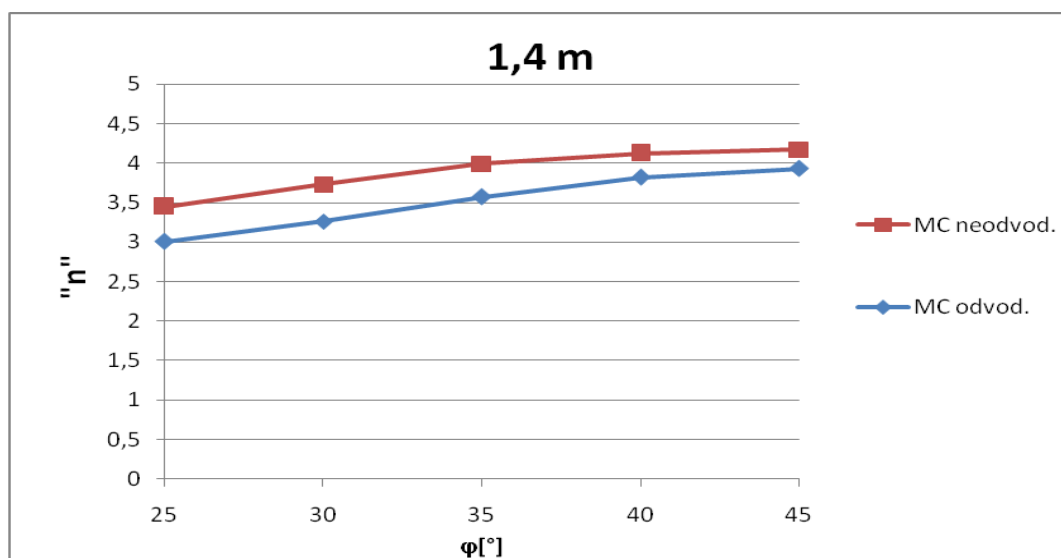
pomeru napätí boli sledované pri neodvodnených podmienkach a osovej vzdialenosti 2,1 m, zatiaľ čo najnižšie hodnoty boli získané pri odvodnených podmienkach.

4.2.2 Uhol vnútorného trenia násypu

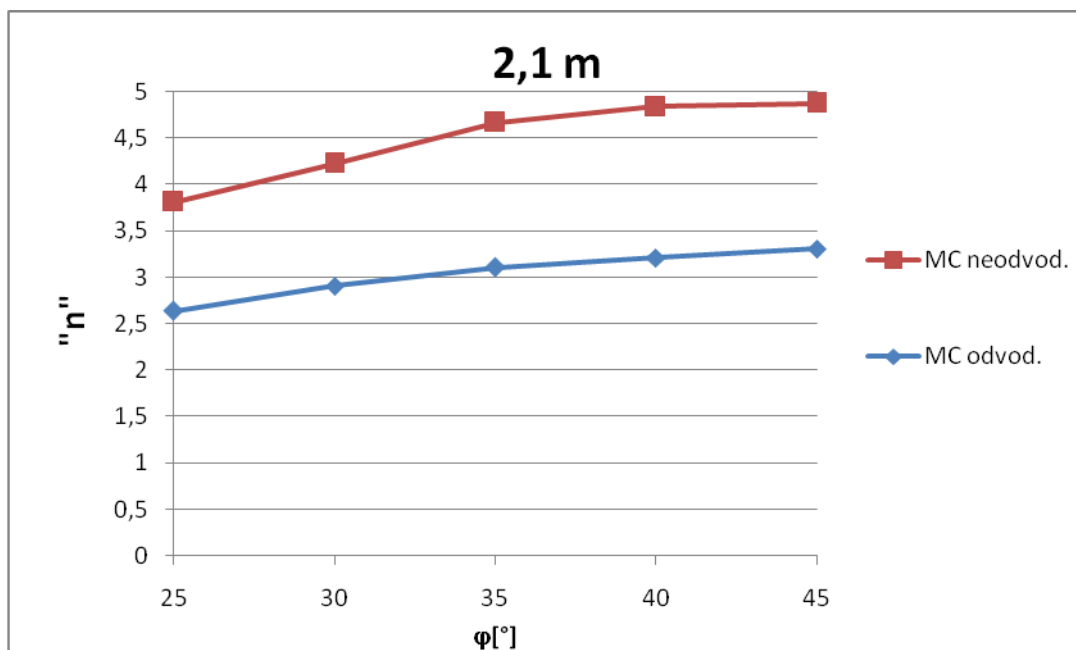
Analýza vplyvu zmeny uhlu vnútorného trenia vychádza zo základného modelu, pričom sa mení uhol vnútorného trenia materiálu násypu. Model bol počítaný pre hodnotu uhlu 25, 30, 35, 40 a 45°. Aj tu boli výpočty uskutočnené pre odvodnené aj neodvodnené podmienky. Hodnoty napätí σ_z a σ_p boli sledované pri výške násypu 4,5 m a sú zobrazené v prílohe. Výsledné hodnoty pomeru „n“ sú uvedené v Tabuľke 4-8 a graficky spracované na Obrázkoch 4-10, 4-11 a 4-12.

Tabuľka 4-8: Dosiahnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu

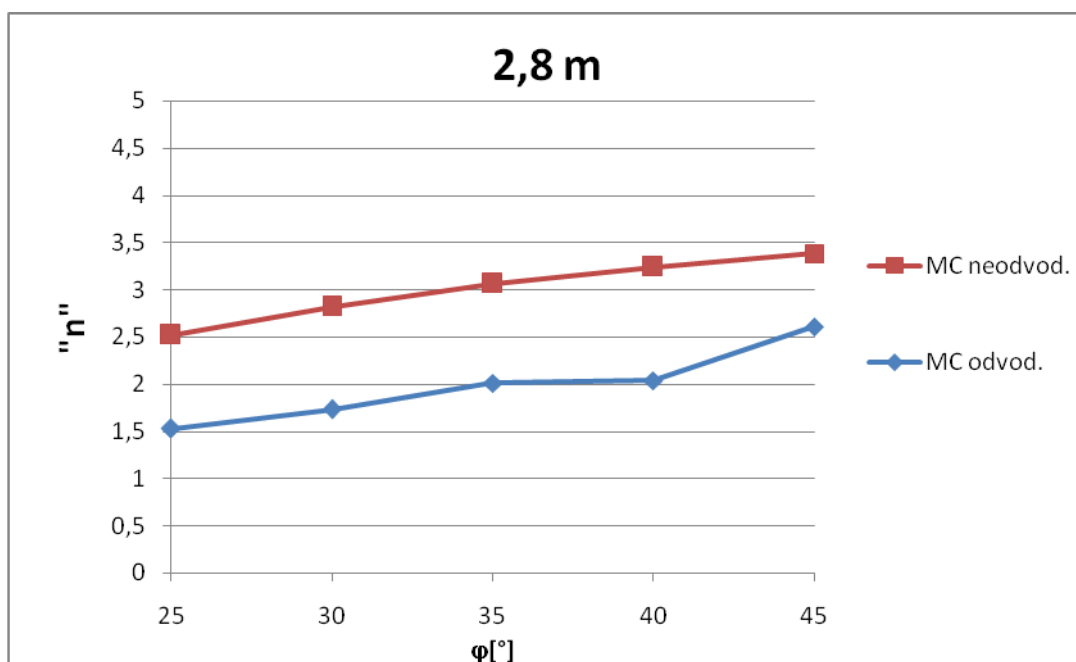
osová vzd.[m]	podmienky	konštitučný model	uhol vnútorného trenia [°]				
			25	30	35	40	45
1,4	neodvodnené	MC	3,45	3,73	3,99	4,12	4,17
	odvodnené	MC	3,01	3,26	3,57	3,82	3,93
2,1	neodvodnené	MC	3,81	4,23	4,67	4,84	4,88
	odvodnené	MC	2,64	2,91	3,11	3,21	3,31
2,8	neodvodnené	MC	2,52	2,82	3,06	3,24	3,38
	odvodnené	MC	1,53	1,73	2,01	2,04	2,61



Obrázok 4-10: Vplyv uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m



Obrázok 4-11: Vplyv uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m



Obrázok 4-12: Vplyv uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

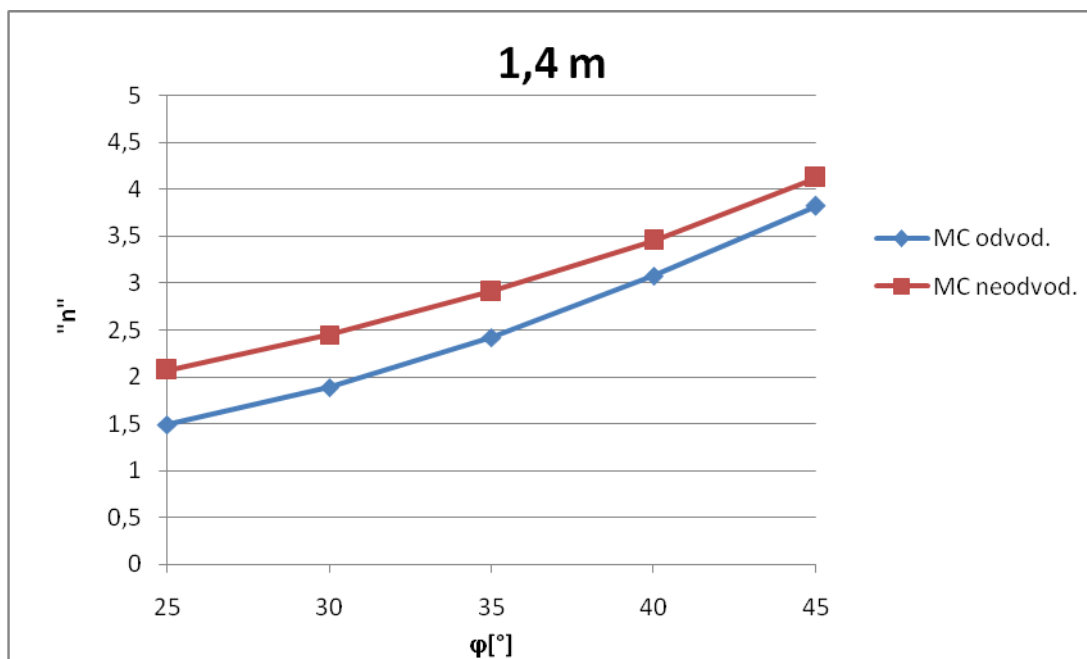
Z grafov závislostí uhlu vnútorného trenia násypu a pomeru napätí je vidieť, že zmena materiálu násypu, resp. pevnosti zeminy materiálu násypu (reprezentovaná uhlom vnútorného trenia) má na pomer napätí minimálny vplyv. So zvyšujúcou sa hodnotou uhlu zostáva hodnota faktoru koncentrácie napätia relatívne konštantná. Tak ako pri analýze vplyvu výšky násypu, aj tu sledujeme najvyššie hodnoty pri osovej vzdialenosti 2,1 m a najnižšie pri 2,8 m a zároveň najvyššie hodnoty pomeru napätí neodvodnených podmienkach a najnižšie hodnoty pri odvodnených podmienkach.

4.2.3 Uhol vnútorného trenia pilierov

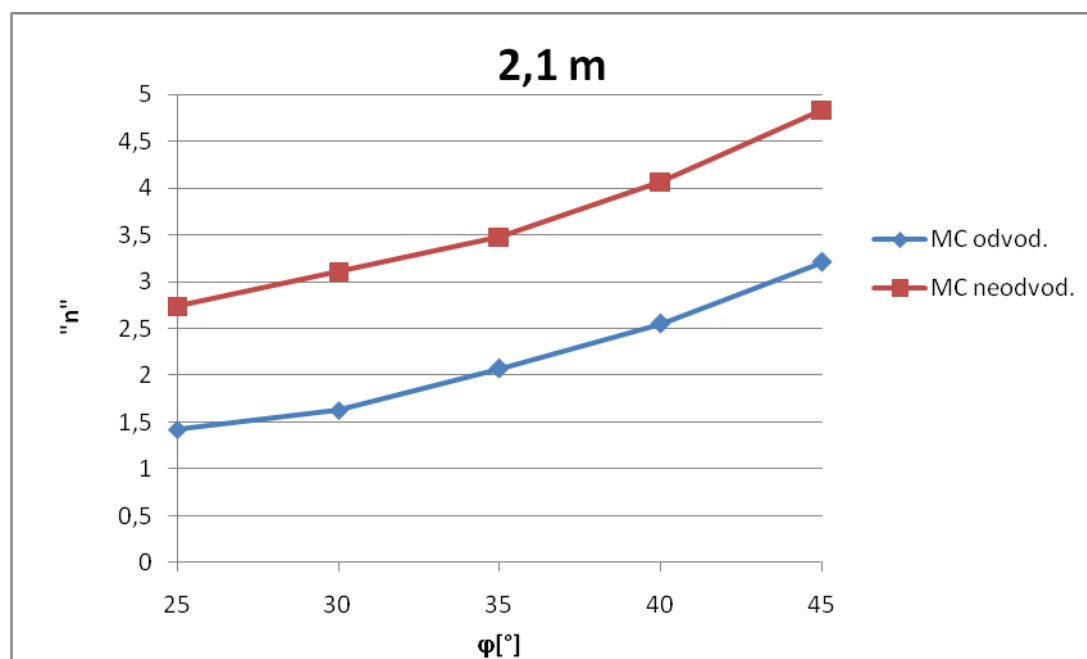
Táto analýza vychádzala tiež zo základného modelu, avšak menila sa hodnota uhlu vnútorného trenia materiálu pilierov. Boli sledované hodnoty napätí σ_z a σ_p v úrovni terénu pri výške násypu 4,5 m. Model bol počítaný pre hodnotu uhlu 25, 30, 35, 40 a 45°. Takisto ako pri ostatných analýzach, aj tu bol model počítaný pre neodvodnené aj odvodnené podmienky. Výsledné hodnoty pomeru „n“ sú uvedené v Tabuľke 4-9 a graficky spracované na Obrázkoch 4-13, 4-14 a 4-15.

Tabuľka 4-9: Dosiahnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu uhlu vnútorného trenia materiálu štrkových pilierov

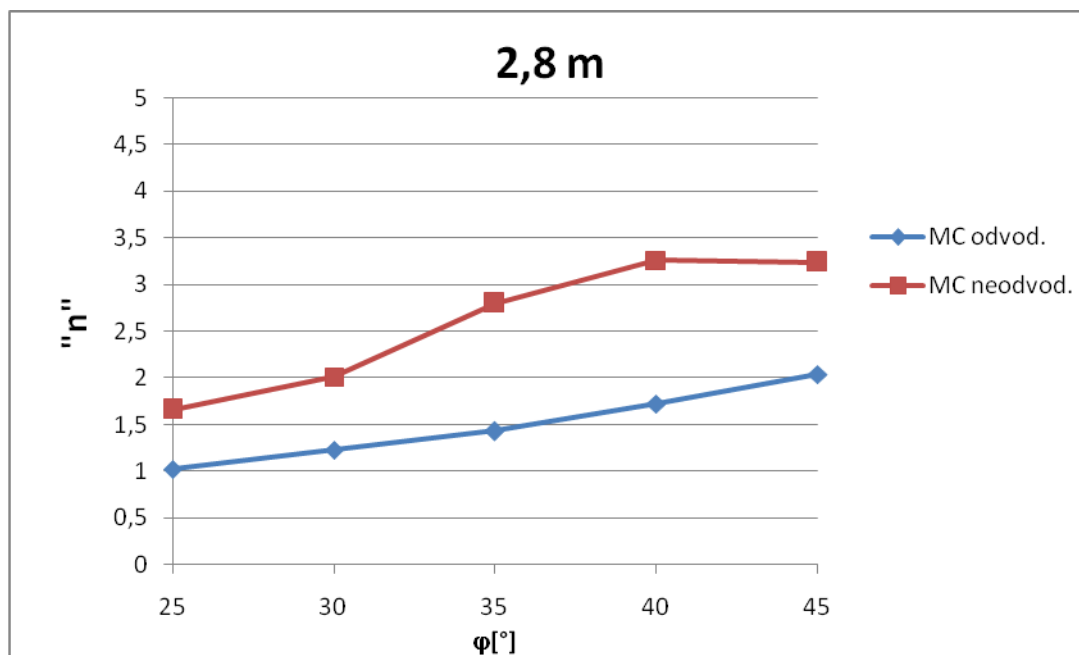
osová vzd.[m]	podmienky	konštitučný model	uhol vnútorného trenia [°]				
			25	30	35	40	45
1,4	neodvodnené	MC	2,07	2,45	2,91	3,45	4,12
	odvodnené	MC	1,49	1,89	2,42	3,08	3,82
2,1	neodvodnené	MC	2,74	3,11	3,48	4,07	4,84
	odvodnené	MC	1,42	1,63	2,07	2,55	3,21
2,8	neodvodnené	MC	1,66	2,01	2,8	3,26	3,24
	odvodnené	MC	1,02	1,23	1,43	1,72	2,04



Obrázok 4-13: Vplyv uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m



Obrázok 4-14: Vplyv uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m



Obrázok 4-15: Vplyv uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

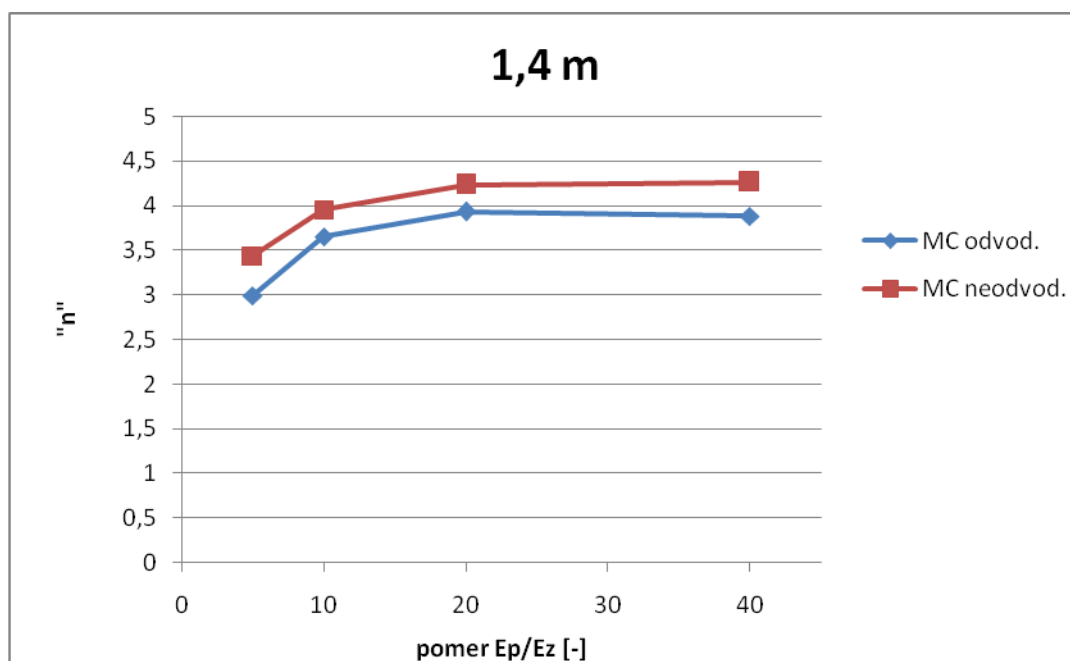
Z predchádzajúcich grafov je vidieť ako pevnosť pilierov charakterizovaná uhlom vnútorného trenia vplyva na pomer napätí. So zvyšujúcou sa hodnotou φ sa zvyšuje aj hodnota pomeru napätí a teda aj prenos zaťaženia do pilierov je výraznejší. Ako v predchádzajúcich prípadoch, aj tu boli najvyššie hodnoty získané pri osovej vzdialenosti 2,1 m a najmenšie pri $s = 2,8$ m. Môžeme konštatovať, že so zvyšujúcou sa šmykovou pevnosťou pilierov sa zväčšuje aj prenos zaťaženia do nich.

4.2.4 Tuhosť pilierov

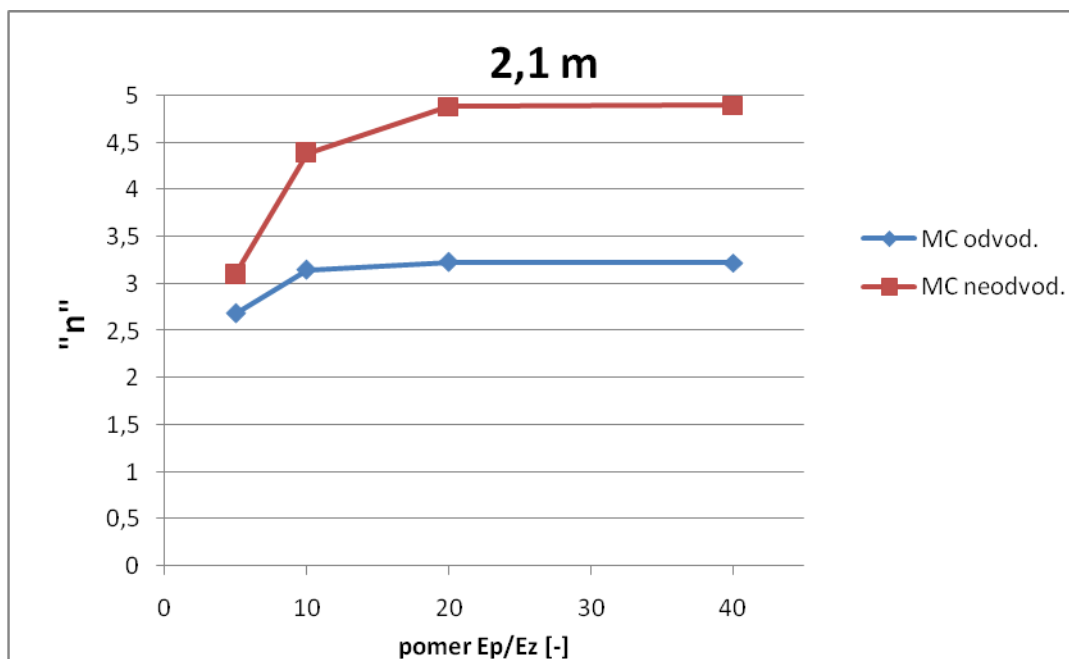
Analýza vplyvu zmeny tuhosti pilierov na pomer napätí vychádza zo základného modelu, pričom sa mení modul E materiálu pilierov tak, že pomer modulov pilierov a zeminy (E_p/E_z) je 5, 10, 20 a 40. Takisto ako pri ostatných analýzach, aj tu bol model počítaný pre neodvodnené aj odvodnené podmienky. Hodnoty napätí σ_z a σ_p boli sledované pri výške násypu 4,5 m a sú zobrazené v prílohe. Výsledné hodnoty pomeru „n“ sú uvedené v Tabuľke 4-10 a graficky spracované na Obrázkoch 4-16, 4-17 a 4-18.

Tabuľka 4-10: Dosaiahnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu tuhosti štrkových pilierov

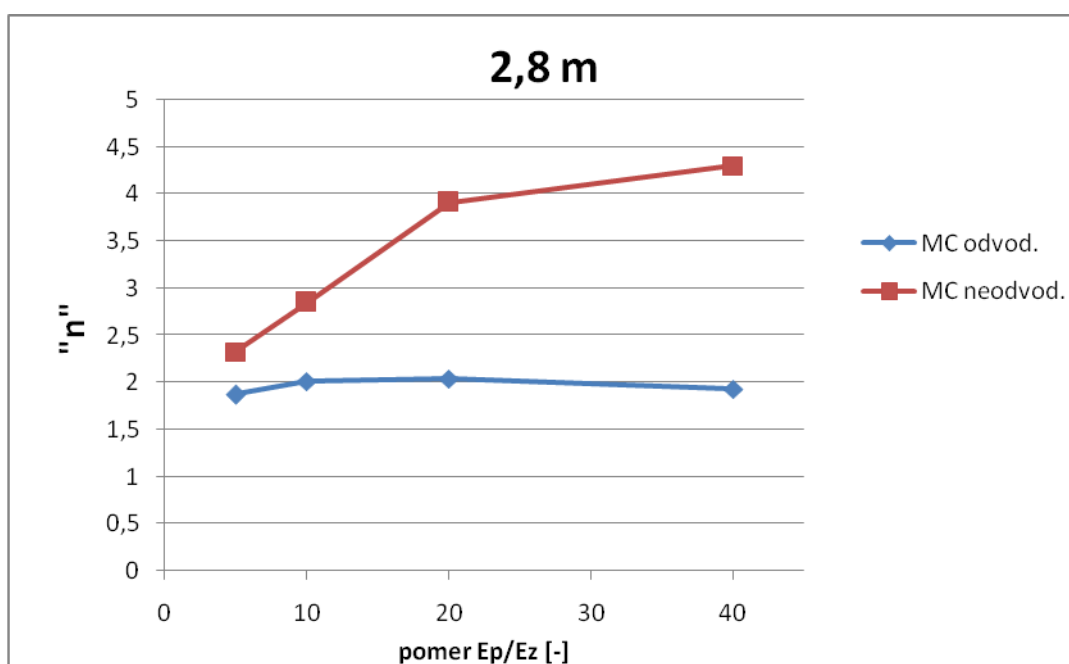
osová vzd.[m]	podmienky	konštitučný model	pomer modulov E_p/E_j [-]			
			5	10	20	40
1,4	neodvodnené	MC	3,44	3,96	4,23	4,26
	odvodnené	MC	3,00	3,66	3,93	3,88
2,1	neodvodnené	MC	3,10	4,39	4,89	4,90
	odvodnené	MC	2,69	3,15	3,23	3,23
2,8	neodvodnené	MC	2,32	2,85	3,91	4,30
	odvodnené	MC	1,87	2,01	2,04	1,93



Obrázok 4-16: Vplyv tuhosti pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m



Obrázok 4-17: Vplyv tuhosti pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m



Obrázok 4-18: Vplyv tuhosti pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

Ako aj pri predchádzajúcich analýzach, aj tu je hodnota pomeru „n“ najväčšia pri osovej vzdialenosti 2,1 m a pri neodvodnom výpočte. Z obrázkov je vidieť, že hodnota „n“ stúpa maximálne do pomeru modulov 20 a pri vyššom pomere modulov je pomer napätí už ďalej konštantný.

4.2.5 Diskusia

Ako je vidieť z predchádzajúcich grafov, numerickým modelovaním v programe Plaxis3D sú hodnoty pomeru "n" vždy najmenšie pri **osovej vzdialenosti** 2,8 m (pomer $s/D = 4$). Dá sa povedať, že pri skúmanej hodnote $s = 2,1$ m (pomer $s/D = 3$) a neodvodnených podmienkach sa klenbový efekt prejavuje najviac, zatiaľ čo pri odvodnených podmienkach faktor koncentrácie napätia klesá so zvyšujúcou sa osovou vzdialenosťou a to pri všetkých analýzach.

Zmena **výšky násypu** ovplyvňuje klenbový efekt len pri neodvodnených podmienkach a to tak, že s rastúcou výškou násypu sa zvyšuje aj pomer napätí. Najvyššie hodnoty boli dosiahnuté pri maximálnej výške 4,5 m. Pri odvodnených podmienkach zmena výšky násypu nemá väčší vplyv na zmenu hodnoty pomeru napätí a tá zostáva konštantná.

Podľa predchádzajúcich grafických závislostí zmena **uhlu vnútorného trenia násypu** nemá pri numerickom modelovaní väčší vplyv na klenbový efekt. Pomer napätí pri zmene uhlu ostáva relatívne konštantný.

Pri zmene **uhlu vnútorného trenia pilierov** sa so zväčšujúcou hodnotou φ zvyšovala aj hodnota pomeru napätí, ako pri odvodnených tak aj pri neodvodnených podmienkach. Klenbový efekt sa najviac prejavoval pri $\varphi = 45^\circ$ a najmenej pri $\varphi = 25^\circ$. Dá sa povedať, že klenbový efekt sa výraznejšie prejavuje so zväčšujúcou sa pevnosťou pilierov (danou uhlom vnútorného trenia).

Zmena **tuhosti pilierov** bola charakterizovaná pomerom tuhostí piliera a zeminy, kde tuhosť zeminy bola konštantná a menila sa tuhosť pilierov. Hodnota pomeru napätí výrazne stúpa do hodnoty pomeru $E_p/E_z = 10$ a od hodnoty $E_p/E_z = 20$ je pomer napätí už konštantný. T.z. že zvyšovanie tuhosti pilierov nad hodnotu pomeru $E_p/E_z = 20$ nemá vplyv na klenbový efekt.

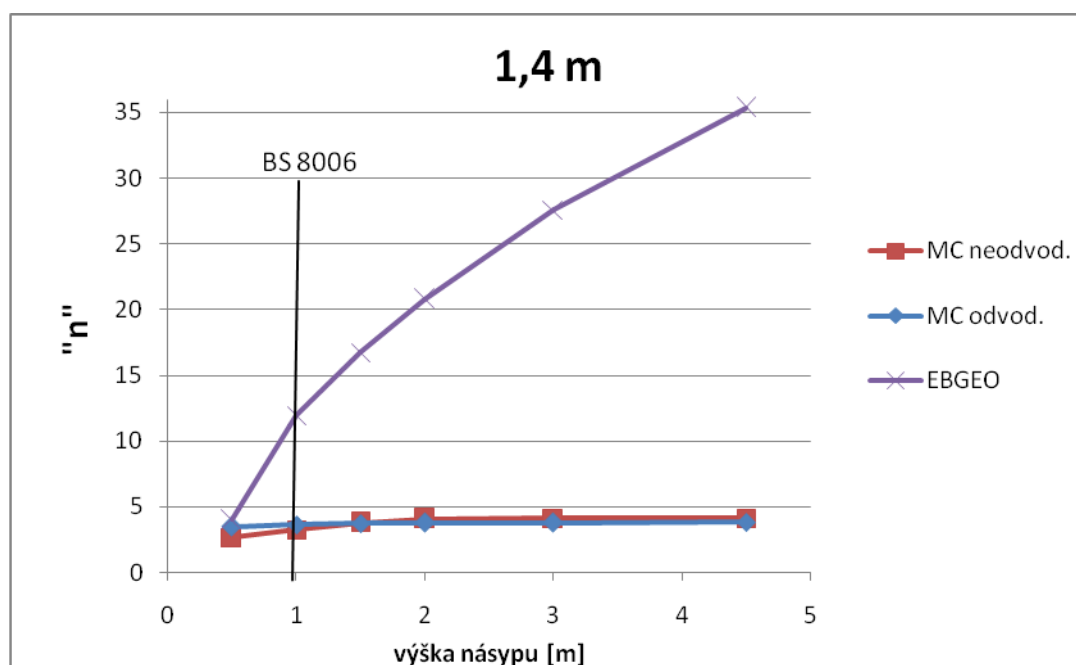
Celkovo bolo dosiahnutých vyšších hodnôt pomeru napätí pri **neodvodnených podmienkach**, t.z. že sa tu klenbový efekt výraznejšie prejavuje než pri **podmienkach odvodnených**.

4.3 Porovnanie výsledkov

V tejto kapitole budú porovnané výsledky získané numerickým modelovaním a výsledky počítané analytickými metódami a to pre analýzu vplyvu výšky násypu, uhlu vnútorného trenia násypu a pilierov.

4.3.1 Výška násypu

Na nasledujúcich obrázkoch sú grafy vplyvu výšky násypu na pomer napätí pre jednotlivé osovú vzdialenosti. Sú zobrazené výsledky z numerického modelovania, a výsledky výpočtov pomocou nemeckej metódy EBGEO.



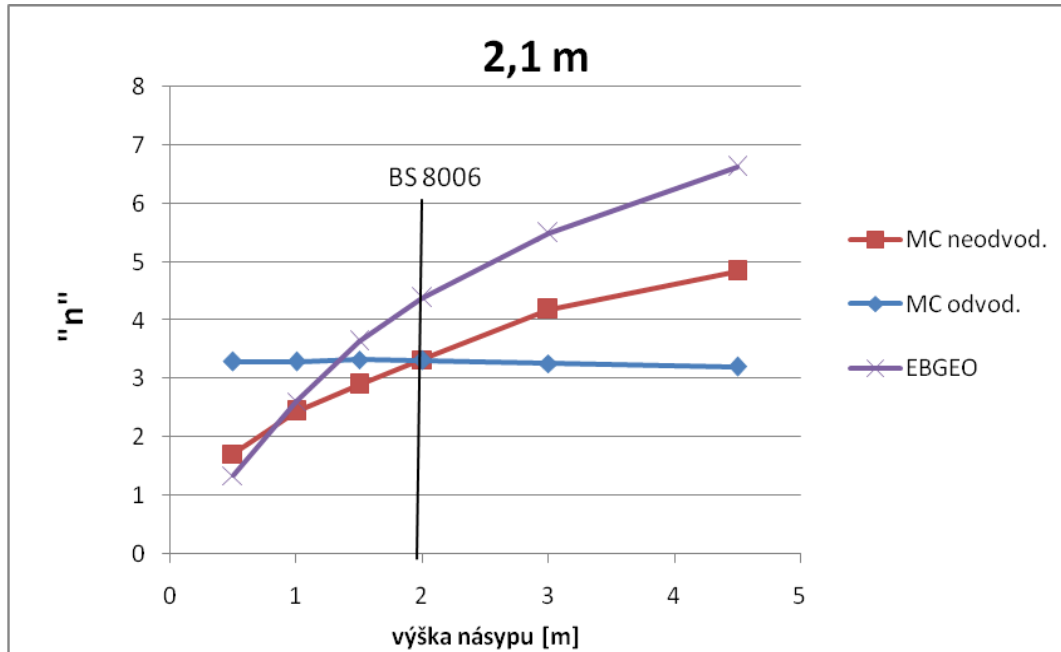
Obrázok 4-19: Porovnanie vplyvu výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m

Na obrázkoch je tiež graficky znázornená minimálna výška násypu potrebná pre plné rozvinutie klenby podľa metódy BS 8006. Táto výška je vypočítaná podľa vzorca (3-10) a pre konštantný priemer pilierov 0,7 m je táto hodnota pre jednotlivé osovú vzdialenosti:

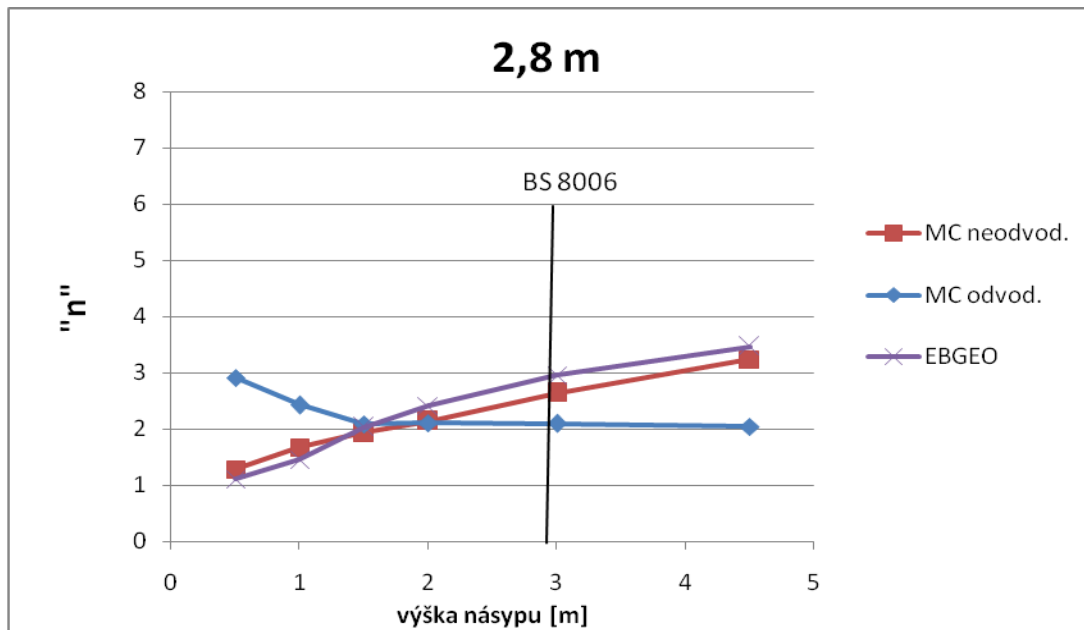
$$h_{1,4} = 1,4 \cdot (1,4 - 0,7) = 0,98 \text{ m}$$

$$h_{2,1} = 1,4 \cdot (2,1 - 0,7) = 1,96 \text{ m}$$

$$h_{2,8} = 1,4 \cdot (2,8 - 0,7) = 2,94 \text{ m}$$

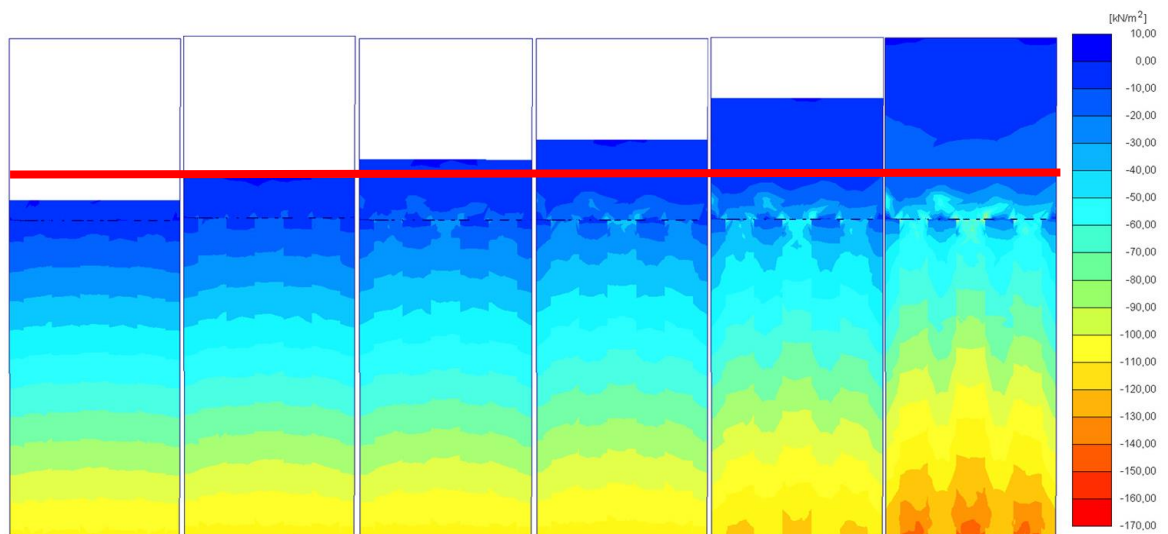


Obrázok 4-20: Porovnanie vplyvu výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m

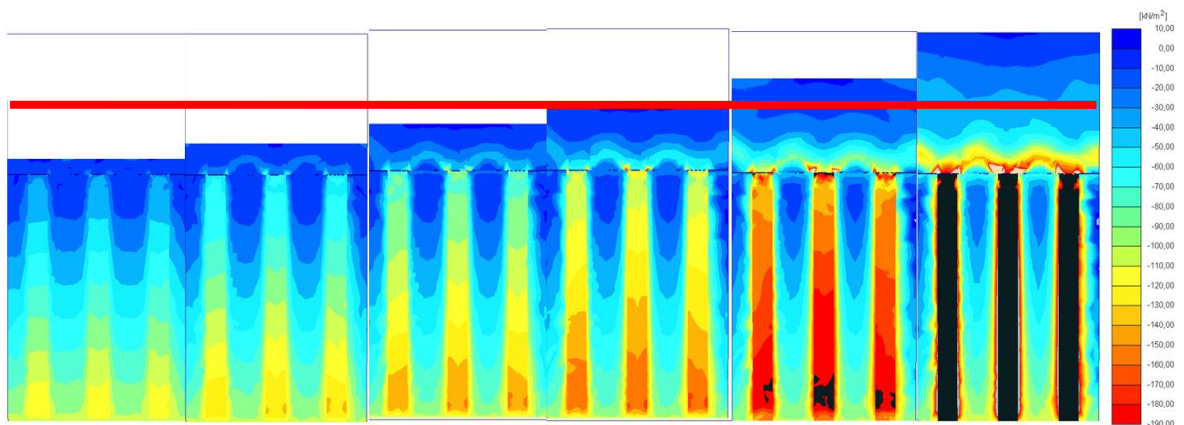


Obrázok 4-21: Porovnanie vplyvu výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

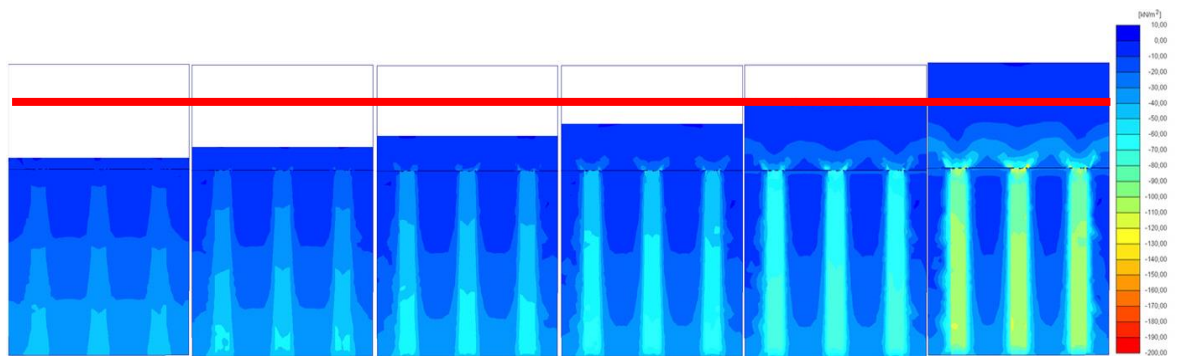
Pri najväčšej osovej vzdialenosti 2,8 m hodnota pomeru napätí výrazne nestúpa s rastúcou výškou násypu. Pri nižších osových vzdialenostiach hodnota pomeru napätí stúpa ďalej s rastúcou výškou násypu. Do grafov sú tiež vložené hodnoty "n" vypočítané nemeckou metódou EBGEO. Pri osovej vzdialenosti $s = 1,4$ m sú výsledky získané touto metódou nereálne vysoké v porovnaní s matematickým modelovaním. Pri nižších osových vzdialenostiach (2,1 a 2,8 m) sú hodnoty vypočítané metódou EBGEO realistickejšie a približujú sa hodnotám získaným pri numerickom modelovaní.



Obrázok 4-22: Vodorovné napätie σ_x v reze pre model s osovou vzd. 1,4 m



Obrázok 4-23: Vodorovné napätie σ_x v reze pre model s osovou vzd. 2,1 m



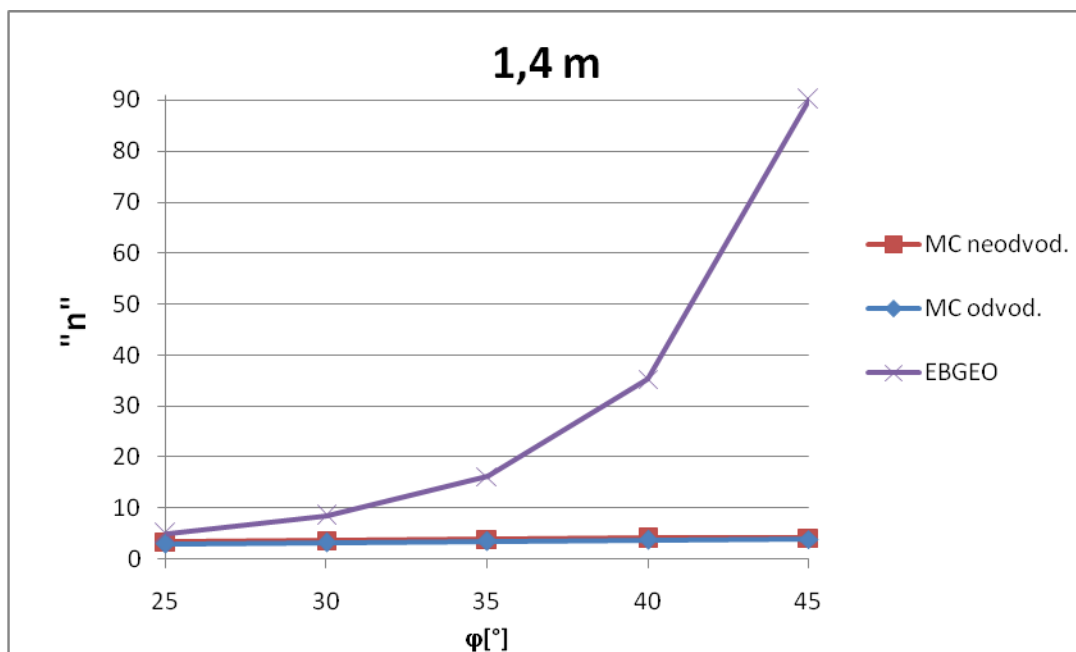
Obrázok 4-24: Vodorovné napätie σ_x v reze pre model s osovou vzd. 2,8 m

Na Obrázkoch 4-22 až 4-24 sú zobrazené vodorovné napätia σ_x pre modely s rôznou osovou vzdialenosťou. Rozvoj klenby je vidieť práve pri sledovaní vodorovných napätí. Na každom obrázku sú zobrazené jednotlivé fázy výstavby násypu a červenou vodorovnou čiarou je naznačená minimálna výška násypu potrebného pre úplné rozvinutie klenby podľa BS 8006. Je vidieť, že klenba síce nepresiahne danú výšku ale rozvíja sa ďalej so zvyšujúcou sa výškou násypu.

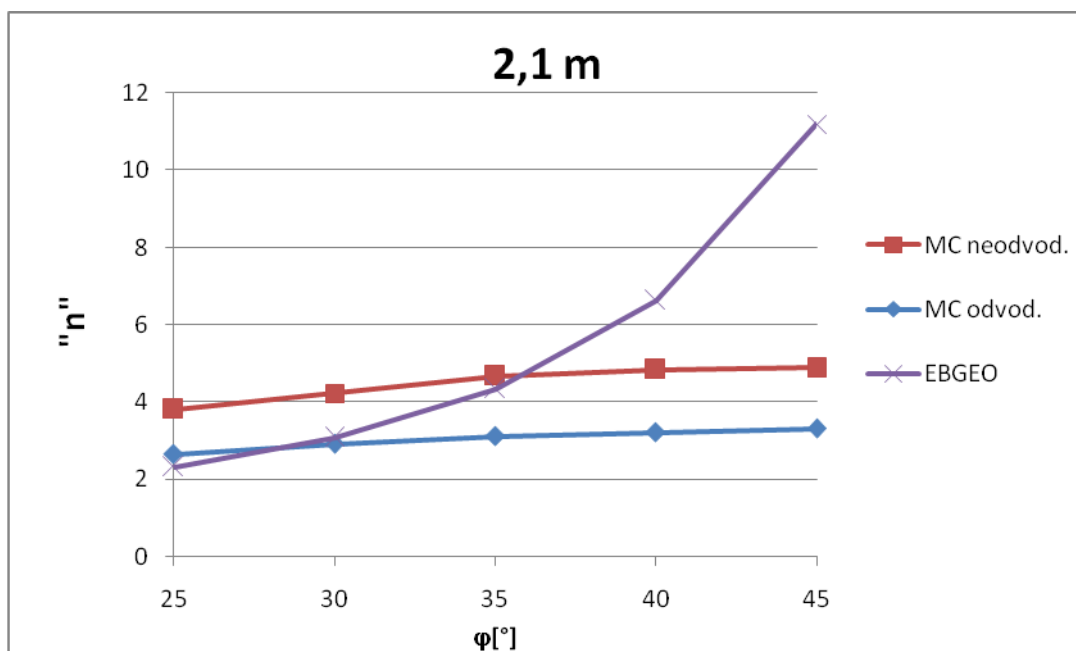
4.3.2 Uhol vnútorného trenia násypu

Do grafov pre zobrazenie vplyvu uhlu vnútorného trenia materiálu násypu na pomer napätí vypočítaných pomocou numerického modelovania boli pridané hodnoty vypočítané pomocou nemeckej metódy EBGeo.

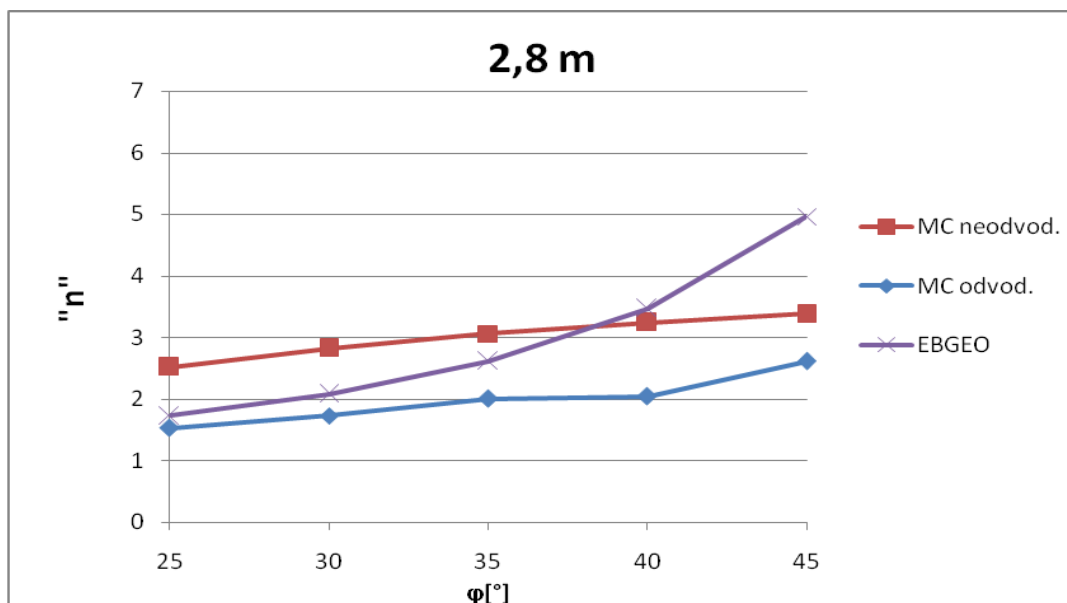
Pri osovej vzdialenosti $s = 1,4$ m boli pomocou metódy EBGeo vypočítané až nereálne vysoké hodnoty faktoru koncentrácie napätia pri vyšších hodnotách uhlu vnútorného trenia násypu. Tak ako aj pri porovnaní výsledkov pri analýze vplyvu výšky násypu, tak aj v tomto prípade boli reálne hodnoty vypočítané pri nižších osových vzdialenostiach (2,1 a 2,8 m). Numerickým modelovaním bolo zistené, že zmena uhlu vnútorného trenia násypu nemá na klenbový efekt vplyv. Avšak hodnoty vypočítané metódou EBGeo ukazujú, že so zvyšujúcou sa hodnotou uhlu vnútorného trenia sa zvyšuje aj pomer napätí.



Obrázok 4-25: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m



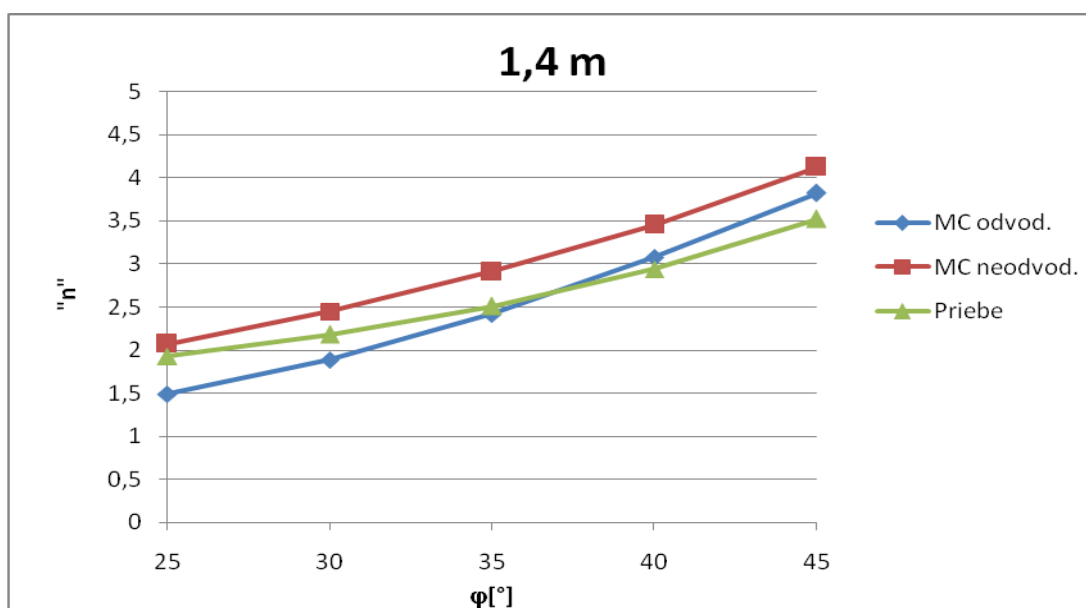
Obrázok 4-26: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m



Obrázok 4-27: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

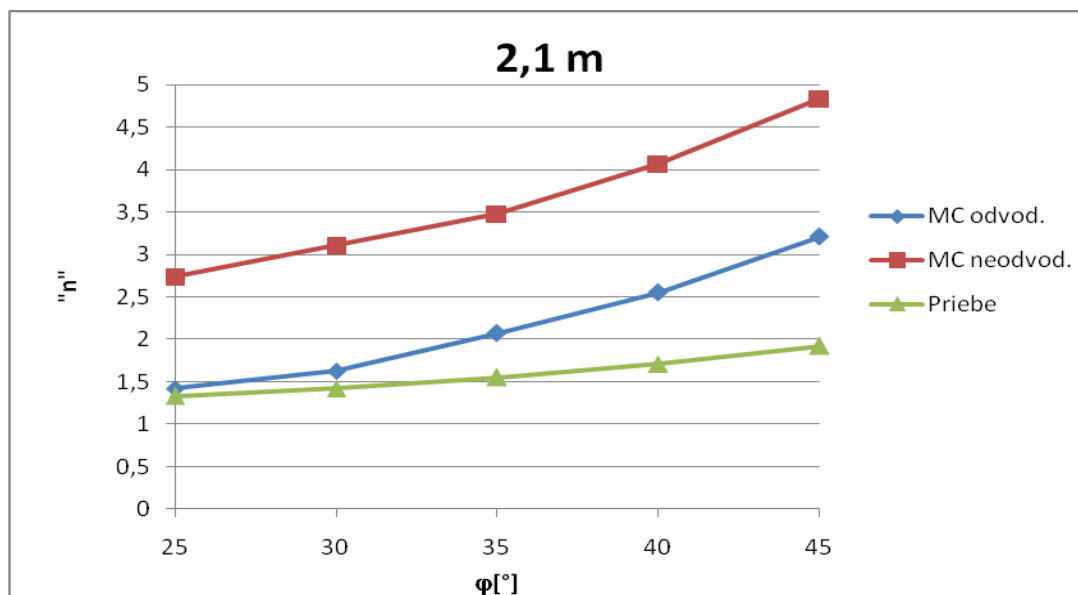
4.3.3 Uhol vnútorného trenia pilierov

V tejto časti boli porovnané hodnoty faktoru koncentrácie napätia získané pri analýze vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov numerickou analýzou a výsledky získané pri výpočte stupňa zlepšenia zeminy Priebeho metódou (kapitola 2.4, vzorec 2-15).

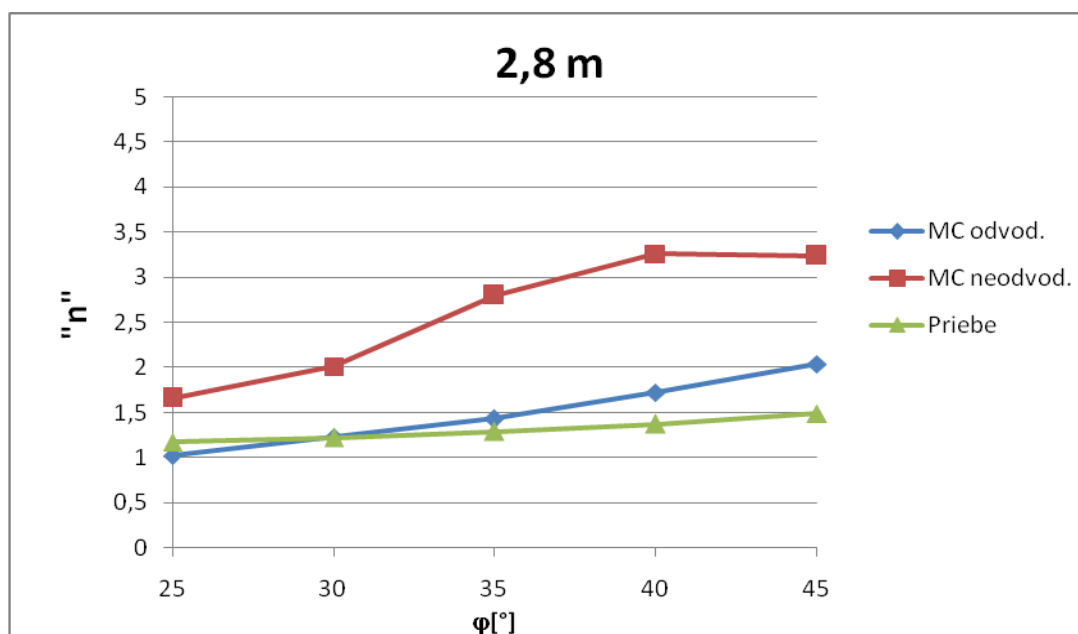


Obrázok 4-28: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m

Výsledky stupňa zlepšenia vypočítané pomocou Priebeho metódou sa najviac približujú výsledkom pomeru napätí získaným pri numerickom modelovaní konštitučným modelom Mohr-Coulomb pri odvodnených podmienkach a to pri všetkých troch skúmaných osových vzdialenostiach.



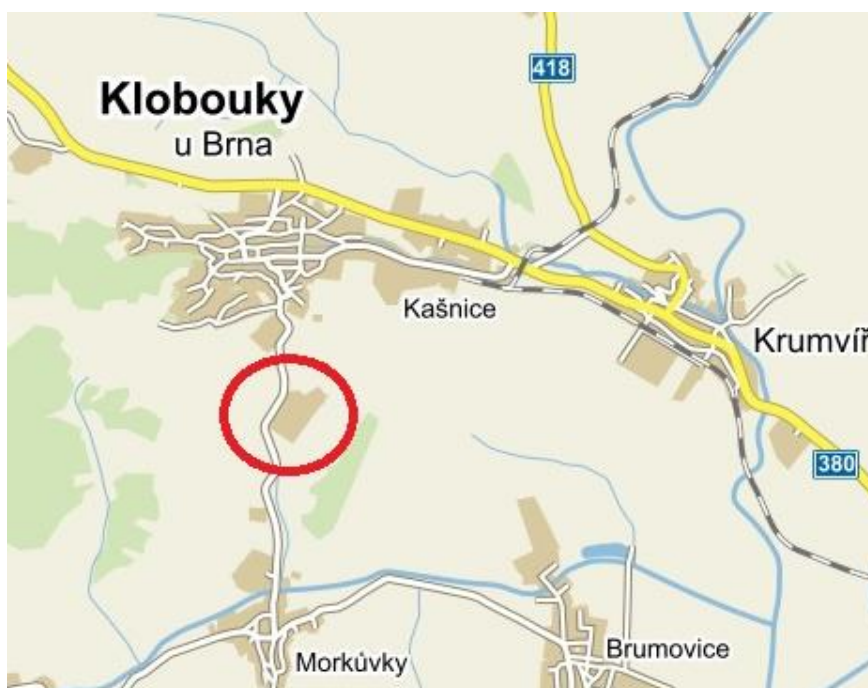
Obrázok 4-29: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m



Obrázok 4-30: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m

5 KRUHOVÁ NÁDRŽ

Ďalšia časť diplomovej práce sa venuje numerickej analýze podložia pod oceľovou kruhovou nádržou. Podložie bude zlepšené štrkovými piliermi a budú porovnané výsledky s prípadom nezlepšenej zeminy. Pre výpočet bol zvolený program Plaxis 3D.



Obrázok 5-1: Lokalita na mape vyznačená červeným krúžkom (www.mapy.cz)

Zaujmové územie sa nachádza cca 25 km juhovýchodne od Brna. Jedná sa o areál spoločnosti ČEPRO, a.s, v ktorom sa nachádza stavba „Obnova skladovacích nádrží PH a nádrž na ropu“. Lokalita je na Obrázku 5-1 vyznačená červeným krúžkom. Konceptne sa jedná o zostavu štyroch nadzemných nádrží s pevnými strechami v oceľových záchytných jímkach o objemovej kapacite 10 000 m³. Predmetom analýzy je nádrž číslo H230.05 (nádrž č. 5). Ako podklad boli použité "Technická zpráva-konstrukční část-spodní stavba" firmy Statika Olomouc, s.r.o. [10] a "Zpráva o geotechnickém průzkumu na lokalitě Klobouky u Brna - areál ČEPRO" firmy Geotrend, s.r.o. [11].

5.1 Geomorfologické a geologické pomery

Posudzované územie sa nachádza na svahu uklonenom od severozápadu k juhovýchodu, pričom severný okraj staveniska sa pohybuje v nadmorských výškach cca. 225,0 - 227,0 m n.m. Terén nižšej časti sa pohybuje v nadmorských výškach cca 213,0 - 215,0 m n.m. Záujmové územie je začlenené do geomorfologického celku Ždánického lesa, resp. Podcelku Boleradickej vrchoviny, ktorá je súčasťou Stredomoravských Karpát (sústava Vonkajšie Západné Karpaty).

Jedná sa tu o striedanie vápnitých ílov, slieňov, slieňovcov, prachovcov, ktoré južným smerom prechádzajú v "ždánické" pieskovce, popr. zlepence. Horniny paleogénneho "poloskalného" resp. ílového podkladu boli zastihnuté v hĺbke 8 - 10 m pod terénom. Íly sú prevažne s vysokou (veľmi), popr. strednou plasticitou. Pri povrchu súvrstvia tuhej až pevnej, hlbšie potom pevnej konzistencie, šedožltej až šedohnedej farby a tvoria zvetralé paleogénne podložie na styku s kvartérnym pokryvom. Kvartérne uloženiny sú tvorené jemnozrnnými zeminami eolitického a deluviálneho pôvodu. Vo vyššej časti svahu sa jedná o spraše a sprašové hliny rázu ílu so strednou plasticitou, žltej až žltohnedej farby. Konzistencia tohto súvrstvia je vo vrchnej časti tuhá, hlbšie mäkká. pri úpätí sú eolitické sedimenty prekryté hlinami s vyšším obsahom humóznej zložky. Jedná sa o väčšinou o hnedé až tmavohnedé íly so strednou plasticitou, miestami i vysokou plasticitou mäkké s organickou prímiesou. Tieto zeminy boli zastihnuté v mocnosti cca 3,0 - 5,0 m. Zeminy sú v celom zistenom profile značne vápnité. Najvrchnejšiu vrstvu tvorí ornica o mocnosti cca 0,3 - 0,4 m.

Správa [11] pojednáva o prieskume základových pomerov pre skladovacie nádrže. Konkrétne pre nádrž č. 5 bolo uskutočnených 5 penetračných sond, SP-11 až SP-15. V každej penetračnej sonde bol realizovaný plný komplex karotážnych meraní, vďaka ktorým boli získané geotechnické a geofyzikálne parametre zemín. Ich znalosť umožnila rozčlenenie zemín na litologické polohy I (kvartér) a II (terciér) a geotechnické polohy Ia, Ib, IIa, IIb, IIc. Hladina podzemnej vody sa vyskytuje v úrovni cca 212 - 213 m n.m. Skúmané materiálové charakteristiky zemín sú uvedené v Tabuľke 5-1 pre konštitučný model Mohr-Coulomb a v Tabuľke 5-2 pre konštitučný model Hardening Soil.

Tabuľka 5-1: Materiálové charakteristiky pre konštitučný model Mohr-Coulomb

zemina	hĺbka [m]	γ / γ_{sat} [kN/m ³]	c [kPa]	E [MPa]	ν [-]	ϕ [°]	$k_x = k_y$ [m/deň]	k_z [m/deň]
materiál pilierov	-	19/20,5	1	80	0,3	45	1,7	1,7
Ia	0-5,85	17,8/17,8	8	2,3	0,3	17	8,64E-3	8,64E-4
Ib	5,85-9,75	18,4/18,4	10	4	0,3	18	8,64E-3	8,64E-4
IIa	9,75-13,4	18,6/18,6	8	12,7	0,3	16	8,64E-3	8,64E-4
IIb	13,4-19,3	19,5/19,5	12	26	0,3	19	8,64E-3	8,64E-4
IIc	19,3-60	19,9/19,9	20	29	0,3	21	8,64E-3	8,64E-4

Tabuľka 5-2: Materiálové charakteristiky pre konštitučný model Hardening Soil

zemina	hĺbka [m]	E_{50}^{ref} [MPa]	E_{oed}^{ref} [MPa]	E_{ur}^{ref} [MPa]	ν_{ur} [-]	m [-]	p_{ref} [kPa]
materiál pilierov	-	80	80	240	0,2	0,3	0
Ia	0-5,85	10	6,7	26,8	0,2	0,90	100
Ib	5,85-9,75	9,5	6,3	25,2	0,2	0,90	100
IIa	9,75-13,4	20	14,6	58,4	0,2	0,90	100
IIb	13,4-19,3	39	26	104	0,2	0,90	100
IIc	19,3-60	36	24	96	0,2	0,90	100

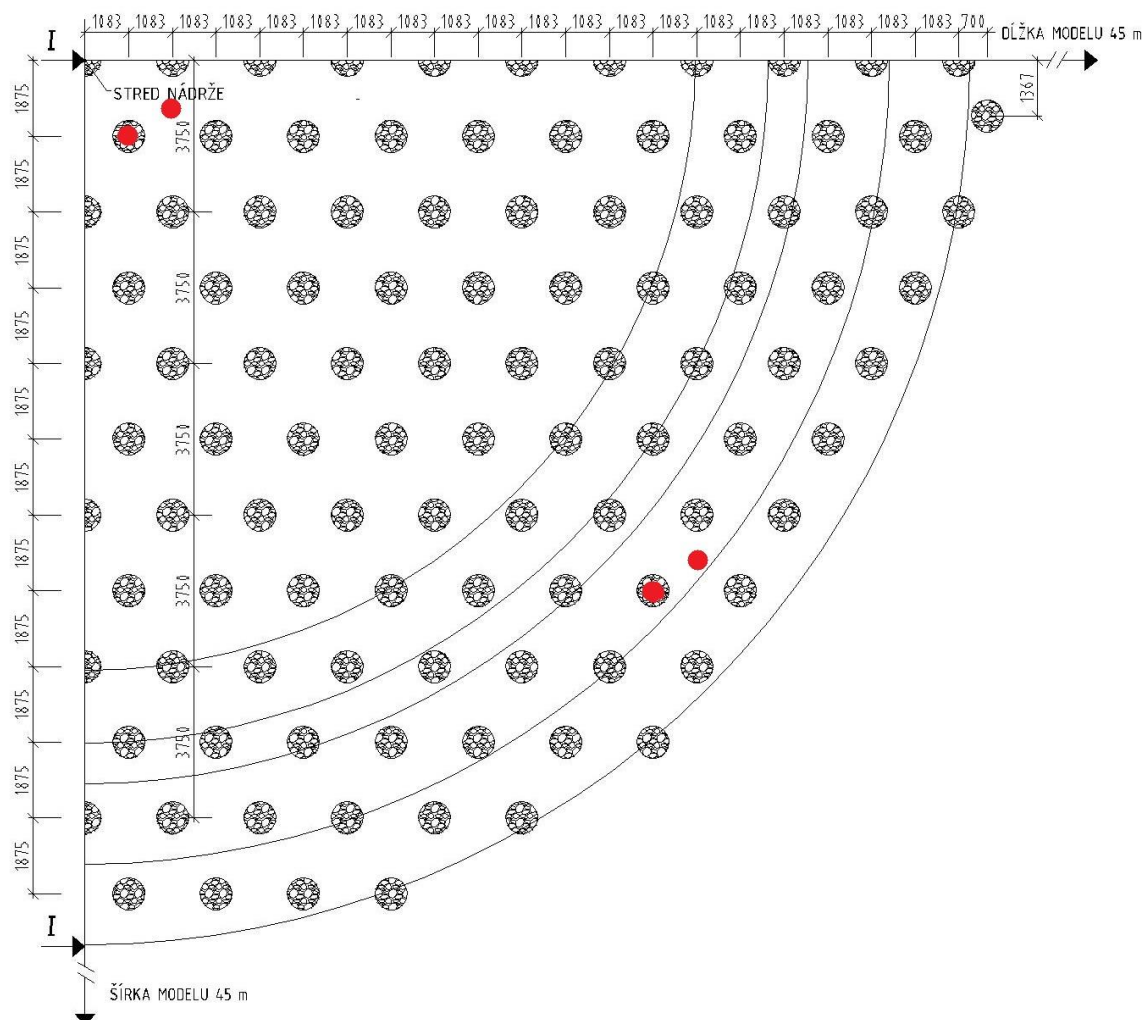
Objemová tiaž, uhol vnútorného trenia a súdržnosť pre HS model sú rovnaké ako pre MC model.

5.2 Numerický model

Pre účely numerického modelovania bol zvolený program Plaxis 3D. Výpočty boli uskutočnené zároveň pre konštitučný model Mohr-Coulomb a Hardening Soil. Materiálové charakteristiky sú uvedené v Tabuľkách (5-1 a 5-2). Model má rozmery 45 x 45 m vo vodorovnom smere a 60 m vo zvislom smere. Mocnosti vrstiev sú uvedené v tabuľkách vyššie. Keďže rozhranie vrstiev je uvažované ako vodorovné a kruhová nádrž symetrická, je nádrž modelovaná len ako štvrtkruhová výseč. Hladina podzemnej vody je uvažovaná v úrovni 3,5 m pod terénom. V priečnom reze je terén uvažovaný vodorovný. Boli uvažované štrkové piliere s priemerom 0,8 m a dĺžkou 14,5 m. Osová

vzdialenosť pilierov je 2,166 m v trojuholníkovom rastrí. Pôdorysné usporiadanie pilierov je vidieť na Obrázku 5-2.

PODORYS:

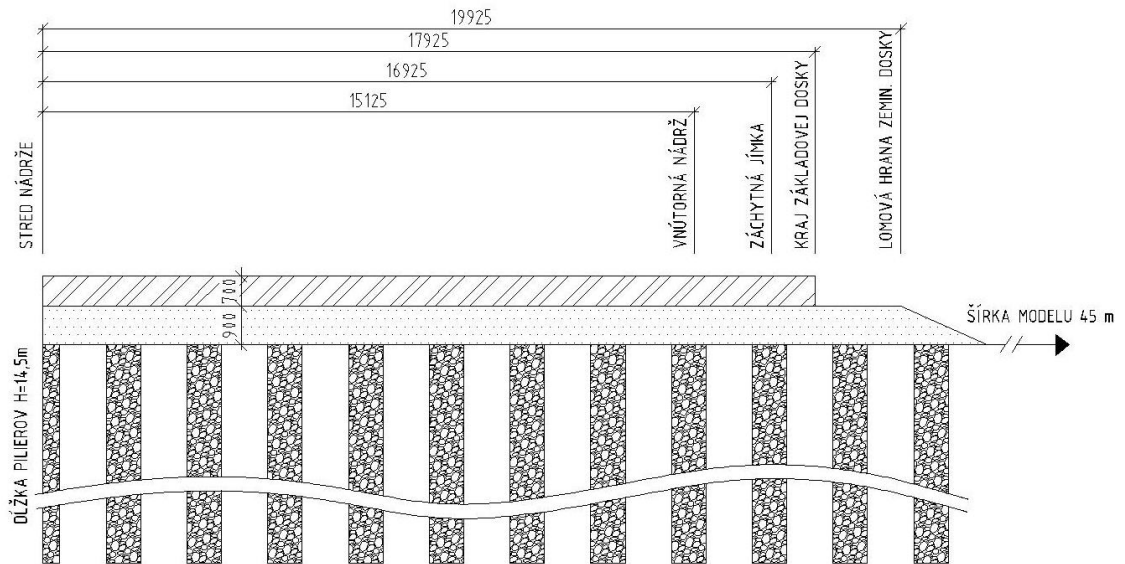


Obrázok 5-2: Pôdorys modelu (červené body označujú miesta, kde boli skúmané napätia)

Na pilieroch je uložená štrkopiesková zeminová doska výšky 0,9 m. Päta svahu zeminovej dosky má polomer 22,5 m a lomová hrana zeminovej dosky má polomer 19,925 m. Materiál je lineárne-elastický, odvodnený. Objemová tiaž $\gamma = \gamma_{\text{sat}} = 18,5 \text{ kN/m}^3$, $E' = 200 \text{ MPa}$, Poissonovo číslo $\nu = 0,35$ a súčiniteľ priepustnosti $k_x = k_y = k_z = 1,7 \text{ m/deň}$. Na nej leží betónová základová doska hrúbky 0,7 m s polomerom 17,925 m. Materiál betónovej dosky bol uvažovaný ako lineárne-elastický, bez pórov. Objemová tiaž betónu $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$, modul pružnosti $E = 30 \text{ MPa}$ a $\nu = 0,15$. Na Obrázku 5-3 je

znázornený rez modelom. Polomer ocelevej nádrže je 15,125 m, záchytnej jímky 16,925 m.

REZ I - I:



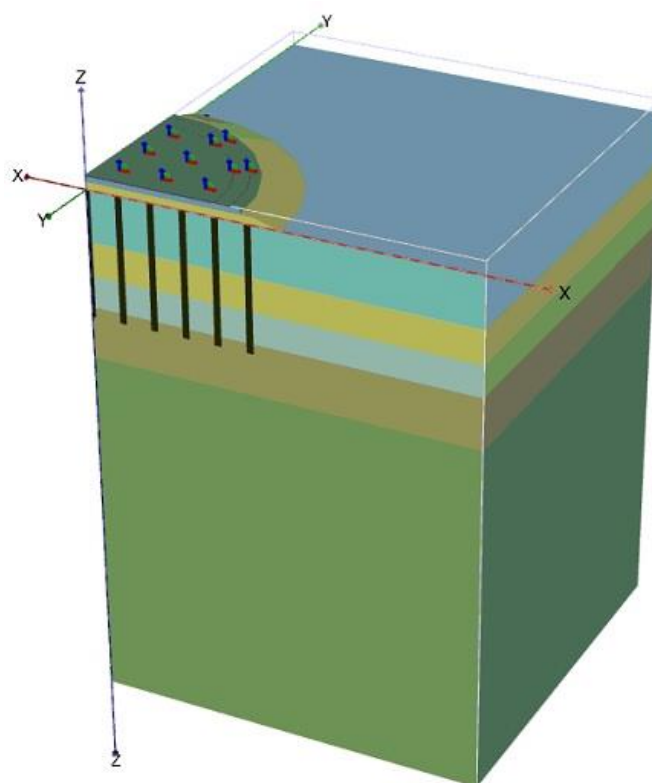
Obrázok 5-3: Rez modelom

Fázy výpočtu:

- Initial phase: vygenerovanie počiatočného stavu napätosti
- Fáza 1: rovnaká ako počiatočná fáza
- Fáza 2: Štrkové piliere – konštrukcia Š.P., resp. výmena zeminy za zeminu so zlepšenými parametrami (táto fáza je vynechaná pri modelovaní bez zlepšenia)
- Fáza 3: Zeminová doska – konštrukcia zeminovej dosky
- Fáza 4: Betónová základová doska – konštrukcia betónovej vrstvy
- Fáza 5: (vynulovanie deformácii) Zaťaženie 1 – zaťaženie v oblasti vnútornej nádrže 140 kPa, reprezentuje napustenú vnútornú nádrž
- Fáza 6: Zaťaženie 2 – zaťaženie v celej oblasti záchytnej jímky (vrátane vnútornej nádrže) 111,8 kPa

- Fáza 7: Konsolidácia – výpočetný režim „consolidation“, fáza je ukončená pri dosiahnutí minimálneho pórového tlaku 3 kPa

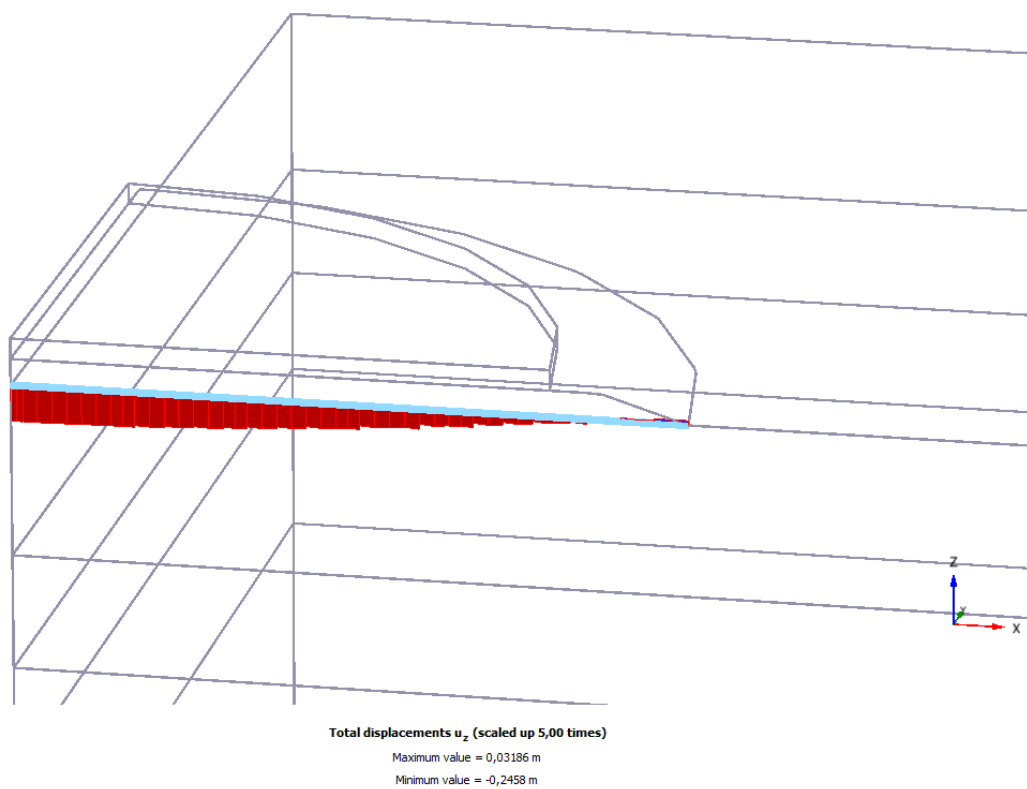
Výpočty boli uskutočnené pre nezlepšené podložie, pre podložie zlepšené štrkovými piliermi a nakoniec pre podložie s náhradnými charakteristikami simulujúce Š.P. Výpočty boli uskutočnené pre konštitučné modely Mohr-Coulomb a Hardening Soil.



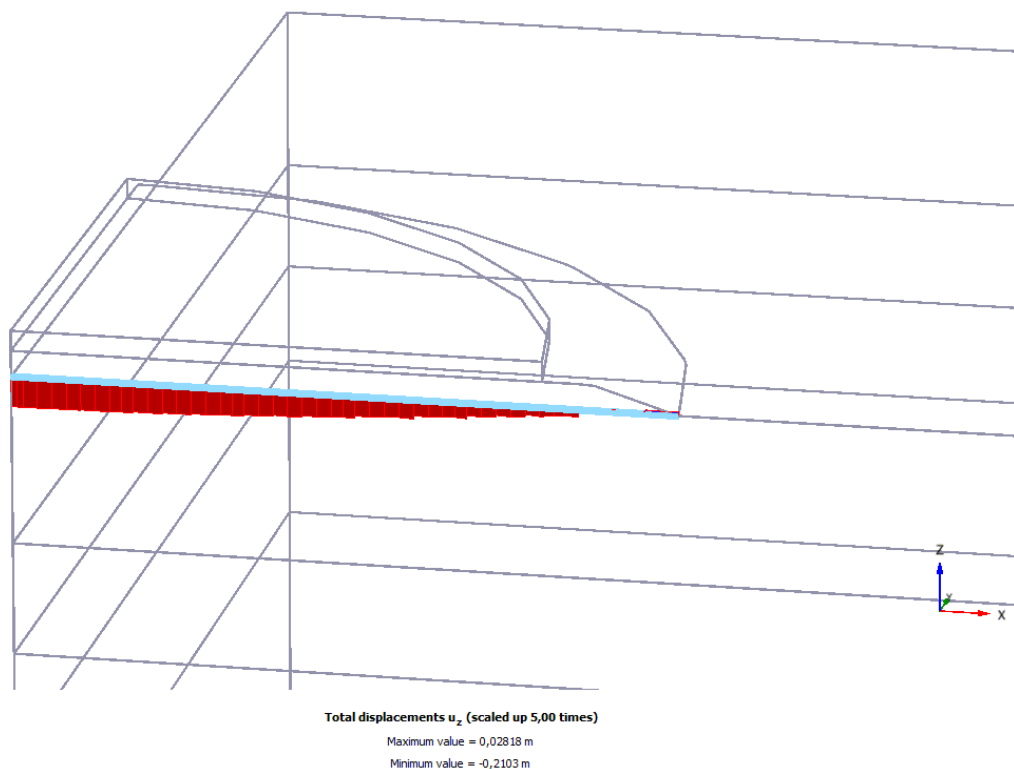
Obrázok 5-4: Celkový pohľad na model

5.2.1 Model MC bez zlepšenia

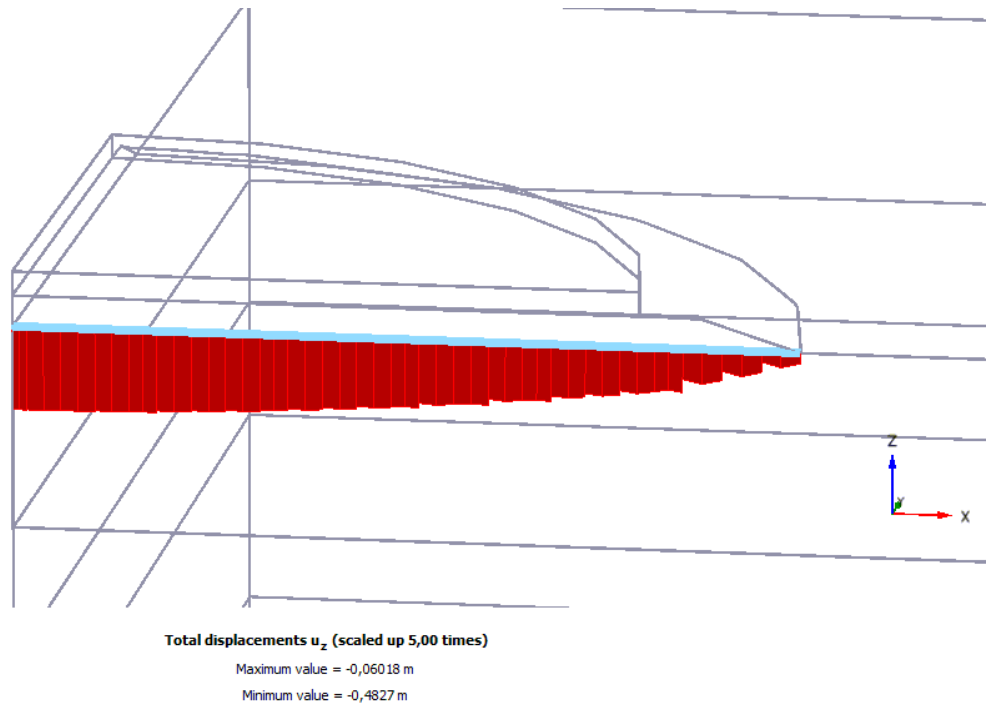
Tento model bol počítaný pre konštitučný model Mohr-Coulomb a bez zlepšenia podložia pod násypom. Materiálové charakteristiky zemín podložia sú uvedené v Tabuľke 5-1. Na Obrázkoch 5-5, 5-6 a 5-7 sú výstupy z programu Plaxis 3D. Jedná sa o zvislé deformácie pod zeminovou doskou pre posledné tri fázy výpočtu.



Obrázok 5-5: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,2458$ m)

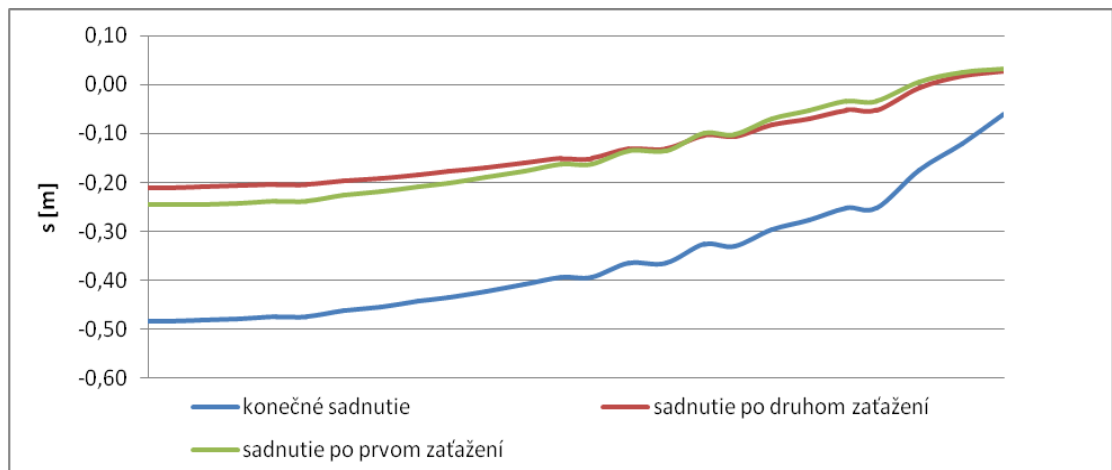


Obrázok 5-6: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,2103$ m)



Obrázok 5-7: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,4827$ m)

Na Obrázku 5-8 sú porovnané sadnutia pre posledné tri fázy výpočtu. Najvyššia hodnota sadnutia bola dosiahnutá pri poslednej fáze konečnej konsolidácie ($s_{max} = 0,4827$ m). Doba konsolidácie je v tomto prípade 1955 dní.



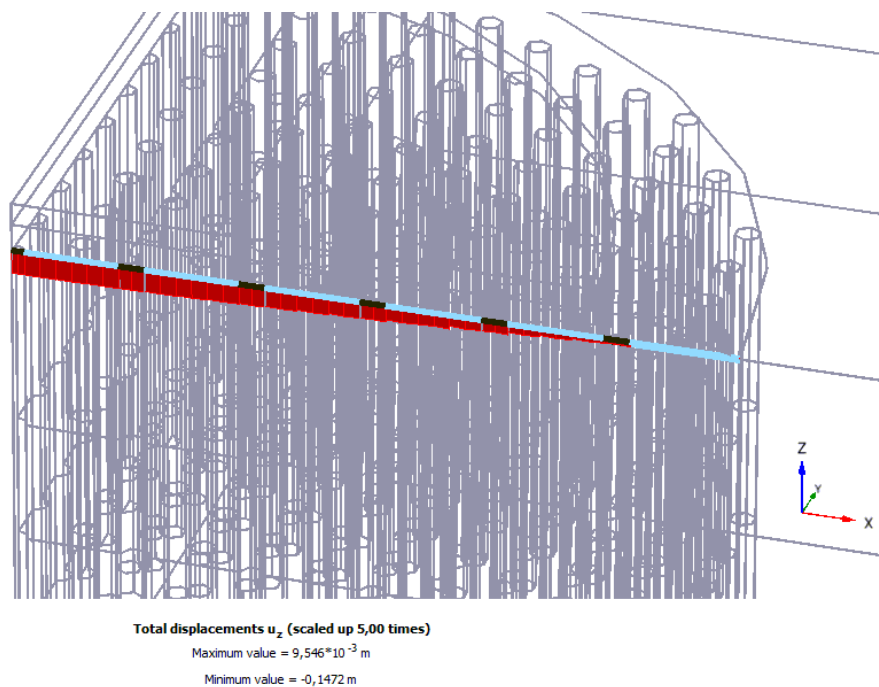
Obrázok 5-8: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model MC bez zlepšenia

5.2.2 Model MC so štrkovými piliermi

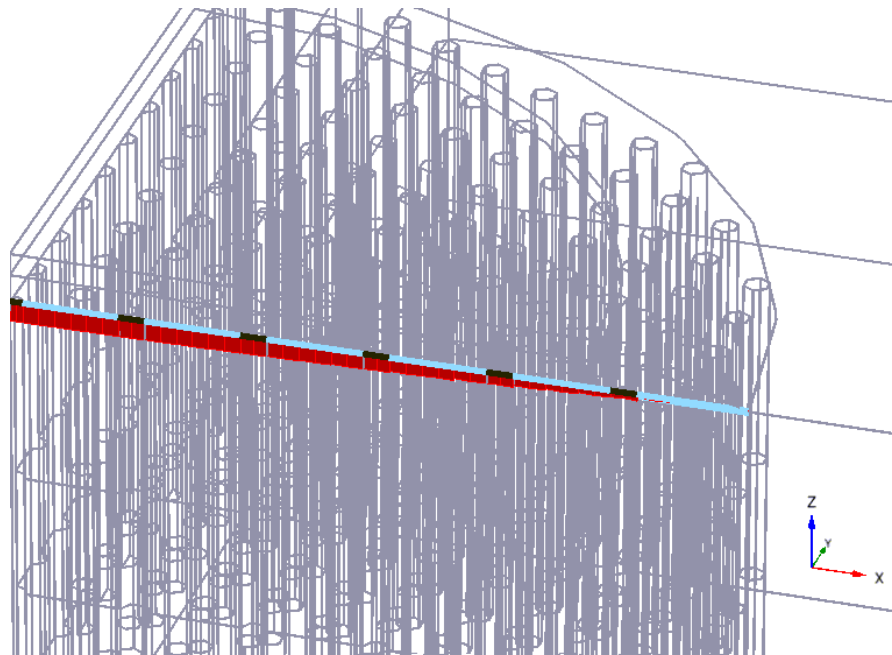
V tomto modeli boli ako zlepšenie pod násypom modelované štrkové piliere. Materiálové charakteristiky sú v Tabuľke 5-1. Boli tu tiež skúmané napätia na pilieroch a na zemine (medzi piliermi). Skúmané miesta sú zaznačené na Obrázku 5-2 a získané hodnoty napätí sú zobrazené v Tabuľke 5-3 pre posledné tri výpočtové fázy. Konsolidačný čas činí 981,4 dní.

Tabuľka 5-3: Hodnoty napätí pre model MC so štrkovými piliermi

		napätie [kPa]		pomer
		pilier	zemina	n
1. zaťaženie	stred	580,2	128	4,53
	okraj	216,8	17,3	12,53
2. zaťaženie	stred	462,5	115,2	4,01
	okraj	250,8	11,9	21,08
konsolidácia	stred	448,2	89,9	4,99
	okraj	192,3	10,1	19,04



Obrázok 5-9: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,1472$ m)

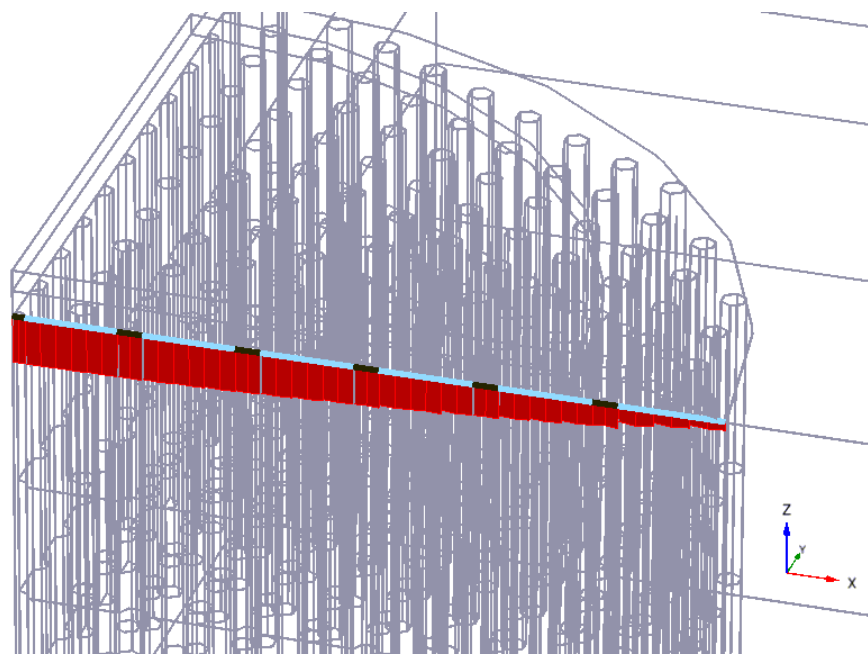


Total displacements u_z (scaled up 5,00 times)

Maximum value = $7,441 \cdot 10^{-3}$ m

Minimum value = -0,1234 m

Obrázok 5-10: Sadnutie po druhom zat'azení ($s_{\max} = 0,1234$ m)

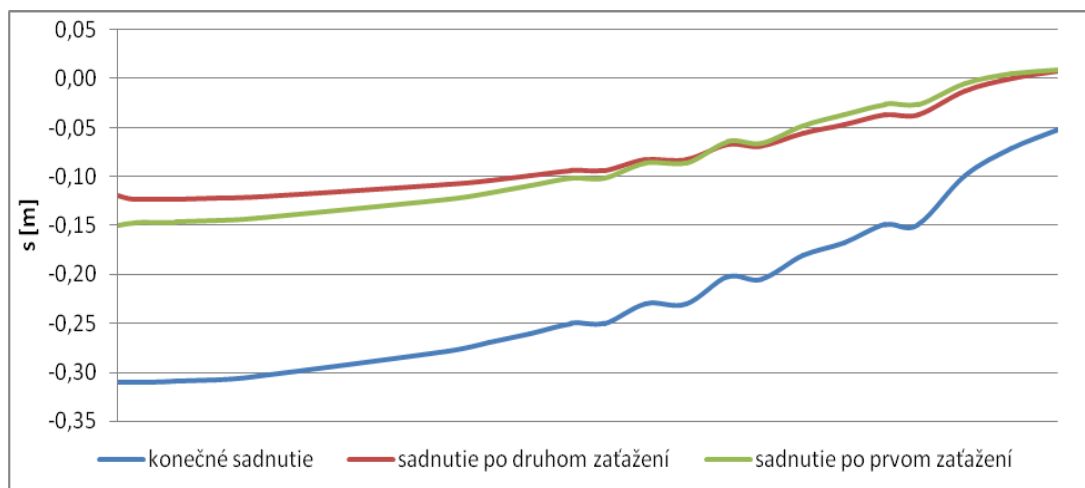


Total displacements u_z (scaled up 5,00 times)

Maximum value = -0,05154 m

Minimum value = -0,3102 m

Obrázok 5-11: Konečné sadnutie ($s_{\max} = 0,3102$ m)



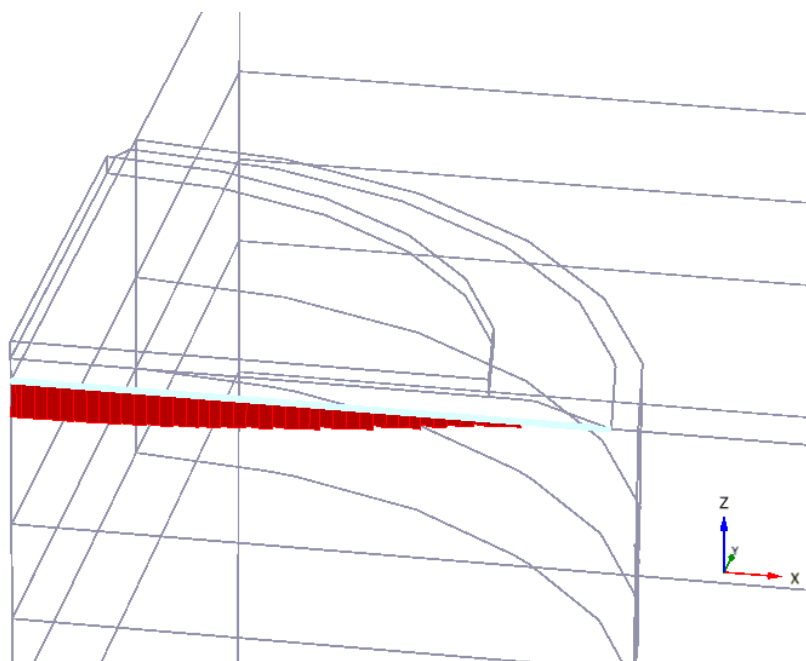
Obrázok 5-12: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model MC so štrkovými piliermi

5.2.3 Model MC s náhradnými charakteristikami

Zlepšenie je do tohto modelu zavedené pomocou náhradných charakteristík, ktoré sú zobrazené v Tabuľke 5-4. Konštitučný model je Mohr-Coulomb. Zvislé deformácie z programu Plaxis 3D sú zobrazené na Obrázkoch 5-13, 5-14 a 5-15. Konečné deformácie boli dosiahnuté po 979,4 dňoch.

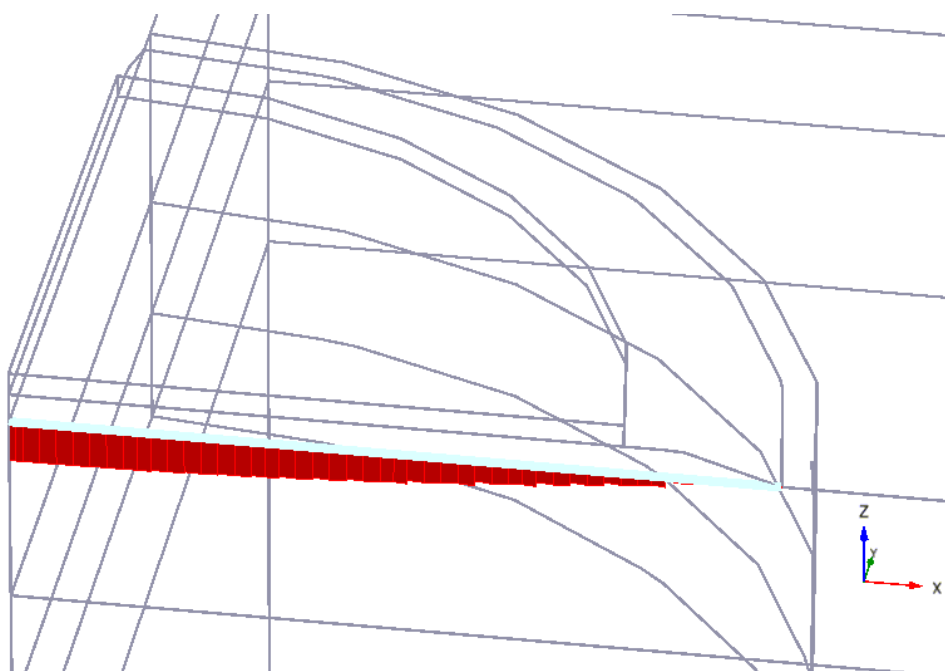
Tabuľka 5-4: Materiálove charakteristiky zlepšených zemín pre MC model

zemina	hĺbka [m]	$\gamma / \gamma_{\text{sat}}$ [kN/m ³]	c [kPa]	E [MPa]	ν [-]	ϕ [°]	$k_x = k_y$ [m/deň]	k_z [m/deň]
la	0-5,85	17,9/17,9	7	7,8	0,3	19,6	8,64E-2	8,64E-3
lb	5,85-9,75	18,5/18,5	18,8	13,6	0,3	20,5	8,64E-2	8,64E-3
lla	9,75-13,4	18,7/18,7	7	43,2	0,3	18,7	8,64E-2	8,64E-3



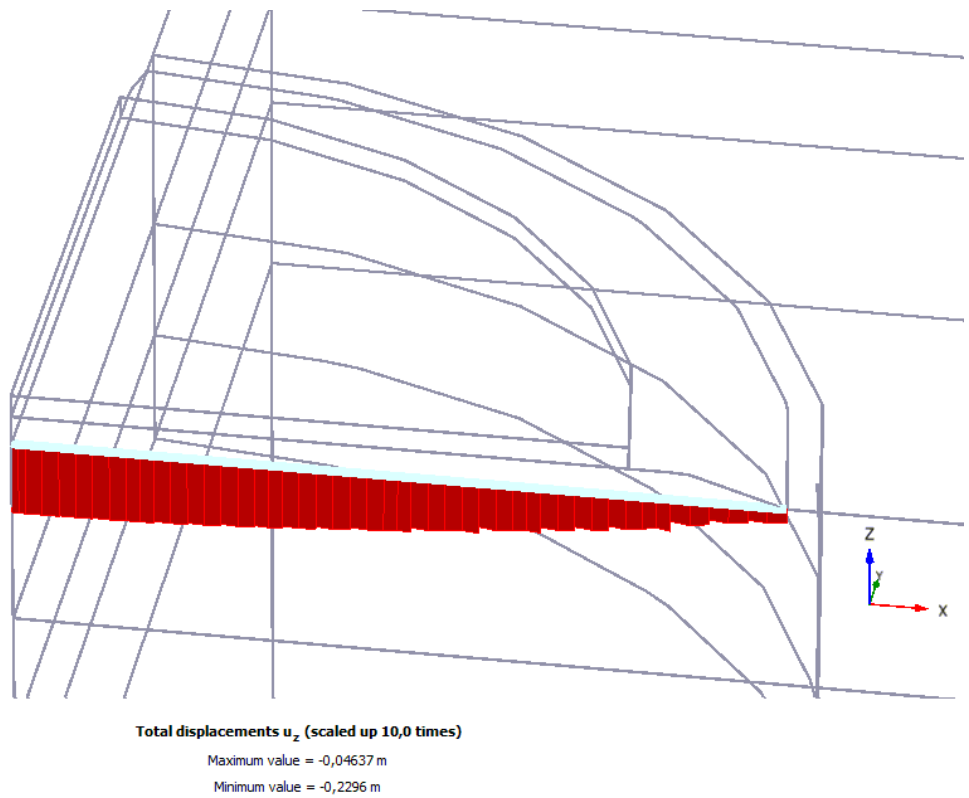
Total displacements u_z (scaled up 10,0 times)
 Maximum value = $-1,224 \cdot 10^{-3}$ m
 Minimum value = -0,1470 m

Obrázok 5-13: Sadnutie po prvom zat'azení ($s_{\max} = 0,1470$ m)

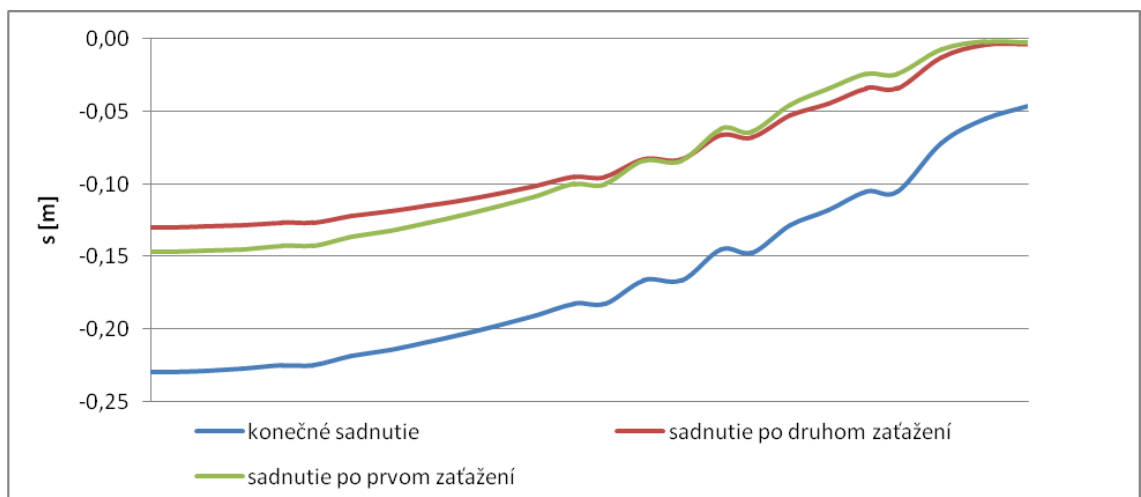


Total displacements u_z (scaled up 10,0 times)
 Maximum value = $-2,883 \cdot 10^{-3}$ m
 Minimum value = -0,1298 m

Obrázok 5-14: Sadnutie po druhom zat'azení ($s_{\max} = 0,1298$ m)



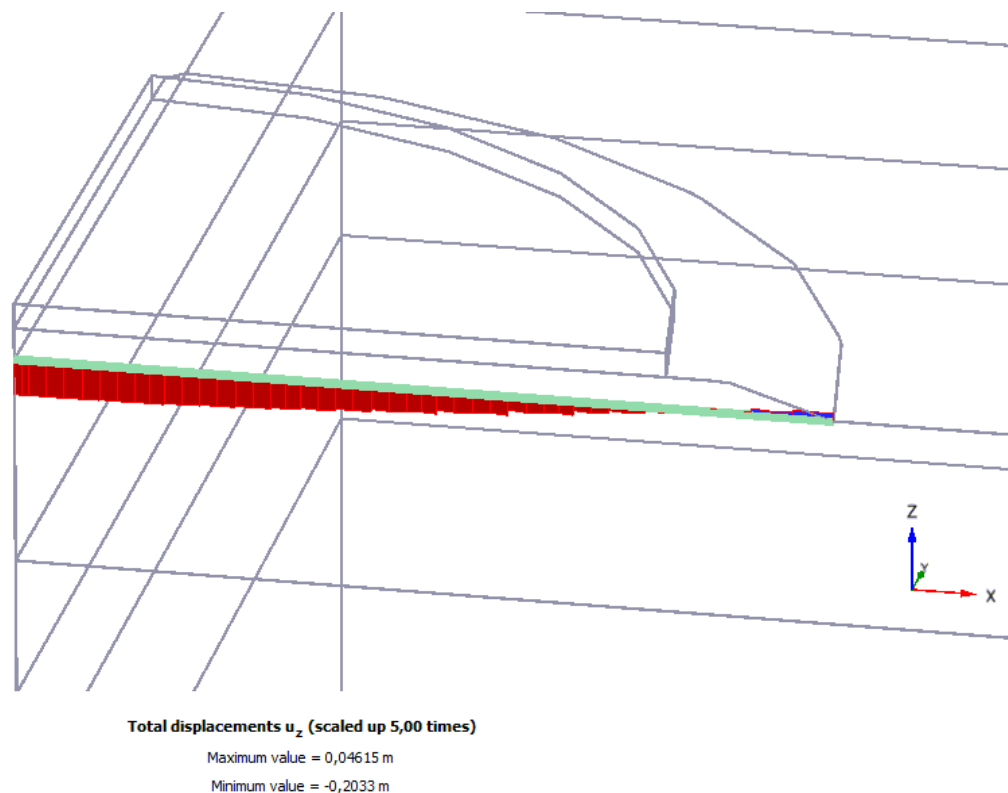
Obrázok 5-15: Konečné sadnutie ($s_{\max} = 0,2296$ m)



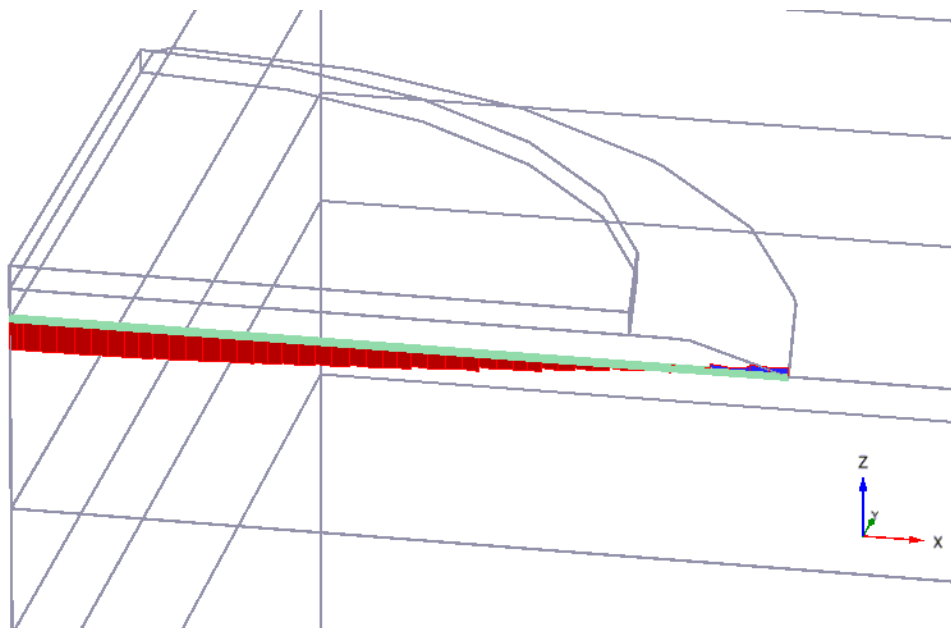
Obrázok 5-16: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model MC s náhradnými charakteristikami

5.2.4 Model HS bez zlepšenia

Tento model bol počítaný pre konštitučný model Hardening Soil a bez zlepšenia podložia pod násypom. Materiálové charakteristiky zemín podložia sú uvedené v Tabuľke 5-2. Na obrázkoch sú výstupy z programu Plaxis 3D. Jedná sa o zvislé deformácie pod zeminovou doskou pre posledné tri fázy výpočtu. Doba konsolidácie je 805,4 dňa.

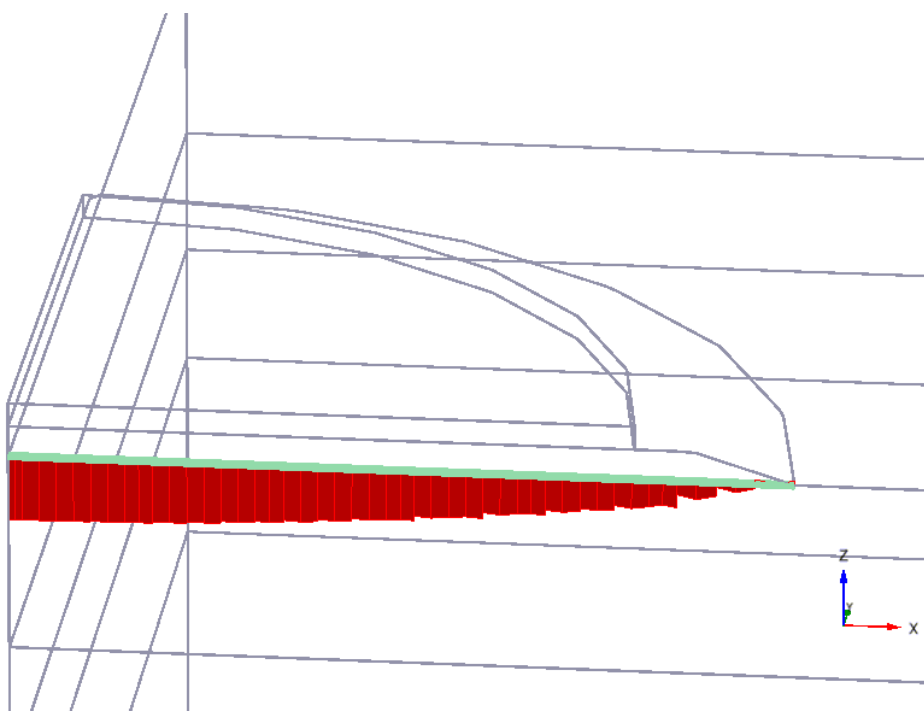


Obrázok 5-17: Sadnutie po prvom zat'ažení ($s_{max} = 0,2033$ m)



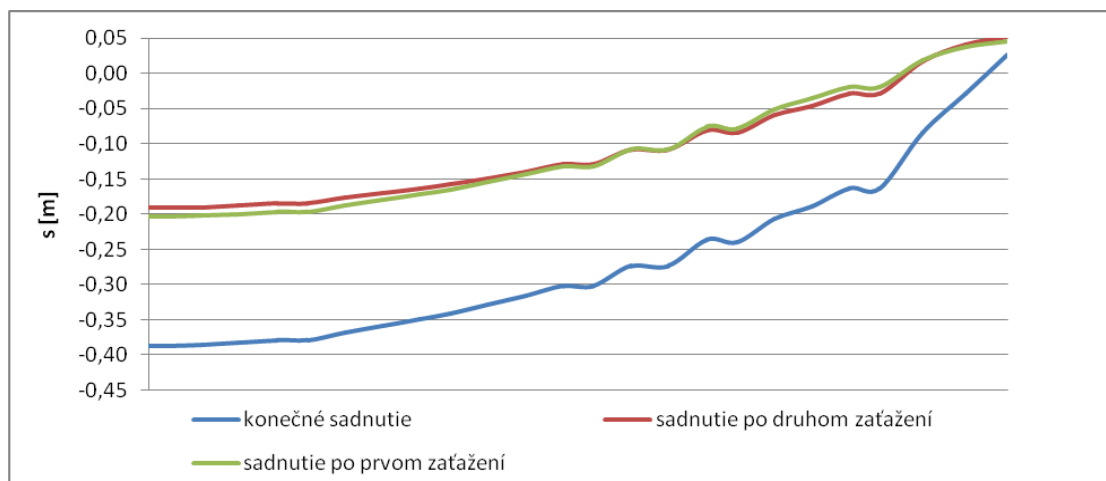
Total displacements u_z (scaled up 5,00 times)
 Maximum value = 0,05214 m
 Minimum value = -0,1910 m

Obrázok 5-18: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{\max} = 0,1910$ m)



Total displacements u_z (scaled up 5,00 times)
 Maximum value = 0,02724 m
 Minimum value = -0,3870 m

Obrázok 5-19: Konečné sadnutie ($s_{\max} = 0,3870$ m)



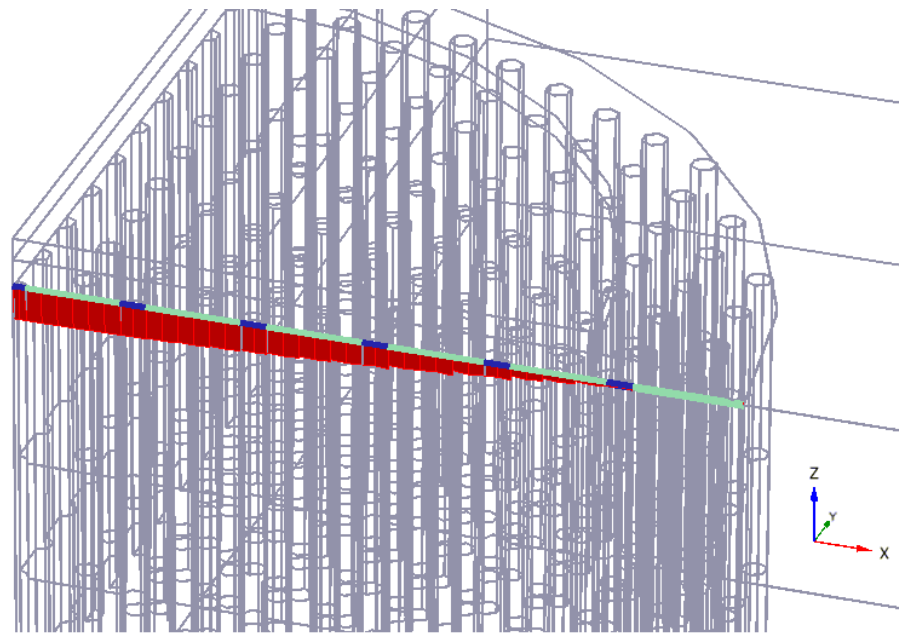
Obrázok 5-20: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model HS bez zlepšenia

5.2.5 Model HS so štrkovými piliermi

V tomto modeli boli ako zlepšenie pod násypom modelované štrkové piliere. Materiálové charakteristiky sú v Tabuľke 5-2. Boli tu tiež skúmané napätia na pilieroch a na zemine (medzi piliermi). Skúmané miesta sú zaznačené na Obrázku 5-2 a získané hodnoty napätí sú zobrazené v Tabuľke 5-5. Konečné deformácie boli dosiahnuté po 472,5 dňoch.

Tabuľka 5-5: Hodnoty napätí pre model HS so štrkovými piliermi

		napätie [kPa]		pomer
		pilier	zemina	n
1. zaťaženie	stred	469	143,6	3,27
	okraj	100,5	6,9	14,57
2. zaťaženie	stred	367,1	121,9	3,01
	okraj	110,2	17,6	6,26
konsolidácia	stred	430,3	90,5	4,75
	okraj	212,5	25,1	8,47

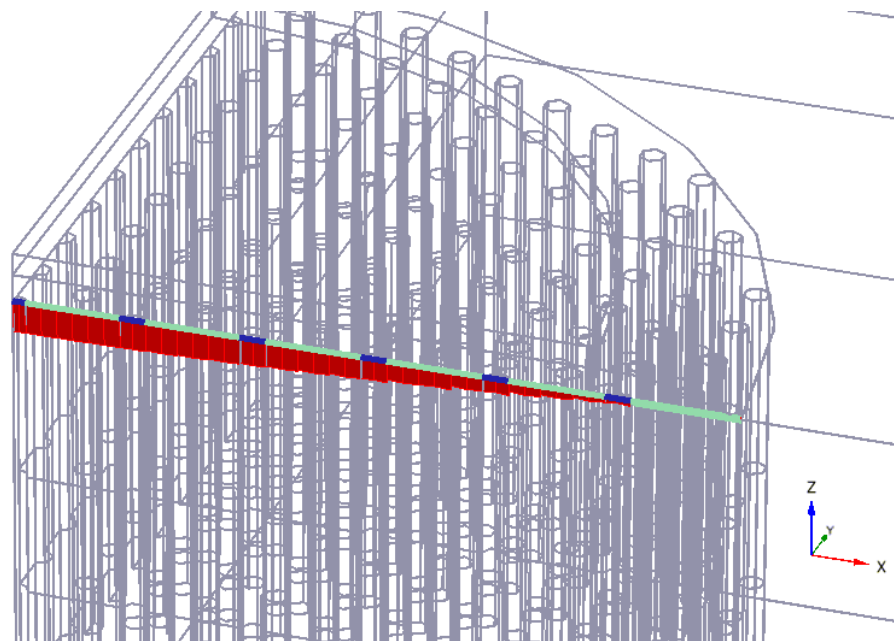


Total displacements u_z (scaled up 10,0 times)

Maximum value = $7,447 \cdot 10^{-3}$ m

Minimum value = -0,1059 m

Obrázok 5-21: Sadnutie po prvom zat'azení ($s_{\max} = 0,1059$ m)

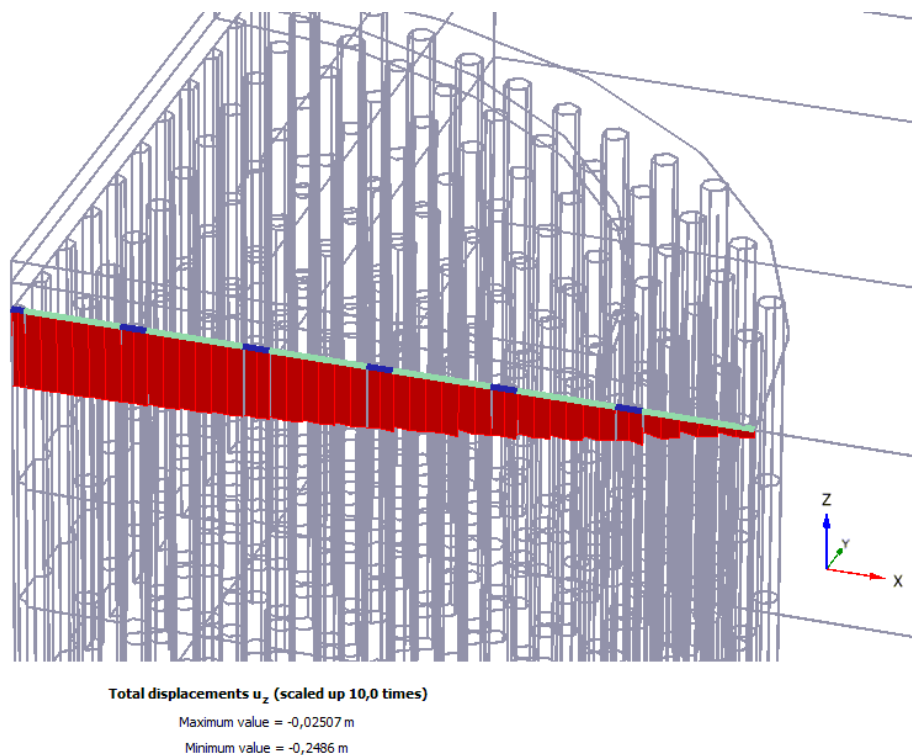


Total displacements u_z (scaled up 10,0 times)

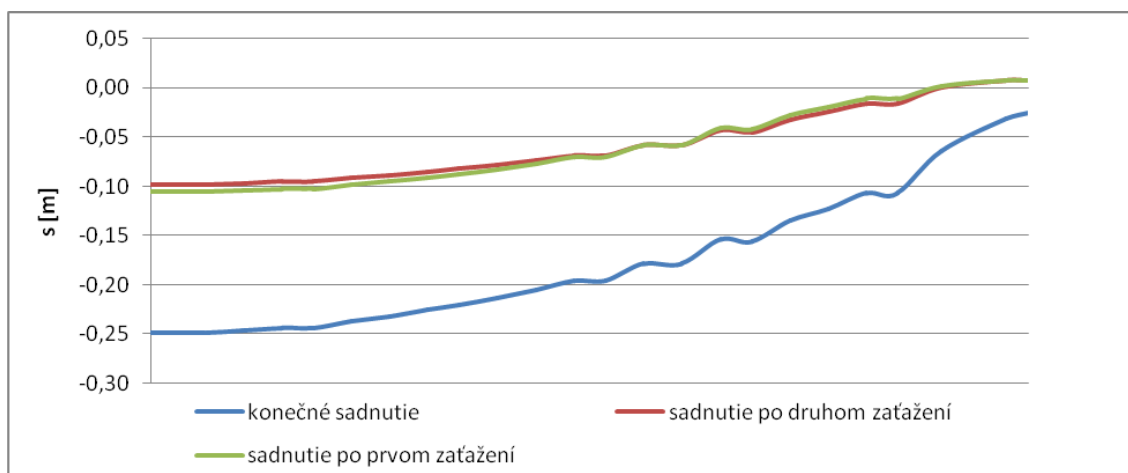
Maximum value = $7,715 \cdot 10^{-3}$ m

Minimum value = -0,09813 m

Obrázok 5-22: Sadnutie po druhom zat'azení ($s_{\max} = 0,0981$ m)



Obrázok 5-23: Konečné sadnutie ($s_{\max} = 0,2486$ m)



Obrázok 5-24: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model HS so štrkovými piliermi

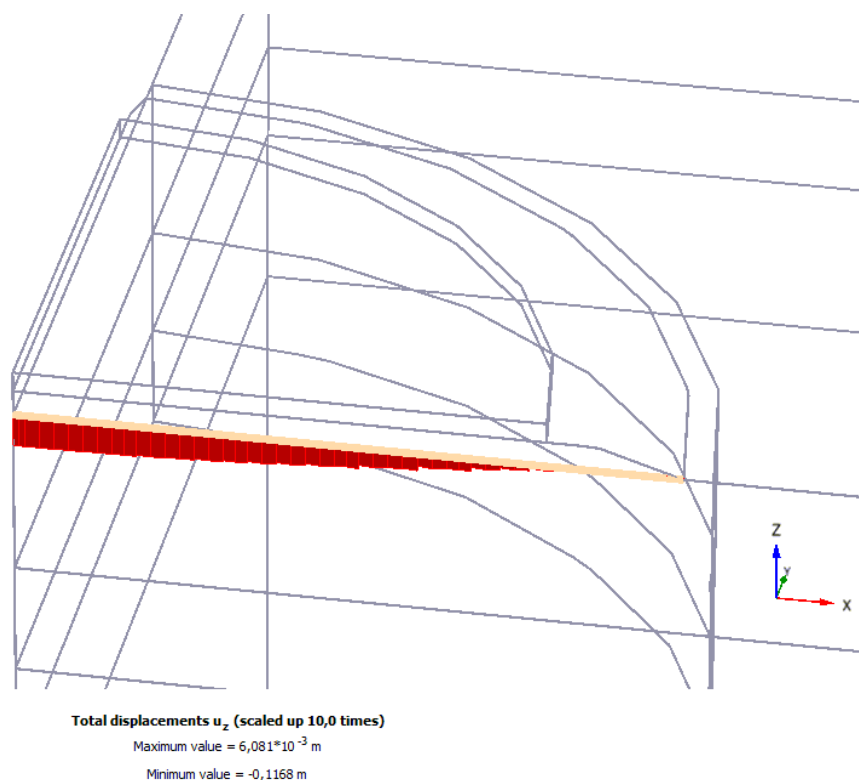
5.2.6 Model HS s náhradnými charakteristikami

Zlepšenie je do tohto modelu zavedené pomocou náhradných charakteristík, ktoré sú zobrazené Tabuľke 5-6. Konštitučný model je Hardening Soil.

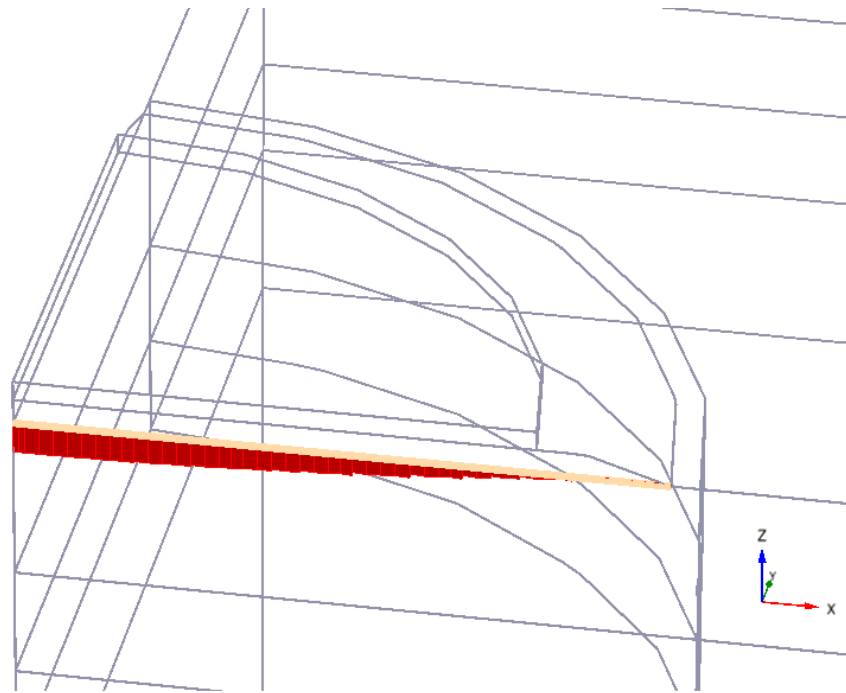
Tabuľka 5-6: Materiálové charakteristiky pre konštitučný model Hardening Soil

zemina	hĺbka [m]	E_{50}^{ref} [MPa]	E_{oed}^{ref} [MPa]	E_{ur}^{ref} [MPa]	ν_{ur} [-]	m [-]	p_{ref} [kPa]
Ia	0-5,85	10	6,7	26,8	0,2	0,90	100
Ib	5,85-9,75	9,5	6,3	25,2	0,2	0,90	100
IIa	9,75-13,4	20	14,6	58,4	0,2	0,90	100

Objemová tiaž, uhol vnútorného trenia a súdržnosť pre model HS s náhradnými charakteristikami sú rovnaké ako pre model MC s náhradnými charakteristikami. Zvislé deformácie z programu Plaxis 3D sú zobrazené na nasledujúcich obrázkoch.

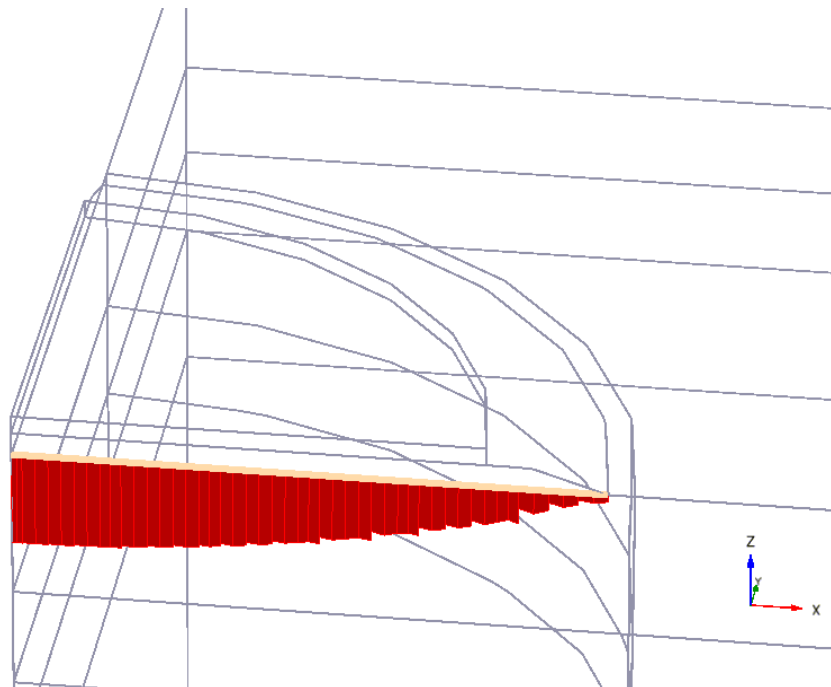


Obrázok 5-25: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,1168$ m)



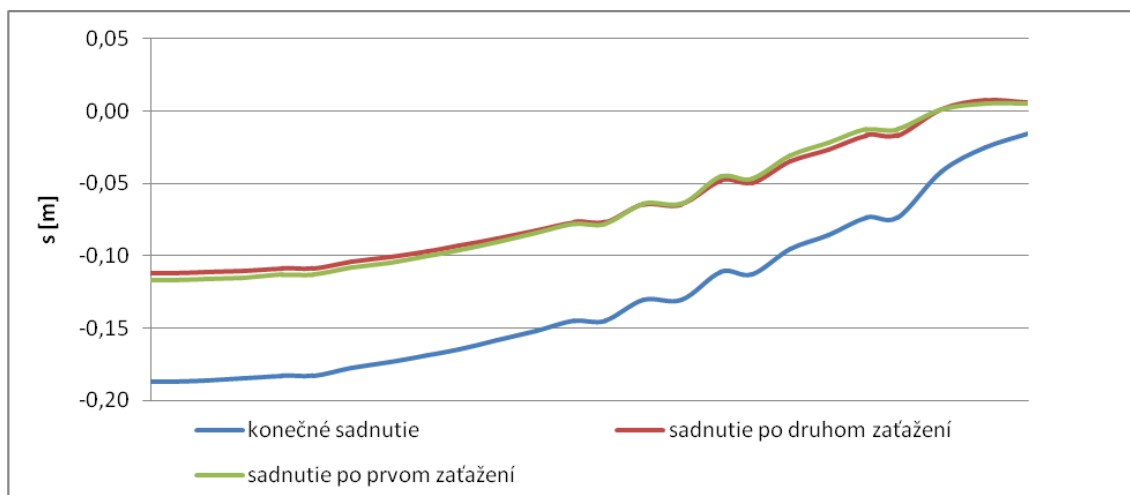
Total displacements u_z (scaled up 10,0 times)
 Maximum value = $7,776 \cdot 10^{-3}$ m
 Minimum value = -0,1121 m

Obrázok 5-26: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{\max} = 0,1121$ m)



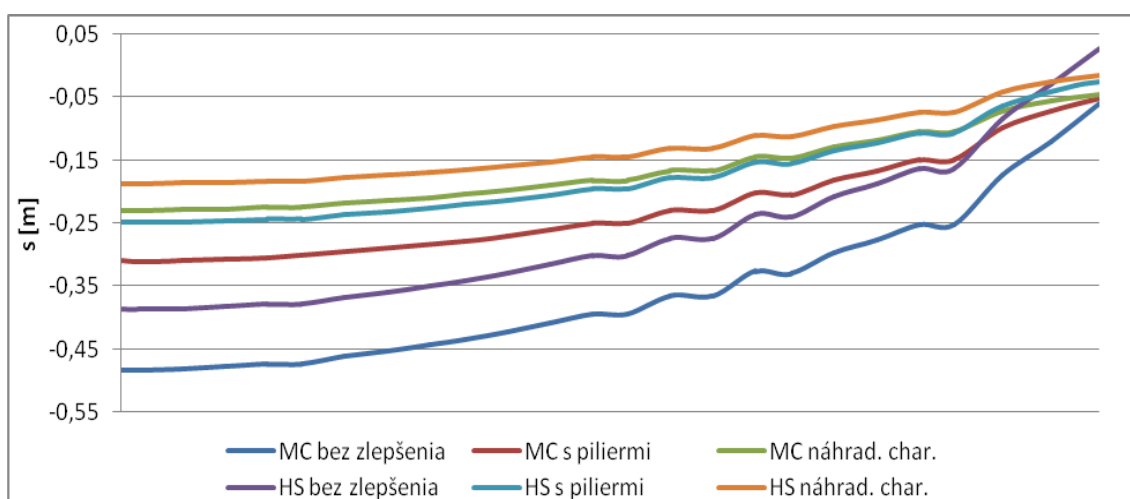
Total displacements u_z (scaled up 20,0 times)
 Maximum value = -0,01522 m
 Minimum value = -0,1870 m

Obrázok 5-27: Konečné sadnutie ($s_{\max} = 0,1870$ m)



Obrázok 5-28: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model HS s náhradnými charakteristikami

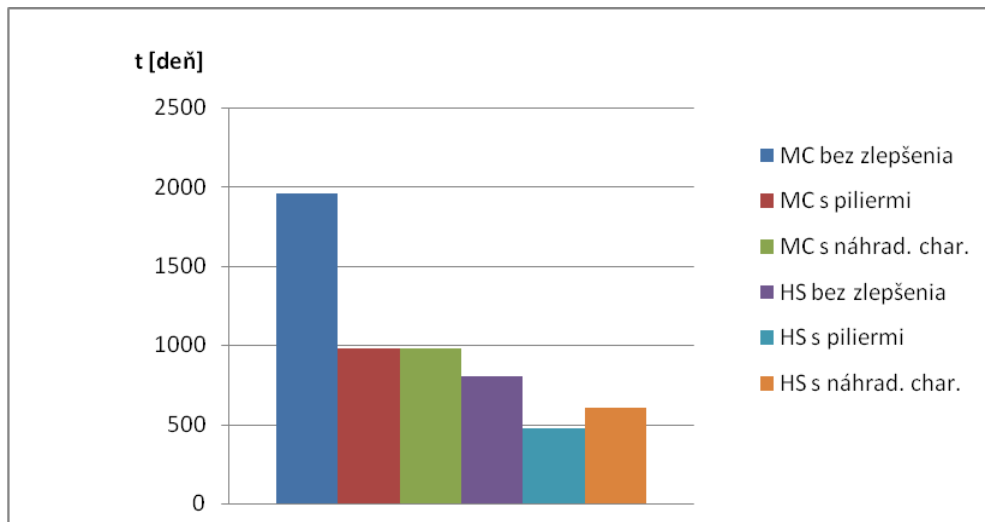
5.3 Porovnanie výsledkov



Obrázok 5-29: Porovnanie konečných zvislých deformácií pod zeminovou doskou

Porovnaním konečných deformácií je vidieť, že najväčšie deformácie boli získané pri výpočtoch bez zlepšenia podložja, narozdiel od modelov kde boli použité náhradné charakteristiky. Celkovo sú hodnoty sadnutia pri výpočtoch konštitučným modelom Hardening Soil menšie ako pri výpočte modelom Mohr-Coulomb. Najmenšie konečné sadnutie je v modeli HS s náhradnými charakteristikami (0,1870 m) a najväčšie sadnutie v modeli MC bez zlepšenia podložja (0,4827 m).

Čo sa týka doby konsolidácie, najdlhšia doba bola dosiahnutá v modeli MC bez zlepšenia. Najkratší čas potrebný na konsolidáciu bol dosiahnutý v modeli HS s piliermi.



Obrázok 5-30: Porovnanie doby konsolidácie

Pri výpočtoch kde bolo zlepšenie modelované štrkovými piliermi, boli sledované aj napätia na pilieroch a medzi nimi a následne vypočítaný pomer napätia „n“. Porovnaním hodnôt „n“ zistíme, že pri výpočtoch HS modelom sú hodnoty menšie než pri výpočtoch konštitučným modelom MC.

6 ZÁVER

Cieľom diplomovej práce bolo skúmanie vývoja klenbového efektu nad štrkovými piliermi v závislosti na zmene rôznych parametrov ako sú raster pilierov, výška násypu, materiál násypu a štrkových pilierov.

V prvej fáze tejto práce boli zhrnuté teoretické poznatky o štrkových pilieroch a o empirických prístupoch ku klenbovému efektu. V ďalšej fáze bola uskutočnená analýza klenbového efektu pomocou nemeckej metódy EBGEO a následne pomocou numerického modelovania v programe Plaxis 3D. Zmena klenbového efektu bola sledovaná pri zmene výšky násypu, osovej vzdialenosti, tuhosti pilierov, materiálu násypu a materiálu pilierov. V ďalšej časti druhej fázy bola pomocou numerického modelovania namodelovaná kruhová nádrž založená na štrkových pilieroch, kde boli sledované deformácie pri zmene konštitučných modelov zemín a pri aplikovaní náhradných charakteristík.

➤ Z analýzy klenbového efektu môžeme konštatovať:

Hodnoty pomeru "n" sú vždy najmenšie pri **osovej vzdialenosti** 2,8 m (pomer $s/D = 4$). Dá sa povedať, že pri skúmanej hodnote $s = 2,1$ m (pomer $s/D = 3$) a neodvodnených podmienkach sa klenbový efekt prejavuje najviac, zatiaľ čo pri odvodnených podmienkach faktor koncentrácie napätia klesá so zvyšujúcou sa osovou vzdialenosťou a to pri všetkých analýzach.

Zmena **výšky násypu** ovplyvňuje klenbový efekt len pri neodvodnených podmienkach a to tak, že s rastúcou výškou násypu sa zvyšuje aj pomer napätí. Najvyššie hodnoty boli dosiahnuté pri maximálnej výške 4,5 m. Pri odvodnených podmienkach zmena výšky násypu nemá väčší vplyv na zmenu hodnoty pomeru napätí a tá zostáva konštantná.

Zmena **uhlu vnútorného trenia násypu** nemá pri numerickom modelovaní väčší vplyv na klenbový efekt. Pomer napätí pri zmene uhlu ostáva relatívne konštantný.

Pri zmene **uhlu vnútorného trenia pilierov** sa so zväčšujúcou hodnotou ϕ zvyšovala aj hodnota pomeru napätí, ako pri odvodnených tak aj pri neodvodnených podmienkach.

Klenbový efekt sa najviac prejavoval pri $\varphi = 45^\circ$ a najmenej pri $\varphi = 25^\circ$. Dá sa povedať, že klenbový efekt sa výraznejšie prejavuje so zväčšujúcou sa pevnosťou pilierov (danou uhlom vnútroného trenia).

Zmena **tuhosti pilierov** bola charakterizovaná pomerom tuhostí piliera a zeminy, kde tuhosť zeminy bola konštantná a menila sa tuhosť pilierov. Hodnota pomeru napätí výrazne stúpa do hodnoty pomeru $E_p/E_z = 10$ a od hodnoty $E_p/E_z = 20$ je pomer napätí už konštantný. Dá sa teda povedať, že zvyšovanie tuhosti pilierov nad hodnotu pomeru $E_p/E_z = 20$ nemá vplyv na klenbový efekt.

Voda má tiež vplyv na klenbový efekt. Pri **neodvodnených podmienkach** bolo dosiahnutých vyšších hodnôt pomeru napätí než pri **podmienkach odvodnených**. Je to dané vztlakom vody pôsobiacim na zeminu medzi pilierami, ktorá bola modelovaná ako neodvodnená.

Metóda návrhu klenby pomocou BS 8006 sa javí ako veľmi orientačná a nepostačujúca, nakoľko nezohľadňuje vplyv pevnostných charakteristík pilierov a násypu. Nemeckou metóda EBGEO je možné zohľadniť φ pilierov, raster a výšku násypu. Avšak táto metóda je vhodná len pre väčšie osovú vzdialenosť (pre pomer $s/D > 2$), nakoľko pri osovej vzdialenosti $s = 1,4$ m ($s/D = 2$) boli vypočítané nereálne vysoké hodnoty pomeru napätí. Pri osových vzdialenostiach 2,1 ($s/D = 3$) a 2,8 m ($s/D = 4$) sa výsledky približovali k výsledkom získaným numerickou analýzou. Pre zohľadnenie klenbového efektu sa teda metóda EBGEO javí ako dostačujúca.

➤ Výsledky analýzy kruhovej nádrže:

V Tabuľke 6-1 sú zhrnuté konečné deformácie ako aj konsolidačný čas. Najmenšie deformácie vykazoval model HS s náhradnými charakteristikami. Je to spôsobené väčšou tuhosťou HS v počiatočných zaťažovaniach. V konštitučnom modeli HS sa moduly zvyšujú v závislosti na zvyšujúcom sa napätí, čo MC neumožňuje. Vo všetkých prípadoch kedy bolo podložie zlepšené, došlo k urýchleniu konsolidácie a zníženiu deformácii. Najnižší konsolidačný čas bol dosiahnutý pri výpočte v modeli HS so štrkovými piliermi. Pri porovnaní modelov s piliermi a náhradnými charakteristikami, boli dosiahnuté (v oboch modeloch HS aj MC) v modeli s náhradnými charakteristikami

menšie deformácie ako aj kratšia doba konsolidácie. Pri modelovaní pilierov numerickým modelovaním, dochádza k výraznému nárastu počtu prvkov, čo vedie k zvýšeniu nárokov na čas a výpočetnú techniku. Navyiac v takýchto modeloch nemožno zaviesť vplyv technológie, kedy dochádza k roztlačovaniu štrkového piliera a tým aj k zhutneniu okolitého podložia. Preto je na zváženie projektanta a type riešenej úlohy, ktorý prístup zvolí.

Tabuľka 6-1: Zhrnutie konečných sadnutí kruhovej nádrže

model	konštitučný model	zlepšenie	konečné sadnutie	čas konsolidácie
MC bez zlepšenia	MC	-	0,4827 m	1955 dní
MC s piliermi	MC	štrk. piliere	0,3102 m	981,4 dní
MC s náhradnými char.	MC	náhradné char.	0,2296 m	979,4 dní
HS bez zlepšenia	HS	-	0,3870 m	472,5 dní
HS s piliermi	HS	štrk. piliere	0,2486 m	472,5 dní
HS s náhradnými char.	HS	náhradné char.	0,1870 m	601,3 dní

ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] MASOPUST, Jan. *Speciální zakládání staveb 2. díl*. první. Brno: AKADEMICKÉ NAKLADATELSTVÍ CERM, 2006. ISBN 80-7204-489-3.
- [2] MIČA, Lumír. *Zemní konstrukce: se zaměřením na dopravní stavby* [online]. 2004 [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: <https://intranet.study.fce.vutbr.cz/>
- [3] Hloubkové vibrační zhutňování zemin. In: *KELLER - speciální zakládání staveb* [online]. 2009 [cit. 2014-01-06]. Dostupné z: http://www.kellergrundbau.cz/technologie/technologie_hloubkove.aspx
- [4] GANGAKHEDKAR, Rutugandha. *GEOSYNTHETIC REINFORCED PILE SUPPORTED EMBANKMENTS*. 2004. Dostupné z: http://ufdcimages.uflib.ufl.edu/uf/e0/00/48/84/00001/gangakhedkar_r.pdf. University of Florida.
- [5] INDRARATNA, Buddhima, Sudip BASACK a Cholachat RUJIKIATKAMJORN. *Numerical solution of stone column improved soft soil considering arching, clogging and smear effects*. 2013. Dostupné z: ro.uow.edu.au
- [6] DEB, Kousik. *A mathematical model to study the soil arching effect in stone column-supported embankment resting on soft foundation soil*. 2010, 13 s. Dostupné z: www.sciencedirect.com
- [7] SATIBI, Syawal, Raymond VAN DER MEIJ a Martino LEONI. *PILED EMBANKMENTS: LITERATURE REVIEW AND REQUIRED FURTHER RESEARCH USING NUMERICAL ANALYSIS*. Stuttgart, 2007, 38 s. Dostupné z: www.uni-stuttgart.de
- [8] SATIBI, Syawal. *Numerical Analysis and Design Criteria of Embankments on Floating Piles* [online]. 2009 [cit. 2014-01-06]. ISBN 978-3-921837-62-7. Dostupné z: www.uni-stuttgart.de. Disertační práce. Universität Stuttgart.

[9] RAJAGOPAL, K. Geosynthetics and Reinforced Soil Structures: Geosynthetic Reinforced Pile Platforms. [online]. [cit. 2014-12-11]. Dostupné z:

<http://nptel.ac.in/courses/105106052/downloads/Lecture-26.pdf>

[10] KOIŠ, Roman a Daniel LEMÁK. STATIKA OLOMOUC, s.r.o. *KLOBOUKY U BRNA - AREÁL ČERPO a.s. Praha, Obnova skladovacích kapacit PH a nádrž na ropu: Technická zpráva-konstrukční část-spodní stavba*. 2004, 19 s.

[11] STARÝ, Václav. GEOTREND, spol. s r.o. *ZPRÁVA O GEOTECHNICKÉM PRŮZKUMU NA LOKALITĚ KLOBOUKY U BRNA – AREÁL ČERPO: OBNOVA SKLADOVACÍCH KAPACIT PH A NÁDRŽ NA ROPU*. 2004, 15 s.

ZOZNAM OBRÁZKOV

Obrázok 2-1: Oblasť použitia hĺbkového vibračného zhutňovania [3]	4
Obrázok 2-2: Použitie pod základovou pätkou [3].....	5
Obrázok 2-3: Príprava a plnenie [3].....	6
Obrázok 2-4: Zapúšťanie, zhutňovanie a dokončovacie práce (zľava doprava) [3].....	7
Obrázok 2-5: Systém Franki [2]	8
Obrázok 2-6: Mechanizmus porušenia osamelého piliera v homogénnej zemine [2]	9
Obrázok 2-7: Mechanizmus porušenia vo vrstevnatom podloží [2]	10
Obrázok 2-8: Spôsoby porušenia skupiny pilierov [2].....	10
Obrázok 2-9: Koncept elementárnej bunky [2].....	11
Obrázok 2-10: Štrkový pilier v pružnom polopriestore [1].....	12
Obrázok 2-11: Vzťah medzi uhlom vnútorného trenia piliera a stupňom zlepšenia zeminy pre rôzne osové vzdialenosti pilierov.....	15
Obrázok 3-1: Klenbový efekt [6]	16
Obrázok 3-2: Rozdelenie napätia na elementárnej bunke [2].....	17
Obrázok 3-3: Popis klenbového efektu Terzaghiho metódou [7]	18
Obrázok 3-4: Rozdelenie napätia v telese násypu podľa Terzaghiho metódy „padacích dverí“ [7]	19
Obrázok 3-5: Model klinu zeminy (a) 2D, (b) 3D [7]	20
Obrázok 3-6: Klenba podľa Britskej normy (Alexiew, 2004) [7].....	21
Obrázok 3-7: Klenbový efekt – rovnovážna analýza na korune klenby (a), rovnovážna analýza na hlave piliera (b) [7].....	23
Obrázok 3-8: Typické rozloženie zvislého napätia v telese násypu [7]	24
Obrázok 3-9: „Multi-arching“ model [7].....	25
Obrázok 3-10: Oblasť uvažovanej elementárnej bunky pre štvorcový a trojuholníkový raster [8].....	26
Obrázok 3-11: Rozdelenie napätia v telese násypu podľa „Multi-arching“ modelu [7]	26
Obrázok 4-1: Vzťah φ a n pri osovej vzdialenosti $s = 1,4$ m, pre rôzne výšky násypu	29
Obrázok 4-2: Vzťah φ a n pri osovej vzdialenosti $s = 2,1$ m, pre rôzne výšky násypu	30
Obrázok 4-3: Vzťah φ a n pri osovej vzdialenosti $s = 2,8$ m, pre rôzne výšky násypu	31
Obrázok 4-4: Porovnanie vzťahu uhlu vnútorného trenia násypu a " n " pri rôznych osových vzdialenostiach (hodnoty n sú pri výške násypu 4,5 m)	32
Obrázok 4-5: Pôdorys modelu v programe Plaxis 3D (s – osová vzd. pilierov), s vyznačenými miestami sledovania napätia (červené body)	33
Obrázok 4-6: Celkový pohľad na model.....	34
Obrázok 4-7: Vplyv výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m.....	35
Obrázok 4-8: Vplyv výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m.....	36

Obrázok 4-9: Vplyv výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m.....	36
Obrázok 4-10: Vplyv uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m.....	37
Obrázok 4-11: Vplyv uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m.....	38
Obrázok 4-12: Vplyv uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m.....	38
Obrázok 4-13: Vplyv uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m.....	40
Obrázok 4-14: Vplyv uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m.....	40
Obrázok 4-15: Vplyv uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m.....	41
Obrázok 4-16: Vplyv tuhosti pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m.....	42
Obrázok 4-17: Vplyv tuhosti pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m.....	43
Obrázok 4-18: Vplyv tuhosti pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m.....	43
Obrázok 4-19: Porovnanie vplyvu výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m	45
Obrázok 4-20: Porovnanie vplyvu výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m	46
Obrázok 4-21: Porovnanie vplyvu výšky násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m	46
Obrázok 4-22: Vodorovné napätie σ_x v reze pre model s osovou vzd. 1,4 m	47
Obrázok 4-23: Vodorovné napätie σ_x v reze pre model s osovou vzd. 2,1 m	47
Obrázok 4-24: Vodorovné napätie σ_x v reze pre model s osovou vzd. 2,8 m	48
Obrázok 4-25: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m	49
Obrázok 4-26: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m	49
Obrázok 4-27: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m	50
Obrázok 4-28: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 1,4 m	50
Obrázok 4-29: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,1 m	51
Obrázok 4-30: Porovnanie vplyvu uhlu vnútorného trenia pilierov na faktor koncentrácie napätia pri osovej vzdialenosti 2,8 m	51

Obrázok 5-1: Lokalita na mape vyznačená červeným krúžkom (www.mapy.cz)	52
Obrázok 5-2: Pôdorys modelu (červené body označujú miesta, kde boli skúmané napätia)	55
Obrázok 5-3: Rez modelom	56
Obrázok 5-4: Celkový pohľad na model.....	57
Obrázok 5-5: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,2458$ m)	58
Obrázok 5-6: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,2103$ m).....	58
Obrázok 5-7: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,4827$ m)	59
Obrázok 5-8: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model MC bez zlepšenia	59
Obrázok 5-9: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,1472$ m)	60
Obrázok 5-10: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,1234$ m).....	61
Obrázok 5-11: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,3102$ m)	61
Obrázok 5-12: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model MC so štrkovými piliermi	62
Obrázok 5-13: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,1470$ m)	63
Obrázok 5-14: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,1298$ m).....	63
Obrázok 5-15: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,2296$ m)	64
Obrázok 5-16: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model MC s náhradnými charakteristikami	64
Obrázok 5-17: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,2033$ m)	65
Obrázok 5-18: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,1910$ m).....	66
Obrázok 5-19: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,3870$ m)	66
Obrázok 5-20: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model HS bez zlepšenia	67
Obrázok 5-21: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,1059$ m)	68
Obrázok 5-22: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,0981$ m).....	68
Obrázok 5-23: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,2486$ m)	69
Obrázok 5-24: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model HS so štrkovými piliermi	69
Obrázok 5-25: Sadnutie po prvom zaťažení ($s_{max} = 0,1168$ m)	70
Obrázok 5-26: Sadnutie po druhom zaťažení ($s_{max} = 0,1121$ m).....	71
Obrázok 5-27: Konečné sadnutie ($s_{max} = 0,1870$ m)	71
Obrázok 5-28: Porovnanie zvislých deformácií pod zeminovou doskou pre model HS s náhradnými charakteristikami	72
Obrázok 5-29: Porovnanie konečných zvislých deformácií pod zeminonovu doskou	72
Obrázok 5-30: Porovnanie doby konsolidácie	73

ZOZNAM TABULIEK

<i>Tabuľka 2-1: Hodnoty zlepšenia základovej pôdy "n" štrkovými piliermi, pre rôzne osové vzdialenosti a rôzne φ pilierov.....</i>	<i>14</i>
<i>Tabuľka 4-1: Materiálové charakteristiky ílu pre numerický model.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabuľka 4-2: Materiálové charakteristiky mat. násypu pre numerický model.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabuľka 4-3: Materiálové charakteristiky materiálu Š.P. pre numerický model.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabuľka 4-4: Hodnoty pomeru "n" v závislosti na zmene výšky a uhlu vnútorného trenia násypu pri osovej vzdialenosti 1,4 m.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabuľka 4-5: Hodnoty pomeru "n" v závislosti na zmene výšky a uhlu vnútorného trenia násypu pri osovej vzdialenosti 2,1 m.....</i>	<i>30</i>
<i>Tabuľka 4-6: Hodnoty pomeru "n" v závislosti na zmene výšky a uhlu vnútorného trenia násypu pri osovej vzdialenosti 2,8 m.....</i>	<i>31</i>
<i>Tabuľka 4-7: Dosiagnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu výšky násypu.....</i>	<i>35</i>
<i>Tabuľka 4-8: Dosiagnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu uhlu vnútorného trenia násypu.....</i>	<i>37</i>
<i>Tabuľka 4-9: Dosiagnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu uhlu vnútorného trenia materiálu štrkových pilierov.....</i>	<i>39</i>
<i>Tabuľka 4-10: Dosiagnuté výsledky pomeru napätí pri analýze vplyvu tuhosti štrkových pilierov.....</i>	<i>42</i>
<i>Tabuľka 5-1: Materiálové charakteristiky pre konštitučný model Mohr-Coulomb.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabuľka 5-2: Materiálové charakteristiky pre konštitučný model Hardening Soil.....</i>	<i>54</i>
<i>Tabuľka 5-3: Hodnoty napätí pre model MC so štrkovými piliermi.....</i>	<i>60</i>
<i>Tabuľka 5-4: Materiálove charakteristiky zlepšených zemín pre MC model.....</i>	<i>62</i>
<i>Tabuľka 5-5: Hodnoty napätí pre model HS so štrkovými piliermi.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabuľka 5-6: Materiálové charakteristiky pre konštitučný model Hardening Soil.....</i>	<i>70</i>
<i>Tabuľka 6-1: Zhrnutie konečných sadnutí kruhovej nádrže.....</i>	<i>76</i>

ZOZNAM SKRATIEK A SYMBOLOV

BS		skratka britskej normy
HS		konštitučný model Hardening Soil
MC		konštitučný mode Mohr-Coulomb
SC		stone columns (štrkové piliere)
Š.P.		štrkové piliere
3D		skratka pre trojrozmerný priestor
a	[m]	priemer pilierov
a_p	[m]	faktor plochy nahradenia
A	[m ²]	plocha ovplyvnená pilierom
A_c	[m ²]	plocha štrkového piliera
A_s	[m ²]	plocha zeminy
b	[m]	osová vzdialenosť pilierov
c_{ef}	[kPa]	efektívna súdržnosť
c_u	[kPa]	totálna súdržnosť
c_z	[kPa]	súdržnosť okolitej zeminy
C	[-]	parameter charakterizujúci raster pilierov
C_c	[-]	koeficient závislý na výške násypu a priemeru piliera
d_1	[m]	priemer štrkového piliera
d_2	[m]	priemer náhradnej bunky
D	[m]	priemer piliera
D_e	[m]	priemer elementárnej bunky
e_{int}	[-]	číslo pórovitosti
E_{def}	[MPa]	deformačný modul
E_{cod}	[MPa]	edometrický modul
E_p	[MPa]	modul pružnosti piliera
E_z	[MPa]	modul pružnosti okolitej zeminy
G	[N]	tiaž zeminy
h_g	[m]	výška klenby
H	[m]	výška násypu
$k_{x/y}$	[m/deň]	súčiniteľ priepustnosti v horizontálnom smere

k_z	[m/deň]	súčiniteľ priepustnosti vo vertikálnom smere
K_a	[-]	súčiniteľ aktívneho zemného tlaku
L	[m]	dĺka pilierov
m	[-]	vplyv zvyšovania modulov
n	[-]	stupeň zlepšenia/pomer napätí
p_{ref}	[kPa]	referenčné napätie
s	[m]	osová vzdialenosť pilierov
s_c	[m]	sadnutie štrkového piliera
s_z	[m]	sadnutie základovej pôdy
w	[kNm ⁻¹]	tiaž zeminy na jednotku dĺžky
w_s	[kN]	tiaž zeminy na jeden pilier
β	[-]	pomer sadnutia vyztuženej a nevyztuženej zeminy
γ	[kNm ⁻³]	objemová tiaž zeminy
γ_p	[kNm ⁻³]	objemová tiaž pilierov
γ_{sat}	[kNm ⁻³]	objemová tíha saturovanej zeminy
γ_z	[kNm ⁻³]	objemová tiaž zeminy
Δd_l	[m]	rozšírenie el. bunky v pružnom polopriestore
$\Delta\sigma_h$	[kPa]	rozdiel horizontálneho tlaku piliera na zeminu a tlaku zeminy na pilier
$\varphi_{u/ef}$	[°]	uhol vnútorného trenia totálny/efektívny
ν	[-]	Poissonovo číslo
π	[-]	Ludolfovo číslo
$\sigma_{h,z}$	[kPa]	horizontálne napätie v zemine
σ_{or}	[kPa]	geostatické napätie
σ_p	[kPa]	napätie nad pilierom
$\sigma_{v,c}$	[kPa]	zvislé napätie na štrkovom pilieri
$\sigma_{v,z}$	[kPa]	vertikalne napätie v základovej pôde
σ_z	[kPa]	napätie nad zeminou
τ_{xz}	[kPa]	šmykové napätie
γ	[°]	uhol dilatancie

ZOZNAM PRÍLOH

Príloha A

Výsledky vypočítané nemeckou metódou EBGeo

Príloha B

Výsledky získané numerickým modelovaním pri zmene φ materiálu násypu

Príloha C

Výsledky získané numerickým modelovaním pri zmene φ materiálu pilierov

Príloha D

Výsledky získané numerickým modelovaním pri zmene tuhosti pilierov