

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra geotechniky a podzemního stavitelství



Problematika chování výsypkových těles řešených pomocí geotechnického softwaru

The issue of the behaviour of dump bodies solved using geotechnical software

Student:

Bc. Milan Větrovský

Vedoucí diplomové práce:

doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta

Ostrava 2014

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra geotechniky a podzemního stavitelství

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milan Větrovský**
Studijní program: N3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3607T035 Geotechnika
Téma: **Problematika chování výsypkových těles řešených pomocí geotechnického softwaru**
The Issue of The Behavior of Dump Bodies Solved Using Geotechnical Software

Zásady pro vypracování:

1. úvod k dané problematice
2. popis výsypkového materiálu, odlišnosti od přírodních zemín, hlavní parametry použitelné v modelování, zkušenosti z ČR a zahraničí
3. transformace geodetických měření do modelu (tvorba ploch a těles, jejich průniky), tvorba geotechnického modelu 3D, výpočty na modelovém příkladu
4. vyhodnocení, interpretace výsledků, doporučení
5. závěr

Seznam doporučené odborné literatury:


- [1] LAHUTA, Hynek. *Doc.Dr.Ing.Hynek Lahuta - Informační stránka* [online]. 2005, poslední revize 25.5.2010. Dostupné z: <www.fast.vsb.cz/lahuta>
- [2] ČSN EN 1997-1 : 2006. *Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 1: Obecná pravidla*. Praha: Český normalizační institut, 2006. 138 s.
- [3] ČSN EN 1997-2 : 2008. *Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy*. Praha: Český normalizační institut, 2008. 152 s.
- [4] BRINGREVE, J.B.R.: *Plaxis reference manual*. Amsterdam: Vydavatelství Balkema 2011. 272 s.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta**

Datum zadání: 28.02.2014

Datum odevzdání: 01.12.2014


doc. RNDr. Eva Hruběšová, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....
podpis studenta

Prohlašuji, že

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že jeden výtisk diplomové práce bude uložen v Ústřední knihovně VŠB-TUO k prezenčnímu nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

VĚTROVSKÝ, Milan. *Problematika chování výsypkových těles řešených pomocí geotechnického softwaru*, diplomová práce.

Ostrava: VŠB-TUO, Fakulta stavební, 2014

Klíčová slova: Plaxis 3D, stabilita svahů, výsypka, modelování, metoda konečných prvků,

Práce se zabývá chováním výsypkových těles řešených softwarovým programem Plaxis 3D. Tento program byl použit pro vytvoření velkoobjemového prostorového napěťo-deformačního stavu výsypkových těles. Aby bylo možné sestavit geotechnický model, bylo potřeba seznámit se s problematikou výsypkových těles, jejich specifiky, parametry a úpravou geodetických dat. Tato data jsou následovně upravena v programu AutoCAD civil 3D a importována do programu Plaxis 3D, kde jsou vytvořeny geotechnické modely jednotlivých fází ukládání výsypky. Na takto vytvořeném modelu byly provedeny výpočty. Výstupem těchto výpočtů jsou napěťo-deformační stavy, čerpání smykové pevnosti a stupně stability jednotlivých fází ukládání výsypkových materiálů.

Annotation

VĚTROVSKÝ, Milan. *The issue of the behaviour of dump bodies solved using geotechnical software*, The diploma thesis.

Ostrava: VŠB-TUO, Faculty of Civil Engineering, 2014

Keywords: Plaxis 3D, slope stability, dump, modeling, finite element method

The work deals with the behavior of dump objects solved by Plaxis 3D software. This program was used to create spatial bulk stress-strain state of the dump objects. To be able to compile geotechnical model, it was necessary to study the issue of dump object, their specifics, parameters and geodetic data adjustment. These data are subsequently adjusted in AutoCAD Civil 3D and imported into the program Plaxis 3D, where are formed geotechnical models of different stages of deposition dumps. On such a created model were performed calculations. The outcome of these calculations are stress-strain states, relative shear stress and safety factor of individual phases of dump waste deposition.

Obsah

1	Úvod.....	1
2	Příklady deformací výsypek.....	4
3	Popis výsypkového tělesa a jeho materiálu.....	7
3.1	Výsypka	7
3.1.1	Podložka	8
3.1.2	Geomechanická kvalita sypaniny	10
3.1.3	Tvarování svahů	13
3.1.4	Charakteristika ukládaných materiálů	14
3.1.5	Průběh konsolidace.....	17
3.1.6	Hydrogeologické poměry	17
3.2	Stabilita a monitoring.....	18
3.2.1	Monitoring výsypkový těles	19
3.3	Zkušenosti ze zahraničí.....	20
3.4	Parametry použitelné k modelování.....	22
3.4.1	Mohr-Coulombův model	22
3.4.2	Modifikovaný Cam Clay model	23
3.4.3	Parametry použité k modelování	24
4	Tvorba 3d modelu	25
4.1	Informace o modelovaném území.....	26
4.2	Tvorba povrchů.....	27
4.2.1	Postup tvorby povrchů.....	28
4.2.2	Úprava povrchů	29
4.3	Tvorba objemů	31
4.4	Tvorba sítě MKP	33

4.5	Nastavení výpočtu.....	34
4.5.1	Plastic – Plastický výpočet	35
4.5.2	Safety – Výpočet bezpečnosti.....	35
4.5.3	Výpočetní fáze	36
5	Vyhodnocení výsledků	38
5.1	Výstupy napěťo-deformačních stavů	38
5.1.1	Napětí.....	38
5.1.2	Celkové posuny	41
5.1.3	Horizontální posuny	44
5.2	Čerpání smykové pevnosti a výskyty plastických bodů	47
5.2.1	Čerpání smykové pevnosti.....	47
5.2.2	Plastické body	50
5.3	Stabilita svahů	53
6	Závěr.....	59
7	Použitá literatura	61
8	Seznam obrázků	62
9	Seznam tabulek	64
10	Seznam příloh.....	64

Seznam použitého značení:

E – modul pružnosti [$\text{MN/m}^2 = \text{MPa}$]

E_{oed} – oedometrický modul [$\text{MN/m}^2 = \text{MPa}$]

E_{def} – modul deformace [$\text{MN/m}^2 = \text{MPa}$]

G – modul pružnosti ve smyku [$\text{MN/m}^2 = \text{MPa}$]

c – soudržnost [kPa]

t – čas [den]

γ – objemová tíha [kN/m^3]

ν – Poissonovo číslo [-]

φ – úhel vnitřního tření[°]

$\sigma_1 \sigma_3$ – hlavní napětí [MPa]

σ_t – tangenciální napětí[MPa]

1 ÚVOD

Hlavním cílem této práce je vytvoření velkoobjemového 3D modelu výsypky dolu Bílina v softwarovém programu Plaxis 3D o velikosti 500x1000m. Na vytvořeném modelu provést základní výpočty stability, deformací a napětí. Pro provedení výpočtu bylo nutné seznámit se jak s problematikou výsypkových těles, jejich materiálovými vlastnostmi a geodetickým zaměřením. Tak i se softwarovými programy, s jejichž pomocí se řeší geometrie výsypkových těles (AutoCAD, Báňský model) nebo jejich deformační a stabilitní analýza (Plaxis 3D).

Řešená výsypka skrývkových materiálů se nachází nedaleko města Bílina na území Severních Čech, kde se rozprostírá Mostecká hnědouhelná pánev. Zde probíhá nepřetržitá povrchová těžba hnědého uhlí. Povrchová těžba je specifická odtěžením velkých objemů skrývkového materiálu, který se nachází v nadloží uhelné sloje. K odtěžení tohoto materiálu se používají výhradně kolesová rypadla s vysokými těžebními výkony. Technický rozvoj těchto rypadel umožňuje realizaci těžby do stále větších hloubek. S těžbou tohoto materiálu je spojena i jeho doprava, která se provádí výhradně pomocí pásových dopravníků, po kterých materiál putuje a ukládá se na tzv. „výsypku“.[10]



Obr. 1: Vnitřní výsypka dolu Bílina (Severočeské doly a.s.), datum 2014

V technologii povrchového báňského procesu rozeznáváme výsypky vnější nebo vnitřní, které se dělí na převyšené či nepřevyšené. Při otvírce lomových provozů se nejdříve budují vnější výsypky, které jsou zakládány mimo dobývací území. I když je tato varianta ekonomicky a technologicky náročnější, je varianta prostorového oddělení skrývkového a těžebního hospodářství od výsypkového hospodářství pro provoz nesrovnatelně bezpečnější. Výsypka vnitřní se zakládá s odstupem několika let po otvírce lomu ve vytěžených prostorách uhelných slojí. Tyto výsypky jsou umístěny obvykle paralelně se skrývkovou a těžební stranou. V této fázi vývoje jsou ještě provozovány jedna či dvě vnější výsypky, které jsou jakýmsi pojistným ventilem pro ukládání málo vhodných zemin, které se nachází při povrchu skrývky.[10]



Obr. 2: Skrývkové řezy a uhelná sloj (Severočeské doly a.s.), datum 2014

V posledních desetiletích jsou báňské provozování nuceny hlavně ekonomickými aspekty opouštět vnější výsypky a přecházet výhradně na výsypky vnitřní.[10] V roce 2010 se ukončilo zakládání výsypkových materiálů i na vnější výsypky Pokrok a Radovesice dolu Bílina. Tím se prostor vnitřní výsypky stává jediným místem pro ukládání veškerých skrývkových materiálů. Tento postup je samozřejmě možný, ale je nutno si uvědomit, že je to technologicky náročnější a hlavně z hlediska jejich stability bezpečnostně zranitelnější. Při

budování vnitřních výsypek je nutno důsledně zohledňovat všechny poznatky dlouhodobého aplikovaného výzkumu výsypek a výsypkové sypaniny, odvodňování výsypek, jejich podložky a technologických směrnic pro vytváření jednotlivých bezpečných výsypkových etází.

Tyto poznatky byly použity pro vytvoření metodiky modelování v programu Plaxis 3D a následnému nastavení geotechnických parametrů daného modelu pro matematický výpočet stability, napětí-deformačních stavů. Výsledky z modelování mohou posloužit k efektivnějšímu a bezpečnějšímu plánování ukládání materiálů na vnitřní výsypku dolu Bílina. V čemž tkví i přínos této diplomové práce.

2 PŘÍKLADY DEFORMACÍ VÝSYPEK



Obr. 3: Pokles - oblast Braňany r. 2013 (Severočeské doly a.s.)



Obr. 4: Pokles na výsypkové etáži, projev lokální nestability výsypky na lomu Bílina r. 2013 (Severočeské doly a.s.)



Obr. 5: Pohled na vnitřní výsypku lomu Libouš - pokles na výsypce v délce 1500 m činil až 3 m, r. 2012 (Severočeské doly a.s.)



Obr. 6: Pohled na nestabilitu výsypkové etáže – vnitřní výsypka Bílina r. 2014 (Severočeské doly a.s.)



Obr. 7: Lokální sesuv etáže vnitřní výsypky dolu Bílina 2014 (Severočeské doly a.s.)

3 POPIS VÝSYPKOVÉHO TĚLESA A JEHO MATERIÁLU

3.1 Výsypka

Výsypkový materiál je v porovnání s přírodními materiály velmi kyprý, jeho index relativní ulehlosti dosahuje $I_d < 0,33$. Výsypka je specifická tím, že se jedná o velmi mocný nehtuňný násyp a bez přijetí adekvátních opatření není vhodný k zakládání staveb. Většinou se na výsypkách ukládají překonsolidované jílové, jílovo-písčité až jílovcové hmoty. To znamená, že v dávné minulosti byla v některých případech původní mocnost skrývkových materiálů o desítky až stovky metrů větší než je dnes. Z tohoto důvodu se při rozpojování zeminy, přepravě a zakládání extrémně mění její fyzikální a mechanické vlastnosti.

Za posledních 20 let systematického pozorování, sledování a výzkumu výsypek se ukázalo, že při stavbě vysokých výsypek je nutno důsledně dodržet celou řadu vzájemně provázaných faktorů, kterými jsou [12]:

- Inženýrsko-geologické, hydrogeologické a hydrologické podmínky v podzákladí a důsledné odvodnění podložky výsypkového tělesa
- Geometrická a litologická kvalita sypaniny při jejím toku do tělesa výsypky
- Technologický postup zakládání jednotlivých etáží
- Vliv časového průběhu konsolidace
- Poznatky o vlivu dopravy na vlastnosti, strukturu a chování sypaniny
- Poznatky o podmínkách, technologických variantách a metodách zakládání výsypkové sypaniny
- Poznatky o možných metodách účinné sanace a stabilizace výsypkových těles
- Důsledné dodržování báňských bezpečnostních předpisů a jejich kontrola

3.1.1 Podložka

Geomechanická kvalita, sklon a správné odvodnění podložky, toto jsou hlavní faktory, které mají zásadní vliv na konečnou stabilitu výsypkového tělesa.

Podložka je tvořena většinou překonzolidovanými jílovci se zbytky uhelné sloje. Podle inženýrsko-geologické klasifikace se jedná o jemnozrnné zeminy třídy F7/MV popř. F8/CV, CH (hlíny nebo jíly s vysokou plasticitou). Konzistence je výhradně tvrdá. Smykovou pevnost a únosnost uvažujeme dle laboratorních zkoušek prováděných na dobývací straně [11]:

$$\varphi' = 20^\circ$$

$$c' = 60 - 90 \text{ kPa}$$

$$R_d = 500 - 700 \text{ kPa}$$

Geomechanická kvalita zemin podložky je jedním z hlavních kritérií pro hodnocení únosnosti podložky a pro stanovení odhadované smykové plochy. Podle typizační směrnice „Odvodňování podloží výsypky“, se únosnost podložky hodnotí členěním do 4 skupin [12]:

▪ zcela nevhodná	< 0,1 MPa
▪ nevhodná	0,1 – 0,2 MPa
▪ podmíněčně vhodná	0,2 – 0,4 MPa
▪ vhodná	> 0,4 MPa

Toto dělení má význam hlavně u vnějších výsypných prostorů. Podložka u vnitřních výsypek bude vyhovovat téměř vždy, jelikož to zaručuje překonsolidace od původního odtěženého masivu.

Morfologie podložky

Reliéf rostlé podložky je důležitým faktorem nejen pro řešení stability a předpovídání vývoje deformací, ale i pro navrhování odvodňování a vlastní budování výsypkového tělesa. Je potřeba předpokládat, že morfologický pokles terénu pod výsypkou může působit jako akumulátor povrchových i podzemních vod. Morfologie podložky vnitřní výsypky dolu Bílina je dána úrovní vyuhlení, svahy těžebních řezů a závěrnými svahy dobývacího prostoru [12].



Obr. 8: Zakládání výsypky na odvodněné a vyuhlené dno lomu r. 2012 (Severočeské doly a.s.)

Rozdělení úklonů podložky vyhodnocujeme následovně:

Sklon 0 – 5 stupňů subhorizontální

Sklon 5 – 12 stupňů ukloněná

Sklon 12 > stupňů velmi ukloněná

Důvodem tohoto rozdělení je skutečnost, že:

- **rozmezí 0 – 5 stupňů** je menší než většina reziduálních pevností všech typů výsypkových zemin. Z toho vyplývá, že se v kontaktní zóně podložky neuplatní další zhoršující faktory a to zejména hydrogeologické. Na podložku o tomto sklonu lze zakládat bez výraznějších stabilitních problémů.

- **rozmezí 5 – 12 stupňů** odpovídá intervalu mezi obvyklými reziduálními a vrcholovými pevnostmi jílovitých zemin tuhé až pevné konzistence. V praxi to znamená, že na takto ukloněné podložce bude stabilita výsypky krátká až středně dobá. Při dlouhodobém trvání se často projevují svahové deformace.
- **rozmezí 12 > stupňů** přesahuje obvyklé hodnoty smykových pevností výsypkových zemin. Na takové podložce nelze počítat ani s krátkodobou stabilitou. Svahové deformace se projeví už v průběhu zakládání nebo v minimálním časovém horizontu po založení.[4]

Hydrogeologické poměry podložky

Hydrologie podložky vnitřní výsypky je v principu jednoduchá. Geologie je tvořena hlavně nepropustnými typy zemin, jako jsou jílovce a uhelné jíly. Pozůstatky uhelných slojí na povrchu podložky jsou relativně propustnější, ale nepředstavují souvislé hydrogeologicky významné polohy.

Povrchová voda popř. pramenní vývěry jsou odváděny pomocí sítí kamenných drenážních per do jám, které se budují v předpolí paty výsypky[11-12].

3.1.2 Geomechanická kvalita sypaniny

Výzkumy před více než 30 lety jednoznačně prokázaly, že geomechanická a technická kvalita zemin ve velké míře rozhoduje o chování a stabilitě výsypkového tělesa a následně o jeho kubaturním využití. Základ hodnocení je dán zejména litologickým charakterem, petrograficko-mineralogickým složením a úrovní konsolidace zemin a hornin skrývky.

Vlastnosti jsou dány hlavně vzájemným poměrem obsahu křemene, jílových minerálů a úrovní uložení ve vertikálním sloupci skrývky. Tyto faktory ovlivňují fyzikální a geomechanické vlastnosti skrývky a na základě toho je možné jednotlivé typy rozdělit do tří hlavních klasifikačních tříd z hlediska použitelnosti a uplatnění zemin ve výsypkových tělesech. [11-12]

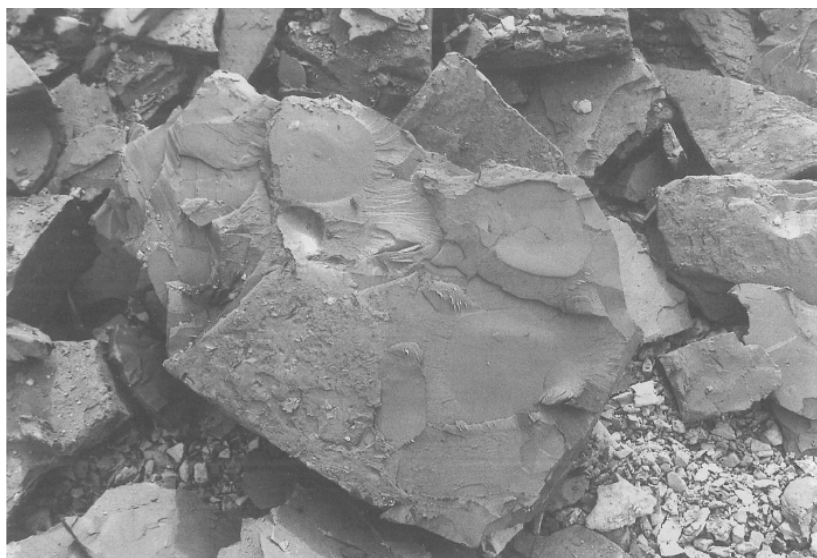
Jsou to:

- **zeminy vhodné pro použití do výsypek**
- **zeminy podmíněně vhodné pro použití do výsypek**
- **zeminy nevhodné pro použití do výsypek**

Tato obecná klasifikace má hlavní uplatnění při ukládání materiálů do vnitřních výsypek resp. směřuje zeminy do různých částí výsypkového tělesa, kde se mohou díky svým specifickým vlastnostem nejlépe uplatnit. Vhodnost uplatnění je dána schopností zeminy přenášet vysoká napětí bez destrukčních změn, objemovou stálostí a malou náchylností k sycení vodou, bobtnání a rozbíjení.

Zeminy vhodné

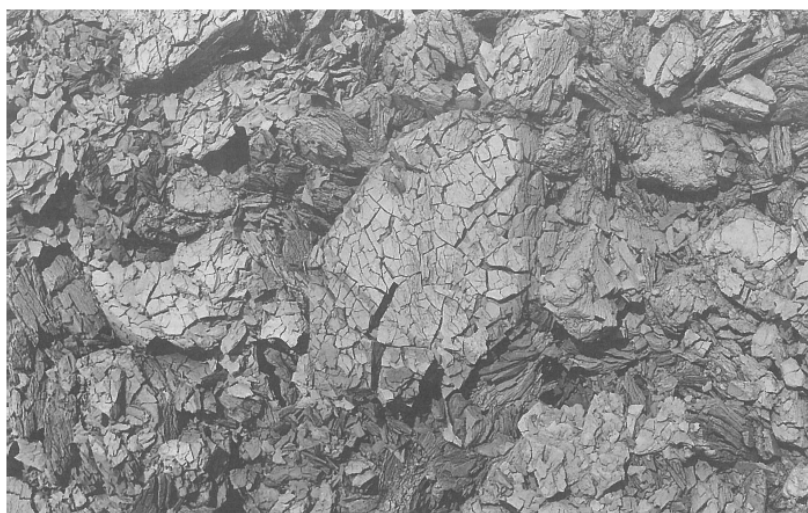
Jsou prakticky všechny zpevněné nebo nezpevněné zeminy s podílem pískových nebo štěrkových zrn převyšujícím 50% objemu zeminy. Dále sem patří jílovito-písčité nebo jílovito-prachovité sedimenty se silným diagenetickým a konsolidačním zpevněním, v jejichž jílovitém podílu se výrazně neuplatňuje montmorillonit. Sypanina tvořená z uvedených typů zemin nemění své vlastnosti ani při dlouhých dopravních trasách mezi skrývkou a výsypkou a je vhodná hlavně pro směřování do **nejspodnějších etáží výsypkového tělesa**. [12]



Obr. 9: Zemina vhodného typu (RNDr. Jiří Zmítka, 2011)

Zeminy podmíněčně vhodné

Zeminy u kterých podíl písčitých zrn kolísá v rozsahu mezi 30 – 50%. Dále to jsou převažující písčito-jílovité a prachovito-jílovité terciární sedimenty, středně zpevněné a konsolidované, pevné až tvrdé konzistence s relativně rovnoměrným zastoupením všech tří hlavních jílových minerálů – kaolinitu, illitu a montmorillonitu. Sypanina tvořená z uvedených zemin mění svou kvalitu jak v průběhu dopravy, tak i v procesu zakládání a je proto vhodná pouze do **středních nebo vyšších zón výsypkových těles**. [12]



Obr. 10: Zemina podmíněčně vhodného typu (RNDr. Jiří Zmítka, 2011)

Zeminy nevhodné

Do zemin nevhodných se řadí málo zpevněné plastické jíly, většinou tuhé až měkké konzistence a rozvětralé horniny. Uvedené typy zemin se projevují výrazným snížením fyzikálních a mechanických parametrů již na skrývkové straně a to výraznými projevy nestability, silnou rozbředavostí a lepidostí. V procesu dopravy dochází k dalším změnám, zemina je prohnětena a na výsypku se dostává v podobě kulovité struktury. Na výsypce se zeminy projevují velmi malou stabilitou i při malé výšce výsypkových etáží. Z těchto důvodů je možno uvažovat se zakládáním nevhodných typů zemin výhradně do **nejvyšších výsypkových etáží** s omezenou sypnou výškou. Jediným příznivým faktorem těchto zemin je jejich vhodnost k rekultivačnímu využití. [12]



Obr. 11: Zemina nevhodného typu a její charakteristická kulovitá struktura (RNDr. Jiří Zmítka, 2011)

Obecně však platí, že materiály by měly být ukládány na výsypku v takovém pořadí, v jakém se nacházely v původním skrývkovém řezu. Tedy zeminy z nejspodnějších vrstev skrývky do nejspodnějších výsypkových etáží. Tato zásada se označuje v praxi jako **řízené směřování toku zemin do výsypky podle geomechanické kvality**.

3.1.3 Tvarování svahů

Vnitřní výsypka lomu Bílina je dnes tvarována výhradně velkstrojovou technologií, tedy pomocí zakladačů, ke kterým je zemina přiváděna pomocí pasových dopravníků od jednotlivých rypadel. Jednotlivé etáže jsou zakládány po vrstvách max. 15 m mocných. Většina etáží je sypána na výšku do 25 m, úvodní etáž však ojediněle přesahuje i 40 m. Svahy se tvarují na tzv. sypaný úhel, který se nejčastěji pohybuje v intervalu od 20-30° s průměrnou hodnotou 26,25° (poměr 1:2). [4] Pro báňský provoz jsou limitem mezní výšky sypání do 40 m, které je nutno posuzovat z hlediska technicko-technologických možností nasazených zakladačů.



Obr. 12: Tvarování koruny výsypky r. 2014 (Severočeské doly a.s.)

S postupným nárůstem objemu zakládáných hmot vznikají nároky na kapacitu vnitřní výsypky. Díky omezeným prostorovým možnostem lze zkapacitnění dosáhnout pouze zvýšením mocnosti a generálního sklonu svahu. Do budoucna se počítá s postupným nastrmováním výsypky. Přitom bude dosahováno sklonů, se kterými se v minulosti zdaleka nepočítalo. To bude vyžadovat značnou pozornost v technologické kázni a zvýšený geotechnický dohled. [4]

3.1.4 Charakteristika ukládaných materiálů

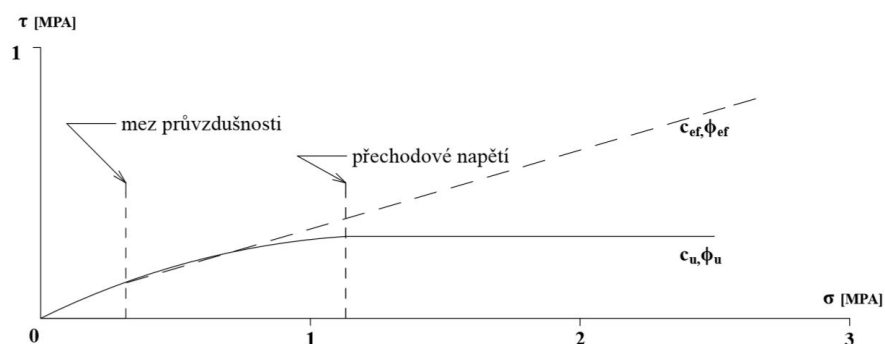
Geologická skladba zakládáných zemin odpovídá stavbě nadloží uhelné sloje na dobývací straně. V celkovém objemu sypaniny jsou různé zrnitostní typy sedimentů od jílu a jílovců, přes písčité jíly až po písky.

Smyková pevnost

Zpočátku se volně nasypaný skrývkový materiál chová jako rockfill z velmi měkkého kameniva s úhlem vnitřního tření 30° a nulovou soudržností. Sypanina je průvzdušná a dobře propustná. [6]

Mírné zakřivení obálky smykové pevnosti při nízkých napětích souvisí s drcením jílovcových úlomků. Při růstu normálového napětí se zvyšuje podíl jemnější frakce v sypanině. Jejím stlačováním se postupně uzavírají mezery mezi zrny.

Ve chvíli, kdy v převážné části objemu sypaniny dojde k uzavření spojitosti mezer mezi úlomky, materiál ztratí průvzdušnost a i dosah propustnosti se sníží na hodnoty blízké propustnosti jílu. Mez kdy přechází efektivní napětí na totální, je nazývána „**mezi průvzdušnosti**“. Obálka smykové pevnosti se v této fázi zakřivuje, tj. klesá sklon tečny k ní a hodnoty efektivní se mění na hodnoty totální a to z důvodu působení pórových tlaků. Hodnota napětí na mezi průvzdušnosti se mění, a to v závislosti na množství drobných úlomků v sypanině. Obvykle se jedná o hodnoty od 0,15 do 0,30 MPa tj. sypanina ztrácí průvzdušnost v hloubce cca 10 až 20m. Hodnota „**přechodového napětí**“ opět závisí na pevnosti úlomků sypaniny a množství drobné frakce. Lze očekávat, že se bude pohybovat zhruba od 0,7 do 1,1 MPa (obr. 13), tj. bude dosažena při mocnosti výsyvky 40 až 70 metrů v závislosti na kvalitě materiálu. [6]



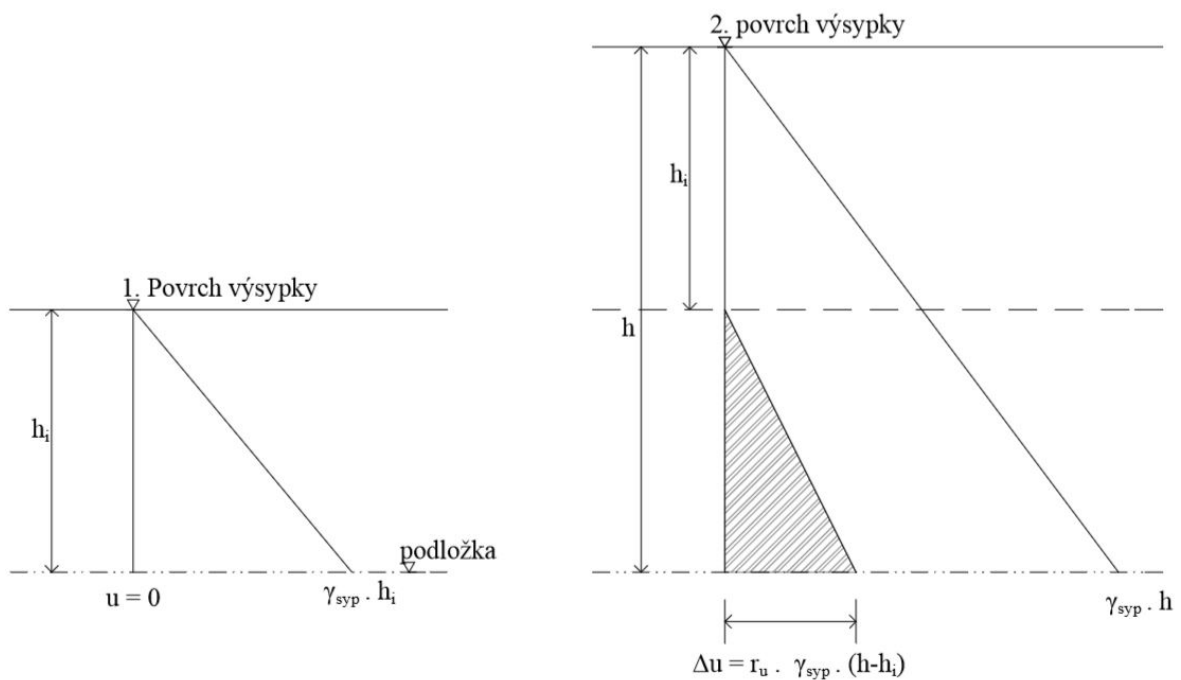
Obr. 13: Totální a efektivní obálka smykové pevnosti jílovcové sypaniny

Z předchozího popisu lze tedy konstatovat, že obálka totální pevnosti je velmi citlivá na aktuální stav materiálu a rozptyl hodnot pro výsytku bude značný. Vlivem hnětení úlomků ve výsytku se obálka smykové pevnosti blíží k efektivní obálce smykové pevnosti přirozeně konsolidovaného jílu. Při obvyklém rozsahu hodnot indexu plasticity pro danou lokalitu je průměrná hodnota $I_p = 45\%$, lze efektivní úhel vnitřního tření očekávat v rozmezí od 10 do 20°. [6]

Obálka efektivní smykové pevnosti má podstatně menší rozptyl než obálka totální smykové pevnosti a je pro posuzování stability výsyvky výrazně výhodnější. Její použití však vyžaduje znalost rozdělení pórového tlaku v tělese výsyvky.

Pórový tlak

Předchozí údaje o totální pevnosti jílovcové sypaniny lze použít pro odvození základních dat a indukovaného pórového tlaku ve výsypci. Pokud napětí od sypané vrstvy nepřekročí na její bázi hodnotu meze průvzdušnosti, pak ve vrstvě nevznikne pórový tlak (obr. 14). Mocnost vrstvy, při níž se na její bázi právě dosáhne meze průvzdušnosti značíme h_i . Další sypání vyvolá pórový tlak tak, že v horní průvzdušné poloze o mocnosti h_i bude pórový tlak $u = 0$. [6]



Obr. 14: Vytváření pórového tlaku v průběhu sypání vodorovné vrstvy

Pórový tlak lze vyjádřit vztahem:

$$u = r_u \cdot \gamma_{syp} \cdot (h - h_i)$$

γ_{syp} – Objemová tíha sypaniny

r_u – součinitel pórového tlaku

Hodnotu součinitele r_u lze uvažovat v rozmezí 0,5 – 0,7. V případě výsypek vykazujících známky nestability bude r_u blízký hodnotě 1,0.

3.1.5 Průběh konsolidace

Konsolidace ve výsypkovém tělese probíhá tak, že se první vrstva nejprve sama stlačuje pod vlivem vlastní tíhy a později i postupným přitěžováním od tíhy dalších etází. Během postupného zvyšování mocnosti sypaniny zaznamenávají její jednotlivé kusy významné změny. Hrudky a kusy čerstvě založené jílovcové sypaniny mají tuhou, pevnou až tvrdou konzistenci a s rostoucí mocností se na hranách drtí a snižuje se mezi nimi mezerovitost.

V důsledku odlehčení při těžbě skrývky bývá v pórech negativní pórový tlak a z tohoto důvodu materiál snadno přijímá vlhkost. Pokud deformační procesy proběhnou za omezeného přístupu vody, nehrozí výrazné zhoršení pevnostních vlastností. Pokud se póry naplní vodou, je výsledkem výsypková zemina měkké až kašovitě konzistence, která již nedovoluje další zvyšování výsypky.[12]

Proces konsolidace a časového průběhu sedání povrchů výsypek byl sledován jak v BPT, tak ve VÚHU Most a J. Zmítka a I. Dykast nezávisle odvodili grafy a rovnice časového průběhu sedání. Z nich vyplývá, že z celkové teoretické hodnoty dodatečného sedání, která se přibližně rovná 10% celkové výšky výsypky, proběhne cca. 90% až 95% za období zhruba do 10 až 15 let. Zbývajících 5% teoretického dosednutí se pak rozloží do blíže neohraničené doby dalších let.

Dlouhodobá sledování a výzkumy konsolidačního procesu také poukázaly na to, že v momentě nasypání výsypkové etáže je mezerovitost sypaniny min. 10 až 15% a proto se udává koeficient nakypření sypaniny $K = 1,10$ až $1,15$. To platí cca pro 90% podíl jílovitého nadloží obou podkrušnohorských revírů. Při výraznějším podílu písků v nadloží (lom Bílina, lom Vršany) se logicky koeficient nakypření snižuje na $K = 1,05$. [12]

3.1.6 Hydrogeologické poměry

Pokud podložka není tvořena z větší části propustnými zeminami, nebo pokud není plošně oddrénována, vytváří se v tělese výsypky horizont nebo horizonty podzemní vody. Tato situace nastává ve většině případů a to ve spodní čtvrtině až třetině výsypky kde zaznamenáváme vodní horizont. S časem a vlivem normálového napětí se piezometrická úroveň ve výsypce postupně zvyšuje.

Časové a geometrické odstupy jednotlivých etází způsobují někdy výraznou vertikální zonálnost. Ta je způsobena tím, že za působení celé škály atmosférických vlivů dochází k rozpadu horniny na drobné částičky v zóně cca 1 m při povrchu výsypky. Další geomechanické změny drobných částiček způsobují, že v tělese vznikne hned několik méně propustných horizontů.[6] Vodní horizont i vznik neutrálních napětí vlivem vztakové vody je v každém případě faktorem, který má zásadní vliv na stabilitu výsypky. Vyskytují-li se tyto poměry uvnitř tělesa v místech, kde nemají zásadní vliv na stabilitu, můžeme je připustit. Nejdůležitější je zajistit stabilitu svahů v okrajových partiích snížením úrovně hladiny vody bezpečně pod úroveň povrchu vhodným uspořádáním odvodňovacích žeber. Takový návrh je ovlivněn geologickou stavbou podloží a geomechanickými vlastnostmi.[6]

Rozpadem kusů jílovců na drobné šupinky vzniká na povrchu jednotlivých etází krycí zvětralinová vrstva. Jednotlivé drobné šupinky a úlomky se vlivem gravitačních sil postupně uspořádají tak, že i při mírně ukloněném povrchu prakticky zamezují vsaku atmosférické vody do výsypky. Mladé a středně staré výsypky s holým povrchem mají vysoce infiltrační schopnost a plně akumulují většinu atmosférických srážek. U starších výsypek, správně tvarovaných a rekultivovaných, infiltrační schopnost výrazně klesá.

3.2 Stabilita a monitoring

Stabilitní výpočty, monitoring a v první řadě úplný soubor vstupních geotechnických, materiálových a geometrických dat a to i ve značně heterogenním prostředí vnitřní výsypky lomu Bílina, to vše je třeba pro to, aby byl konečný výstup co možná nejpřesnější.

Protože vnitřní výsypka lomu Bílina patří z hlediska materiálové skladby mezi nejsložitější zemní tělesa, je nutno tuto skladbu nejprve detailizovat. Následně je nutno definovat geometrické tvary jednotlivých vrstev a přiřadit jim geomechanické parametry či zohlednit jejich časové změny. [4] Sestavení postupového vývojového geologického a geotechnického modelu vnitřní výsypky lomu Bílina, je nutno považovat za základní krok, který pak již nebude složité doplňovat a upřesňovat. Cílem modelování je průběžně a hodnověrně ověřovat výsledky skutečného chování výsypky a vytvořit tak zpětnou vazbu pro další zaměření výzkumu a monitoringu. Pro báňskou praxi jsou pak nejdůležitější upřesňované, detailizované a aktualizované výpočty, které umožní vypracovávat návrhy na detailní tvarování etází a časového sledu jejich stabilitních postupů.

Kromě detailizace postupů výsypek s ohledem na výsledky monitoringu a postupně upřesňované stabilitní výpočty bude nutné pro zajištění stability výsypky realizovat řadu preventivních či operativních technických opatření, která budou v určitém stadiu postupů výsypky nutná pro zajištění stability dílčího nebo celého svahu. Jsou to základní preventivní technická opatření a doplňková preventivní technická opatření realizovaná vesměs pomocnou báňskou mechanizací.[4]

3.2.1 Monitoring výsypkový těles

Při provádění monitoringu na výsypkách je třeba stanovit veličiny, které budou monitorovány a to na základě sledování **varovných stavů**. Za nejdůležitější veličinu je možno považovat hodnotu pórového tlaku. Zatímco hodnoty efektivní smykové pevnosti nebudou kolísat v příliš širokých mezích, bude to právě pórový tlak, který rozhoduje o výsledném stupni stability výsypky.[6] Pórový tlak se měří pomocí tzv. piezometrů, které se osazují do vrtu a utěsní se zeminou.

Další výhodnou veličinou jsou vodorovné posuny uvnitř výsypkového tělesa a na rozhraní výsypky a podložky. Hodnoty těchto veličin vyplynou z matematického modelování pomocí metody konečných prvků a ověří se s výsledky z přesné inklinometrie. Doplňující veličinou mohou být vodorovné a svislé pohyby povrchu výsypek, které se zaměřují geodeticky.[6]

Bohužel vnitřní výsypka dolu Bílina z provozních důvodů **není** pod drobnohledem monitoringu.

Rozdělení varovných stavů:

- *přípustné změny* - veškeré změny ve čtení monitorovacích zařízení, kdy by kontrolní výpočet prokázal dosažení kritického varovného stavu
- *kritický varovný stav* - výsledky kontrolního sledování signalizují dosažení stupně bezpečnosti, dáno platným báňským předpisem (provozní svah $M_{sf}=1,3$, závěrný svah $M_{sf}=1,5$).
- *mezí varovný stav* - nástup závěrečné fáze porušení, hrozící vývojem deformací s rychlostí znemožňující další provoz, tedy stav, kdy skutečný stupeň stability klesne pod 1,0.

3.3 Zkušenosti ze zahraničí

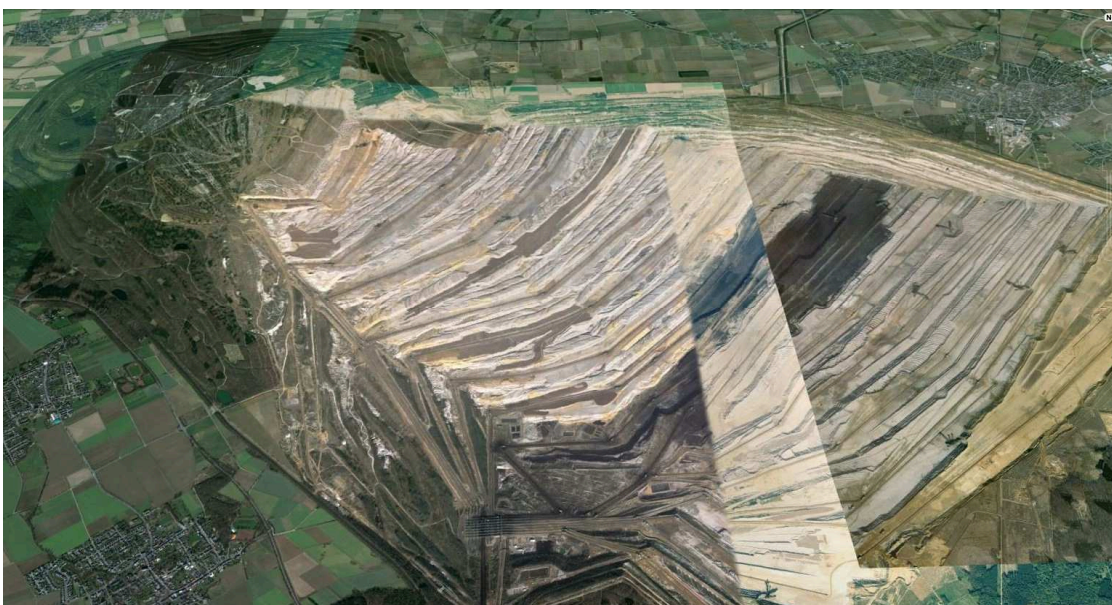
Politická izolovanost Československa v období maximálního rozvoje povrchové těžby hnědého uhlí poznamenala jednostrannost předávaných poznatků a zkušeností. Na vysoké úrovni byla sice spolupráce v rámci různých komisí RVHP a existovaly kontakty z rezortních organizací s NDR, Polskem, Bulharskem a Jugoslávií. Přitom bylo známo, že lokality obou podkrušnohorských pánví se oproti výše uvedeným zemím odlišují svou geologickou stavbou a hlavně mocným jílovitým a jílovito-písčitém nadložím.[10]

V dnešní době jsou v zahraničí s našimi podmínkami souměřitelné pouze některé lokality v Rusku a Číně, ty jsou ale příliš vzdálené a možnost čerpání informací je z důvodů velké izolovanosti minimální. Hnědouhelné doly, které se podobají našim revírům, se nacházejí i na území Evropy. Nejbližší jsou to doly Gartzweiler I, II, Hambach a Inden v německém porýnském revíru. Podobnost s těmito revíry je ale pouze ve způsobu těžby uhlí a ukládání výsypkových materiálů. Ovšem materiálové složení výsypkových těles je velice odlišné a to hlavně z důvodu, že nadloží uhelných slojí je tvořeno převážně písky a šterky.

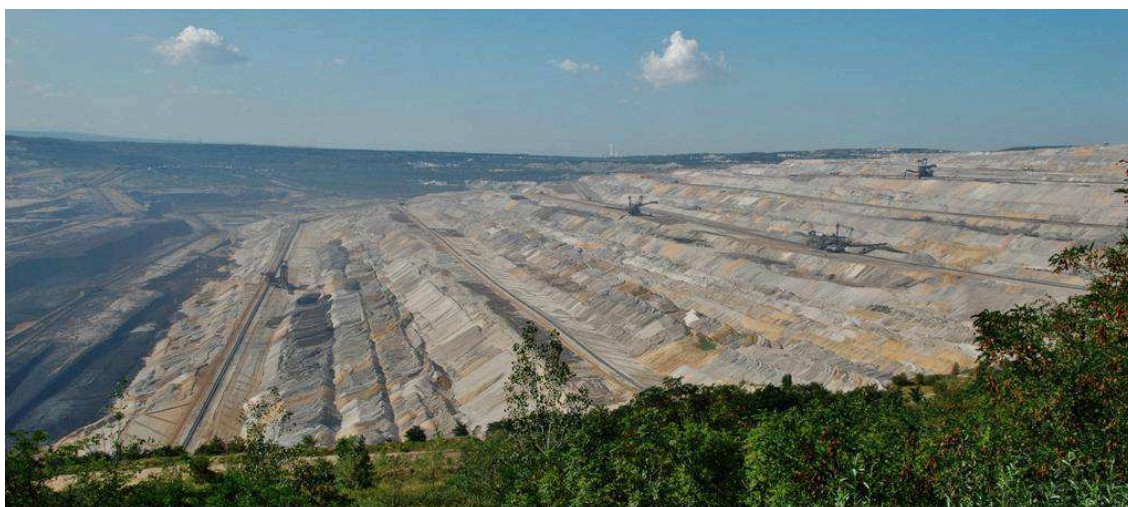


Obr. 15: Vnitřní výsypka dolu Hambach. (geolocation.ws)

Lom Hambach ukládá odtěžené skrývkové materiály na svou vnitřní výsypku. Před vlastním zakládáním do vyuhlených prostorů, byly nejprve hmoty ukládány do vnější výsypky Sophienhöhe lomu Hambach v Porýnském revíru, která je dnes plně zrekultivovaná a slouží pro rekreační účely. Jedná se o výrazné geomorfologické, geomechanicky a báňsky ukončené těleso o kubatuře přes 1,1 miliardy m³ a výškou přes 220 m. Rozvíjející se vnitřní výsypka lomu Hambach je plánována a projektována dokonce na výšku 390 metrů.



Obr. 16: Lom Hambach – zleva nahoře vnější výsypka Sophienhöhe, vnitřní výsypka Hambach, těžba hnědého uhlí a skrývkové řezy (Google Earth)



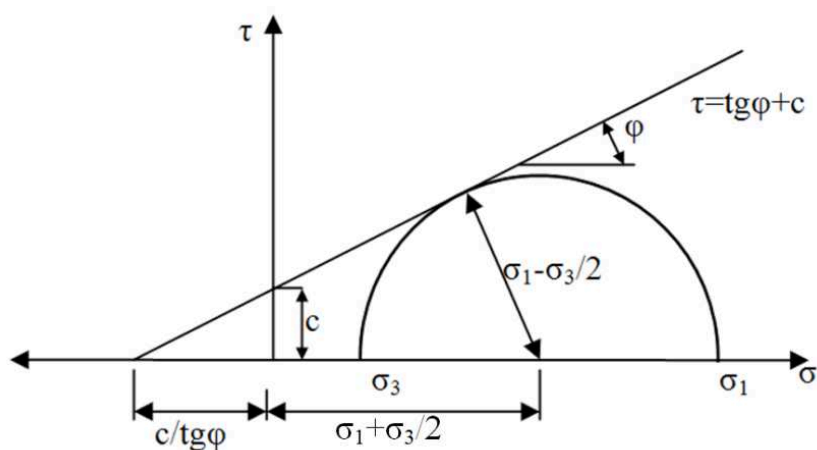
Obr. 17: Vnitřní výsypka dolu Hambach (geolocation.ws)

3.4 Parametry použitelné k modelování

K řešení úlohy pro potřeby diplomové práce, byl pro rozhraní chování zeminy zvolen základní **Mohr-Coulombův konstitutivní model [MC]**, avšak program Plaxis 3D zahrnuje také rozhraní typu Hardening soil model [HS]. Hardening soil model with small-strain stiffness [HSSmall], Jointed Rock [JR] nebo model pro konsolidované zeminy s měkkou konzistencí tzv. Cam-Clay [MCC] model. [3]

3.4.1 Mohr-Coulombův model

Tento model je jedním z nejpoužívanějších materiálových modelů pro řešení geotechnických problémů. Tento lineární pružnoplastický model, ve kterém se zeminy chovají elasticky až do momentu, kdy je překročena Mohr-Coulombova podmínka plasticity. Porušení tedy nastane, dosáhne-li smykové napětí hodnoty smykové pevnosti.[10]



Obr. 18: Mohr-Coulombův materiálový model [10]

τ – tangenciální napětí na smykové ploše (vnitřní odpor zeminy)

σ – normálové napětí působící kolmo na smykovou plochu porušení

c – soudržnost zemin

φ – úhel vnitřního tření

Vstupními parametry pro tento model tedy jsou:

E – modul pružnosti zeminy [MPa]

ν – Poissonovo číslo [-]

c – soudržnost [kPa]

φ – úhel vnitřního tření[°]

ψ – úhel dilatance [°]

Laboratorní experimenty nicméně ukazují, že hodnoty těchto parametrů nejsou konstantní, ale závisí i na dalších stavových proměnných, jako je napětí, pórovitost a další. Takovéto závislosti mohou být vystiženy pouze pomocí pokročilejších konstitučních modelů.

3.4.2 Modifikovaný Cam Clay model

Tento model byl původně navržen pro popis plastického přetváření jílovitých zemin, nacházejících se ve stavu triaxiálové napjatosti. Modifikovaný Cam clay model (CC) (Roscoe and Burland, 1968) znamená významný kvalitativní posun vůči MC modelu, vzhledem k tomu, že pórovitost (nebo stupeň překonsolidace) je uvažována jako další stavová proměnná. Model umožňuje predikovat kritické stavy a změnu vrcholového úhlu vnitřního tření pro různě hutnou zeminu.[9]

Model CC vyžaduje pět materiálových parametrů. Tři z nich (N , λ a κ) je možno kalibrovat na základě standardní zkoušky isotropního přitížení a odlehčení, další dva (G a M) na základě smykové zkoušky v triaxiálním přístroji. Pro kalibraci modelu tedy dostačují dva vhodně zvolené standardní laboratorní experimenty (větší počet experimentů samozřejmě umožňuje přesnější kalibraci parametrů).[9]

Jeho nejmarkantnějším nedostatkem je fakt, že neumožňuje modelovat pozvolný pokles tuhosti s přetvořením (nonlinearitu) pro překonsolidovanou zeminu.

3.4.3 Parametry použité k modelování

Pro výpočet byl zvolen **Mohr-Coulombův pružnoplastický model**. Hodnoty pro tento model byly stanoveny na základě empirických výpočtů, předchozích zkušeností a konzultací s odborníkem z oddělení Geotechniky Severočeských dolů a.s.

Geomechanické vlastnosti sypaniny se v závislosti na hloubce ve výsypce mění viz. **kapitola 3.1.4**. Při vytváření geotechnického modelu bylo potřeba na tuto skutečnost brát zřetel. Z těchto důvodů byla vytvořena tabulka efektivních materiálových charakteristik rozdělených na 5 hloubkových zón. Toto materiálové rozdělení materiálů bylo zavedeno z důvodů absence výpočtu konsolidace v programu Plaxis 3D.

	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	φ [°]	c [kN/m ²]	E' [MPa]	ν
0-30m	16,5	17,5	20	12	8	0,40
30-60m	18,0	19,0	18	14	10	0,40
60-90m	18,5	19,5	16	16	12	0,40
>90m	19,0	20,0	12	18	14	0,40
podložka	20,5	21,5	35	60	90	0,40

Tab. 1: Materiálové charakteristiky

Z tabulky je jasně patrné, že s postupem do hloubky výsypkového tělesa hodnoty úhlu vnitřního tření klesají a zároveň se zvyšují hodnoty soudržnosti a pevnosti výsypkového materiálu.

4 TVORBA 3D MODELU

Pro tvorbu geotechnického modelu byl použit programový systém Plaxis 3D, který byl speciálně vyvinut pro deformační a stabilitní analýzu geotechnických úloh a je založen na numerické metodě konečných prvků. Jedná se o kompletní výpočetní systém, který umožňuje simulaci nelineárního chování zemin a dává možnost modelování jak statických, tak hydrostatických, dynamických i hydrodynamických účinků v prostředí a také vzájemnou interakci mezi konstrukcí a definovaným prostředím.

Posloupnost matematického modelování:

- 1 – Vytvoření geometrie – Plaxis 3D Input
- 2 – Definování vstupních parametrů zemin – Plaxis 3D Input
- 3 – Vygenerování sítě konečných prvků – Plaxis 3D Input
- 4 – Přiřazení vlastností jednotlivým částem modelu – Plaxis 3D Input
- 5 – Definování/úprava počátečních podmínek – Plaxis 3D Calculation
- 6 – Vytvoření fází výstavby – Plaxis 3D Calculation
- 7 – Výpočet – Plaxis 3D Calculation
- 8 – Analýza a export výsledků – Plaxis 3D Output

Podkladem pro tvorbu MKP modelu byla dokumentace průzkumných prací, výsledky laboratorních zkoušek, situace území, geometrické digitální povrchy těles výsypek a výsledky monitoringu výsypkových těles.

4.1 Informace o modelovaném území

Modelované území se nachází na dole Bílina v severních Čechách, který je jednou z těžebních lokalit Severočeských dolů a.s. Zde se nachází vnitřní výsypka, která má ambice stát se jednou z kubaturně největších a zároveň nejvyšších výsypek uhelných lomů na světě. Jelikož se od roku 2010 jedná o jedinou výsypku dolu Bílina, je potřeba zavádět metody a postupy, které mohou posloužit k efektivnějšímu a bezpečnějšímu plánování ukládání materiálů. Jednou z těchto metod je i matematicko-numerické modelování geotechnickým softwarem PLAXIS 3D, kterým se zabývá i tato diplomová práce

Zájmová oblast byla vymezena obvodovým polygonem. Tento polygon zájmové oblasti se vytyčil pomocí souřadnic x a y. V případě tvorby modelu pro vnitřní výsypku byla vytyčena oblast 500 x 1000 metrů a její obvodový polygon byl zadán následovně:

č. bodu	X	Y	Z
1	983500.0000	784000.0000	0.000
2	983500.0000	785000.0000	0.000
3	983000.0000	785000.0000	0.000
4	983000.0000	784000.0000	0.000

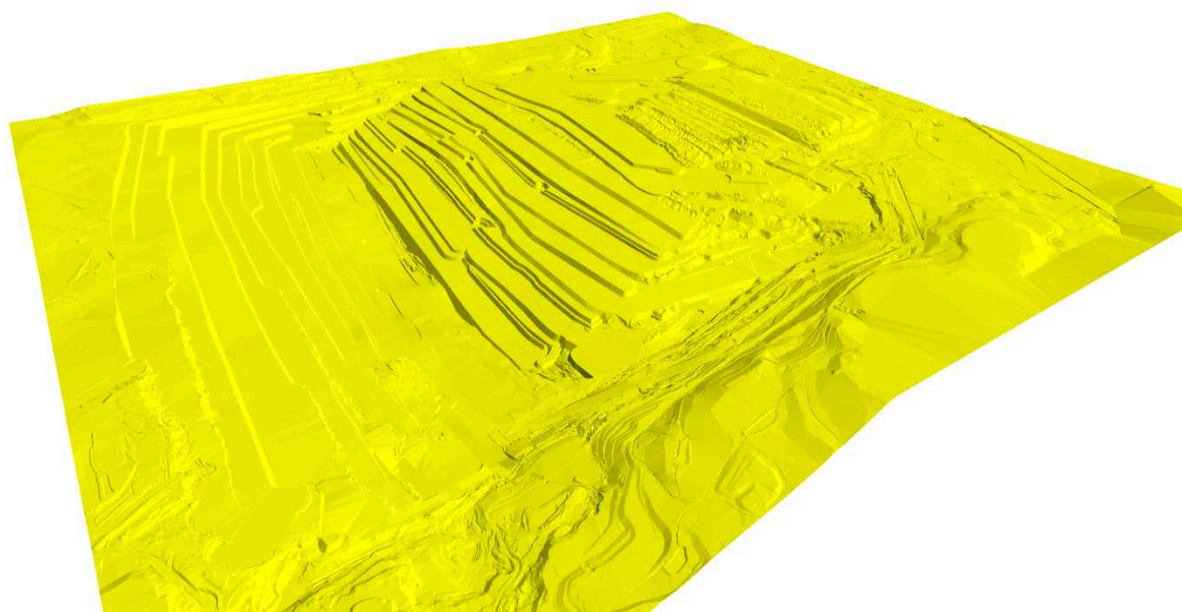


Obr. 19: Vymezená zájmová oblast (Severočeské dolů a.s.)

4.2 Tvorba povrchů

Jednotlivé povrchy byly vytvořeny v programu Báňský model od Firmy KVASoftware, který nabízí funkci modelování terénů a vytvoření aktuálního stavu povrchových lomů. Tyto data se především používají k projekčním a báňským účelům. Tedy i k vytváření geometrických podkladů pro tvorbu velkoobjemového modelu v programu Plaxis 3D.

Vytváření povrchů patří mezi jednu z **nejdůležitějších** operací při tvorbě geotechnického modelu. Z tohoto důvodu je potřeba zajistit kvalitní a přesné měřičské podklady. U nás i ve světě se využívá velkoplošné mapování pomocí metody letecké stereofotogrammetrie, která je v současné době plně digitální. Snímkování se realizují 10 – 12x ročně. Z těchto snímků se vyhodnocuje vše potřebné pro krátkodobé či dlouhodobé projektování. Tyto snímky se převádějí do Báňského modelu, kde se následně připravují jednotlivá aktuální data povrchů výsypek.

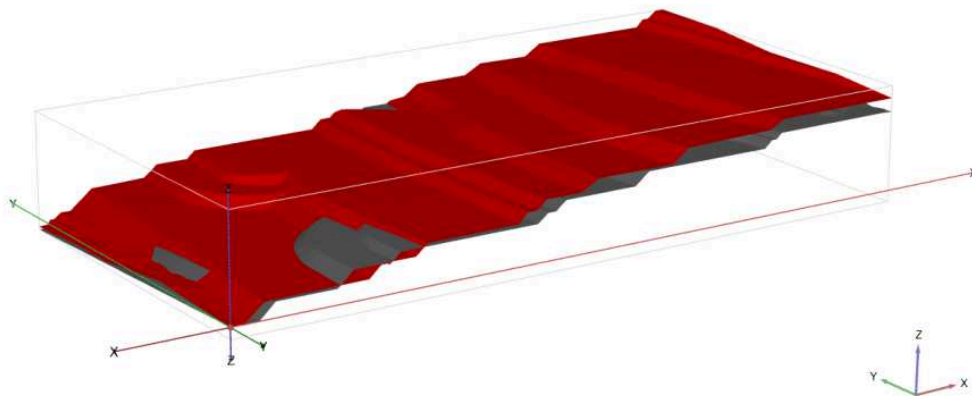


Obr. 20: Fotogrammetrický snímek celého těžebního prostoru včetně vnitřní výsypky dolu Bílina (Severočeské doly a.s.)

4.2.1 Postup tvorby povrchů

Pro modelování vnitřní výsypky byly použity výřezy povrchů a vyuhlené podložky, které jsme vyexportovali ze softwarového programu Báňský model. Přesněji podložku a povrchy z let 2004, 2006, 2010 a 2014, které jsou potřeba pro namodelování postupného vývoje výstavby vnitřní výsypky.

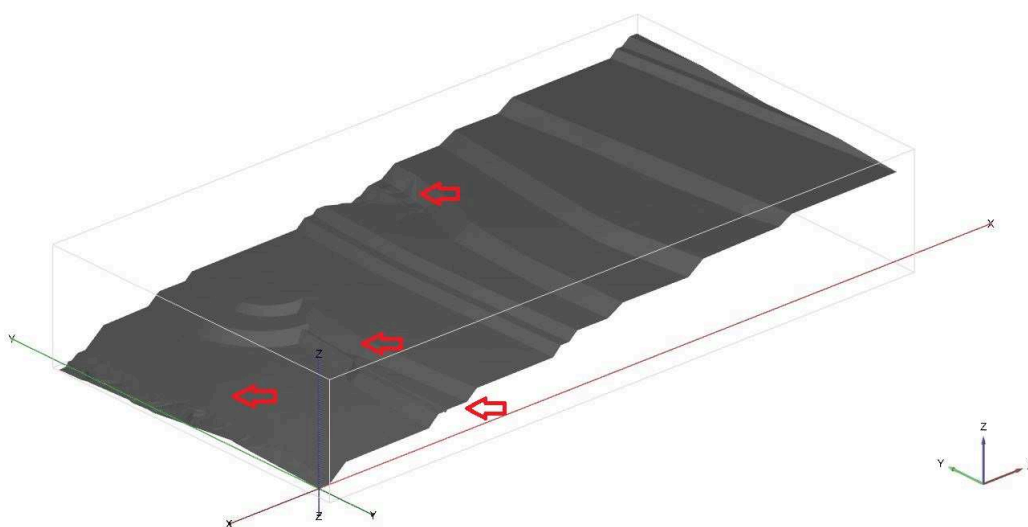
Jednotlivé roky jsou zvoleny tak, aby se povrchy navzájem nepřekrývaly, pokud by se tak stalo, nešel by vytvořit funkční model. Překrývání povrchů je znázorněno na obr. 21. Původně bylo zamýšleno, aby tyto překryvné plochy byly vyříznuty v programu AutoCAD civil 3D a následně spojeny podle potřeby v programu Plaxis 3D. Bohužel postup této operace byl značně zdlouhavý a navíc výsledné objemy vznikající mezi jednotlivými plochami povrchů jsou příliš malé, což vyvolávalo další problémy při tvorbě objemů a generování sítě konečných prvků.



Obr. 21: Překrývání povrchů (Plaxis 3D)

Přesto je program AutoCAD civil 3D v současné chvíli nezbytným nástrojem pro vytvoření funkční geometrie, která je vhodná pro import do programu Plaxis 3D. A to z toho důvodu, že Báňský model exportuje 3D povrch do DXF. formátu pouze pomocí „3D polylines“ (3D křivky), avšak program Plaxis 3D akceptuje pouze rozdělení triangulovaného povrchu na „3D face“ (3D plochy). Tato úprava je zatím možná pouze pomocí softwarového vybavení programu AutoCAD civil 3D. Do budoucna se nicméně plánuje zavedení exportu povrchů ve „3D face“ přímo z programu Báňský model společnosti KVA Software.

Bohužel takto připravené povrchy nebyly přímo vhodné pro vytvoření geotechnického modelu v programu Plaxis 3D. A to z toho důvodu, že program Plaxis v současnosti není schopen řešit povrchy, které jsou vytvořeny z reálného zaměření. Množství zlomů, depresí a jiných terénních nerovností působí při modelování mnoho značných problémů. Tuto složitou morfologii povrchů (Obr. 22), bylo potřeba postupně generalizovat. Pokud by generalizování neproběhlo, program Plaxis 3D by nebyl schopen vytvořit síť konečných prvků a tím pádem ani výpočet.

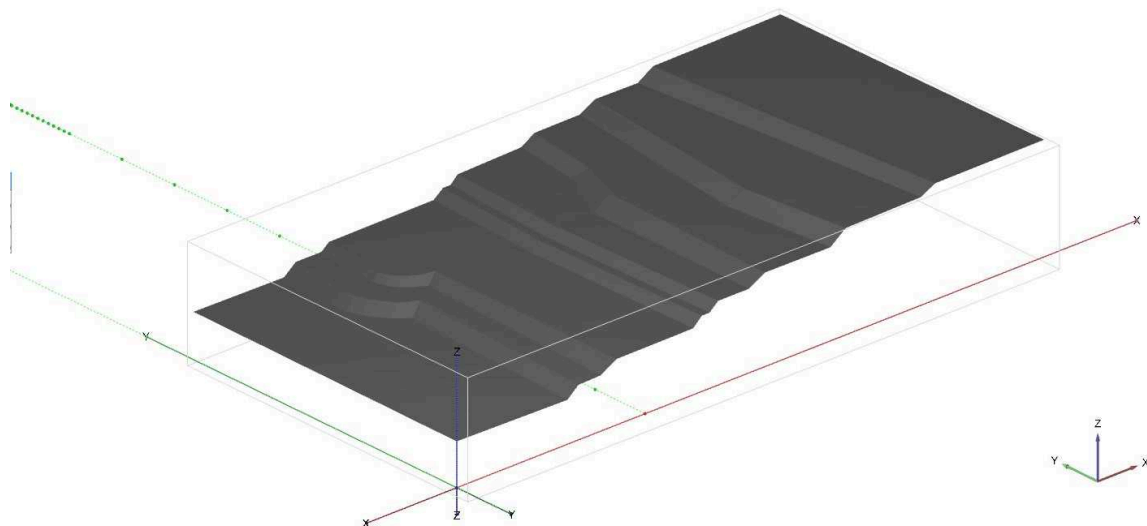


Obr. 22: Neupravený povrch 2014 s vyznačenými místy složité morfologie povrchu (Plaxis 3D)

4.2.2 Úprava povrchů

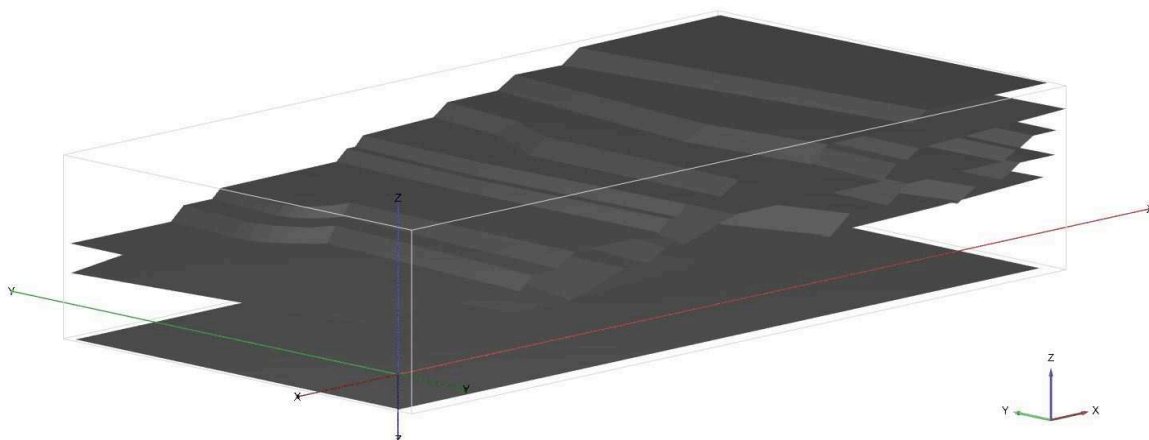
Pro generalizování jednotlivých povrchů byla nejdříve zvolena metoda upravování pomocí systémových nástrojů programů AutoCAD civil 3D a Báňský model. Bohužel tento postup byl pro generalizování jednotlivých povrchů poměrně časově náročný a z tohoto důvodu i kontraproduktivní

Proto bylo zapotřebí vytvořit novou metodu generalizování jednotlivých povrchů. Ta se zakládá především na úpravě povrchů pomocí systémových nástrojů přímo v programu Plaxis 3D. Přesněji nástrojů pro vytváření povrchů „create surface“ a přichytávání „snap“ k jednotlivým bodům na povrchu.



Obr. 23: Upravený povrch 2014 (Plaxis 3D)

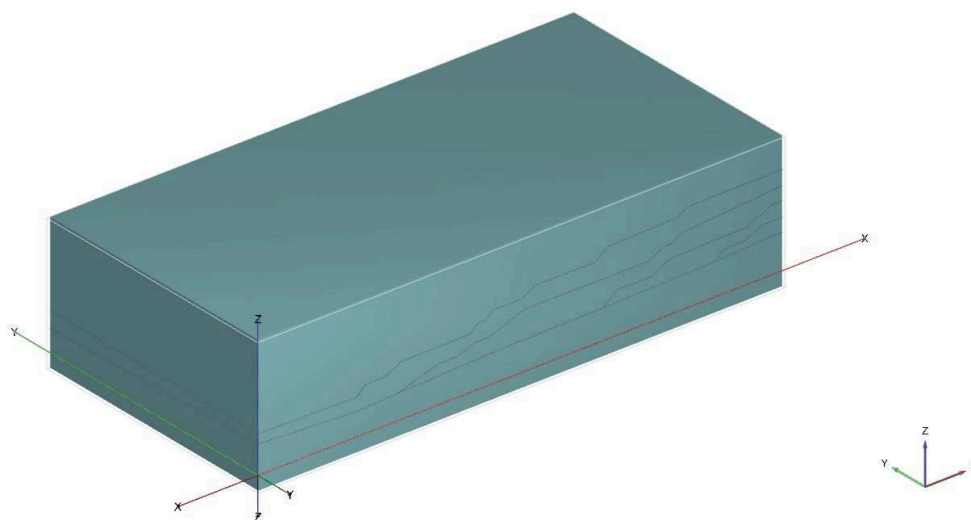
Tvorba ploch pomocí této metody primárně spočívá ve vytváření úplně nových povrchů. A to tak, že se při tvorbě nového povrchu přichytáváme k bodům, které náleží původní složité geometrii reálných povrchů a to hlavně těch, které výrazně ovlivňují reálný tvar výsypky a vytváří se tak nové plochy, které relativně zachovávají původní geometrický tvar. Takto se zgeneralizovaly všechny povrchy, které odpovídají fázím výstavby výsypky z jednotlivých let, jak je patrné na Obr. 24. Tyto vytvořené povrchy nevykazují žádné složité tvary a z tohoto důvodu jsou **vhodné** k vytvoření funkčního 3D modelu v programu Plaxis 3D.



Obr. 24: Upravené povrchy - podložka, 2004, 2006, 2010, 2014 (Plaxis 3D)

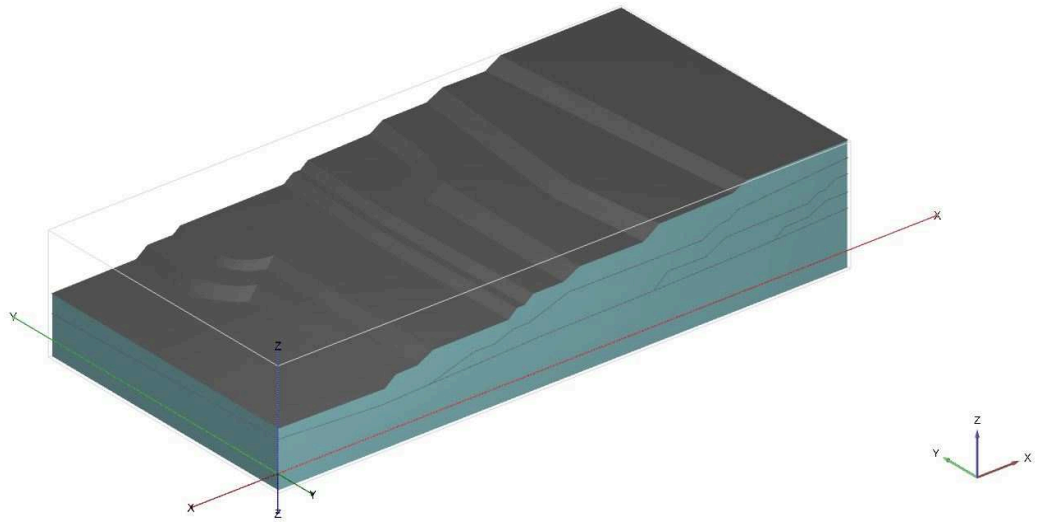
4.3 Tvorba objemů

Vytvoření objemu se provádí pomocí systémových nástrojů programu Plaxis 3D. Po importu jednotlivých DXF povrchů se cca 90m pod podložkou výsypky vytvoří vodorovná plocha o půdorysných rozměrech něco málo menších, než jsou rozměry povrchů. Tato vytvořená plocha se pomocí systémového nástroje „Extrude“ (přinutit) vyzvedne do výšky cca 200m a po této akci se vytvoří objem, kterému je nutno nadefinovat materiálovou charakteristiku (Obr. 25). Tento objem se rozdělí podle jednotlivých ploch (roků). Rozdělení se provádí za pomoci systémového nástroje „intersect“ (protínat). Pro používání tohoto nástroje je potřeba v programu Plaxis nadefinovat, jaké plochy a objemy se mají navzájem protínat a rozdělit.

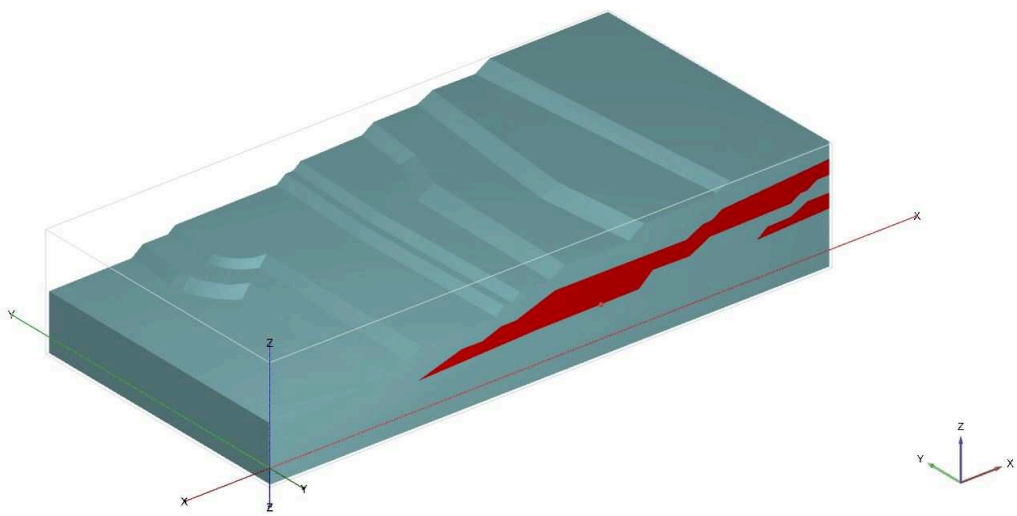


Obr. 25: Vytvoření objemu (Plaxis 3D)

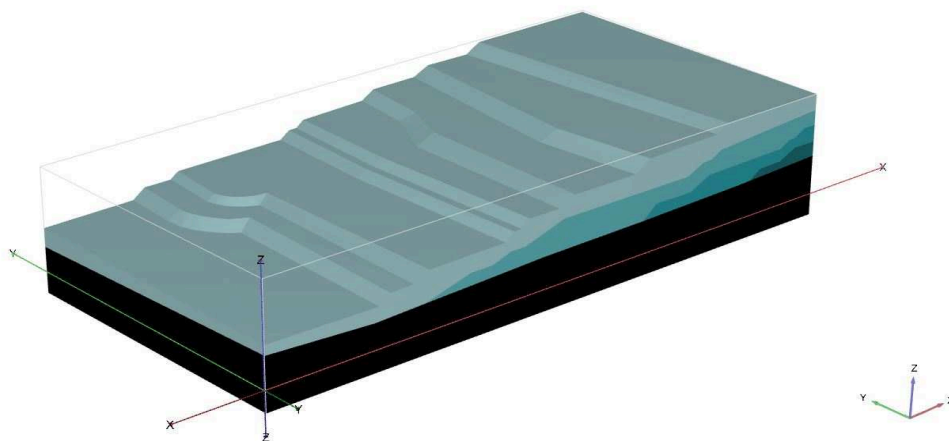
Po vytvoření jednotlivých objemů je nutno odmazat všechny nepotřebné povrchy a objemy (viz. Obr. 26 - 28), jelikož k dalšímu výpočtu již nejsou potřeba, ba naopak mohou způsobovat problémy při vytváření sítě konečných prvků. Takto připravenému a rozdělenému modelu můžeme přiřadit jednotlivé materiálové charakteristiky podle **Tab. 2 v kapitole 3.4**.



Obr. 26: Model po rozdělení jednotlivými povrchy (Plaxis 3D)



Obr. 27 : Připravený model pro nastavení vstupních charakteristik (Plaxis 3D)

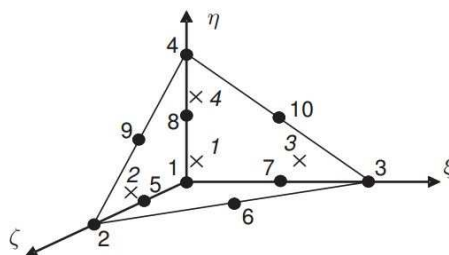


Obr. 28: Nadefinovaný model připravený pro výpočet (Plaxis 3D)

Konečné půdorysné rozměry takto vytvořeného modelu jsou 500 x 1000 metrů. Mocnost podložky je 90m a průměrná výška etáže je 30m. Z toho vyplývá, že výška modelu sypaniny se pohybuje v hodnotách okolo 120m od báze výsypky čili podložky a celková výška modelu je 210m. Objem skrývkových materiálů uložených na modelovanou výsypku činí 32 400 000m³, objem podloží je rovný 42 670 000m³.

4.4 Tvorba sítě MKP

Pro výpočet metodou konečných prvků je potřeba kontinuum rozdělit na jednotlivé elementy, které jsou mezi sebou navzájem propojeny uzly. Toto propojení se nazývá sítí konečných prvků. Program Plaxis 3D umožňuje plně automatické generování sítí, které se vytváří v záložce Mesh. Element je propojen v síti tzv. 10 nodes (uzly) (obr.29). V zájmových oblastech je možné síť zjemnit pro získání detailnějších výstupů, ovšem je potřeba mít na paměti, že jemnější síť se prodlužuje doba výpočtu a zvyšuje se pravděpodobnost výskytu chyb.[10]

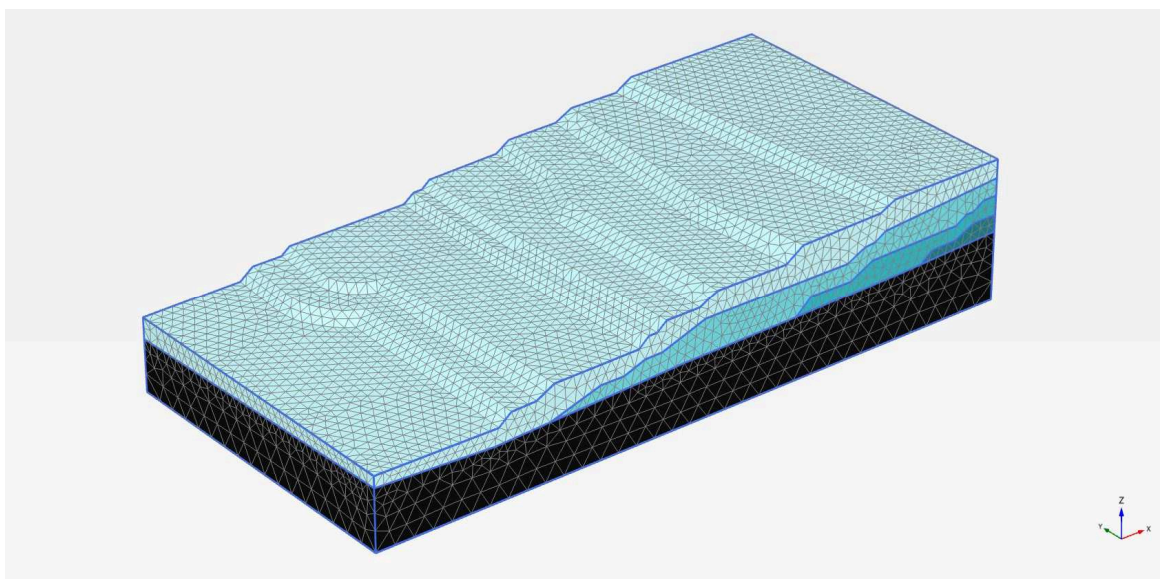


Obr. 29: 10-nodes (uzlový) prvek sítě MKP

Program Plaxis 3D umožňuje generování v 5 základních kvalitativních režimech:

Very coarse	Coarse	Medium	Fine	Very fine
(velmi hrubý)	(hrubý)	(střední)	(jemný)	(velmi jemný)

Kvalita typu „Very fine“ nebyla k vytvoření sítě konečných prvků modelované výsyvky vhodná a bylo ji potřeba manuálně 2x zjemnit. Takto vytvořená síť má přes 130 000 elementů. Tato skutečnost má samozřejmě vliv na kvalitu a délku výpočtu (Obr. 30).



Obr. 30: Vygenerovaná síť konečných prvků (Plaxis 3D)

4.5 Nastavení výpočtu

Programová část Plaxis 3D Calculation je určena především pro vytvoření a editaci fází postupné výstavby výsyvky. Skládá se z Initial phase (z angl. původní fáze), fáze kterou si program sám vytvoří. Nelze v ní editovat a z jejího výstupu je možné odečíst hodnoty napětí v jakémkoliv bodě nadefinovaného modelu. Dále je možné provést specifické nastavení výpočtu pro daný geotechnický problém, ať se jedná o plastické přetváření, výpočet stupňů stability nebo konsolidace daného materiálu. Pro výpočet velkoobjemového tělesa výsyvky, byly použity typy kalkulace Initial phase, Plastic (plastický) a Safety (bezpečnost).

4.5.1 Plastic – Plastický výpočet

Používá se pro elasticko-plastickou deformační analýzu, při které se neuvažuje se změnou pórových tlaků v čase a tím pádem nemůže docházet k výpočtu konsolidace. Změna pórových tlaku v čase tedy není v tomto modelu brána v úvahu.[3] Proces konsolidace je v modelu nahrazen napěťo-deformačním výpočtem plastic, kdy se v každé fázi výpočtu mění materiálové charakteristiky jednotlivých etází. Výpočet typu Plastic spolu s odvozeným typem chování (Drained) lze použít pro odvozenou analýzu, ze které vypočteme např. konečné sednutí výsypky či deformace v horizontálním a vertikálním směru v dlouhodobém časovém horizontu.[3]

Výpočet typu Plastic byl počítán pro podložku a roky 2004, 2006, 2010 a 2014.

4.5.2 Safety – Výpočet bezpečnosti

Tento typ výpočtu je určený k výpočtu stupňů stability svahů výsypky. Výpočet jednotlivých stupňů bezpečnosti se váže na výpočtové fáze „Plastic“. Pro získání stupňů stability se užívá tzv. „Phi/c reduction“. V průběhu výpočtu jsou postupně redukovány vstupní parametry pevnosti (úhel vnitřního tření, soudržnost) tak, aby se našla kritická čára smykové pevnosti, která se blíží dotyku Mohrovy kružnice. Poměr hodnot redukováných parametrů ke vstupním hodnotám parametrů smykové pevnosti vyjadřuje stupeň stability označený jako suma ΣM_{sf} : [3]

$$\Sigma M_{sf} = \frac{\tan \varphi_{input}}{\tan \varphi_{reduced}} = \frac{C_{input}}{C_{reduced}}$$

$\tan \varphi_{input}$ – původní úhel vnitřního tření

$\tan \varphi_{reduced}$ – snížený úhel vnitřního tření

C_{input} – původní soudržnost

$C_{reduced}$ – snížená soudržnost

Redukování pevnostních parametrů je v průběhu výpočtu řízeno postupným snižováním ΣM_{sf} v předem zadaném počtu kroků. Počet těchto kroků je definován pomocí *Incremental multipliers Msl* a její počáteční hodnota je přednastavena na velikost 0,1 [3]

Výpočet typu Safety byl počítán pro roky 2004, 2006, 2010 a 2014

4.5.3 Výpočetní fáze

Pro výpočet bylo nastaveno celkem 8 výpočetních fází. A to z důvodu postupného vývoje stavby vnitřní výsypky od roku 2004 do roku 2014 tedy za období 10 let.

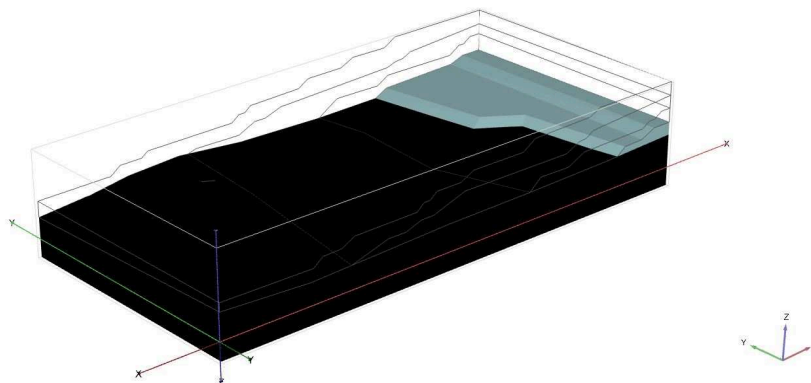
ID	Calculation type	Loading type (D)
Initial phase [InitialPhase]	Gravity loading	Staged construction
Plastic 2004 [Phase_1]	Plastic	Staged construction
Safety 2004 [Phase_2]	Safety	Incremental multipliers
Plastic 2006 [Phase_3]	Plastic	Staged construction
Safety 2006 [Phase_4]	Safety	Incremental multipliers
Plastic 2010 [Phase_5]	Plastic	Staged construction
Safety 2010 [Phase_6]	Safety	Incremental multipliers
Plastic 2014 [Phase_7]	Plastic	Staged construction
Safety 2014 [Phase_8]	Safety	Incremental multiplier

Obr. 31 : Nastavení výpočetních fází (Plaxis 3D)

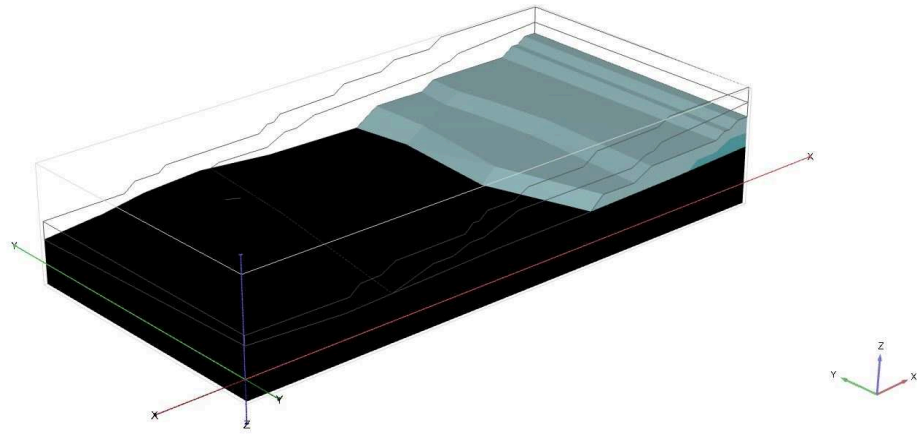
Při definování výpočetních fází bylo nutné mít na paměti, že s postupným narůstáním výšky se vlivem konsolidace mění geomechanické vlastnosti sypaniny. Tato skutečnost byla také zavedena do samotného výpočtu, viz Obr. 32-35. Materiálové vlastnosti a barevné rozlišení jednotlivých fází je uvedeno v Tab. 2.

Název fáze	γ [kN/m ³]	γ_{sat} [kN/m ³]	ϕ [°]	c [kN/m ²]	E' [MPa]	ν
Fáze 1	16,5	17,5	20	12	8	0,40
Fáze 2	18,0	19,0	18	14	10	0,40
Fáze 3	18,5	19,5	16	16	12	0,40
Fáze 4	19,0	20,0	12	18	14	0,40
podložka	20,5	21,5	35	60	90	0,40

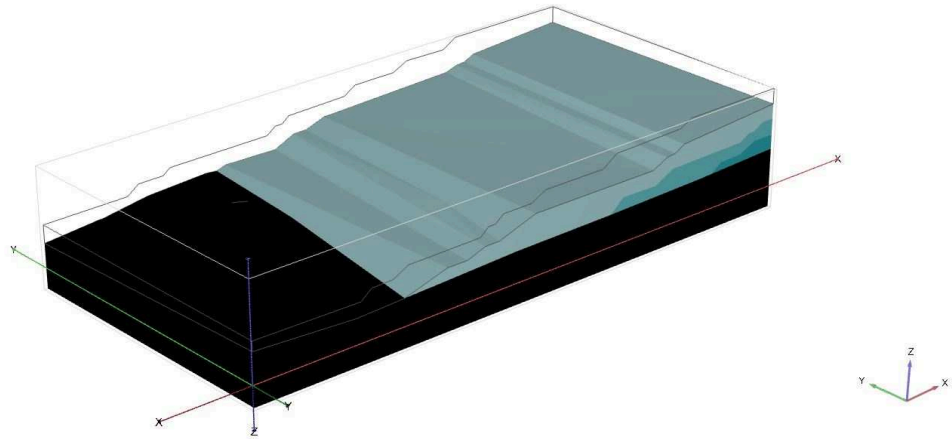
Tab. 2: Rozfázování geomechanických vlastností výsypky



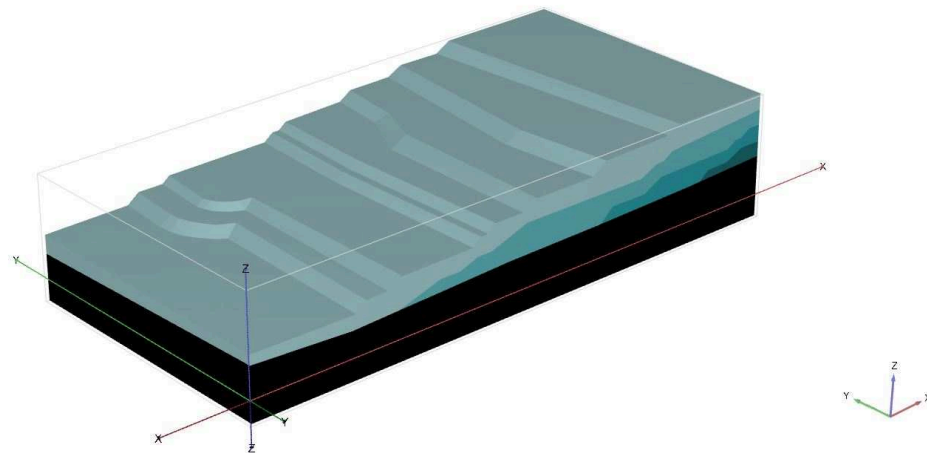
Obr. 32: Výpočetní fáze 2004 (Plaxis 3D)



Obr. 33: Výpočetní fáze 2006 (Plaxis 3D)



Obr. 34: Výpočetní fáze 2010 (Plaxis 3D)



Obr. 35: Výpočetní fáze 2014 (Plaxis 3D)

5 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Vyhodnocení výsledků probíhalo v programu Plaxis 3D output. Postupně byly vyhodnoceny jednotlivé roky výstavby výsypky. Tedy roky 2004, 2006, 2010 a 2014. Vyhodnocovány byly postupně napětí-deformační stavy, čerpání smykové pevnosti či rozbor výskytu plastických bodů a v neposlední řadě výstupy z výpočtů stupňů stability

Jednotlivý popis výsledků je uveden v následujících kapitolách.

5.1 Výstupy napětí-deformačních stavů

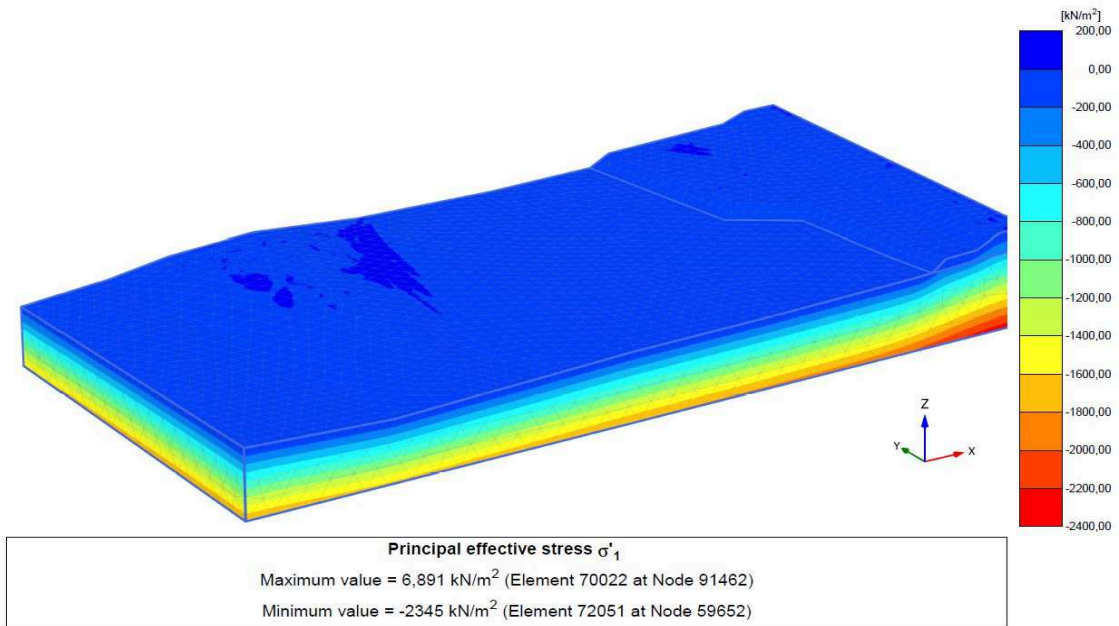
5.1.1 Napětí

Tabulka č 4. představuje efektivní napětí a jeho jednotlivé přírůstky. Přírůstky napětí se každou fází výstavby výsypky navyšují. Největší přírůstek byl za období let od roku 2006 2010 a 2010 – 2014

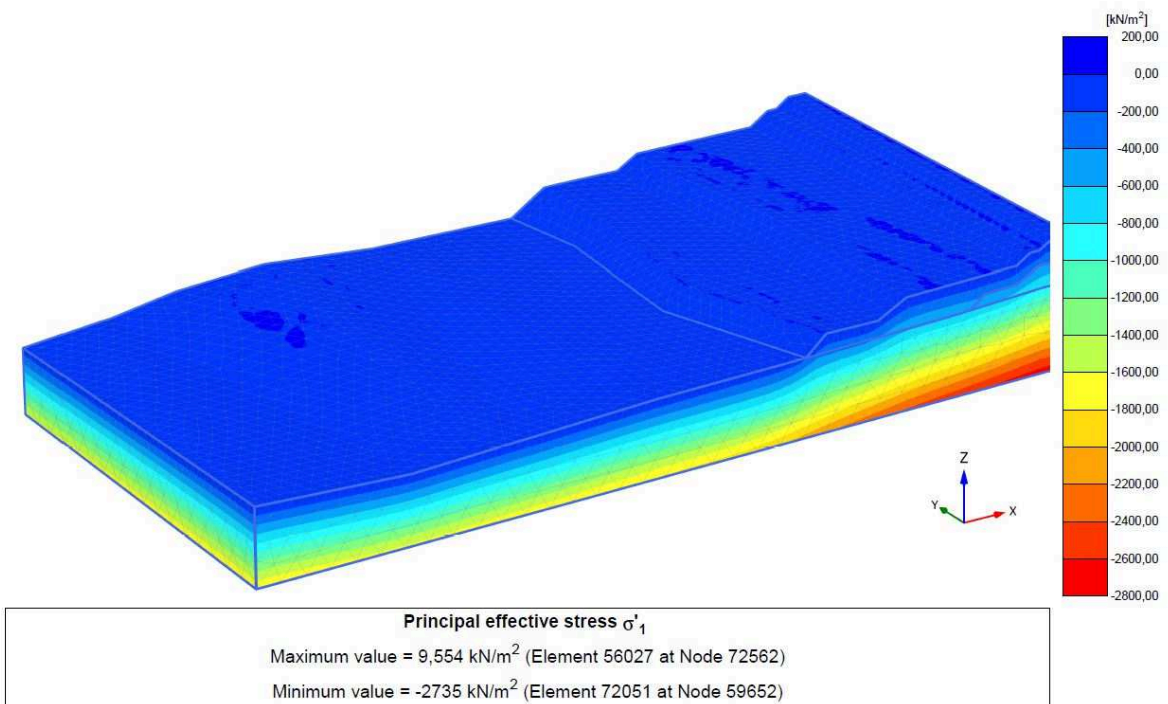
Napětí		[kN/m ²]					napětí na podložce
		Podl.	1.	2.	3.	4.	
Podl.	celkové	2029					0
	přírůstek	0					
2004	celkové		2345				316
	přírůstek		316				
2006	celkové			2735			706
	přírůstek			390			
2010	celkové				3267		1238
	přírůstek				532		
2014	celkové					3845	1816
	přírůstek					578	

Tab. 4: Hodnoty napětí a jednotlivých přírůstků

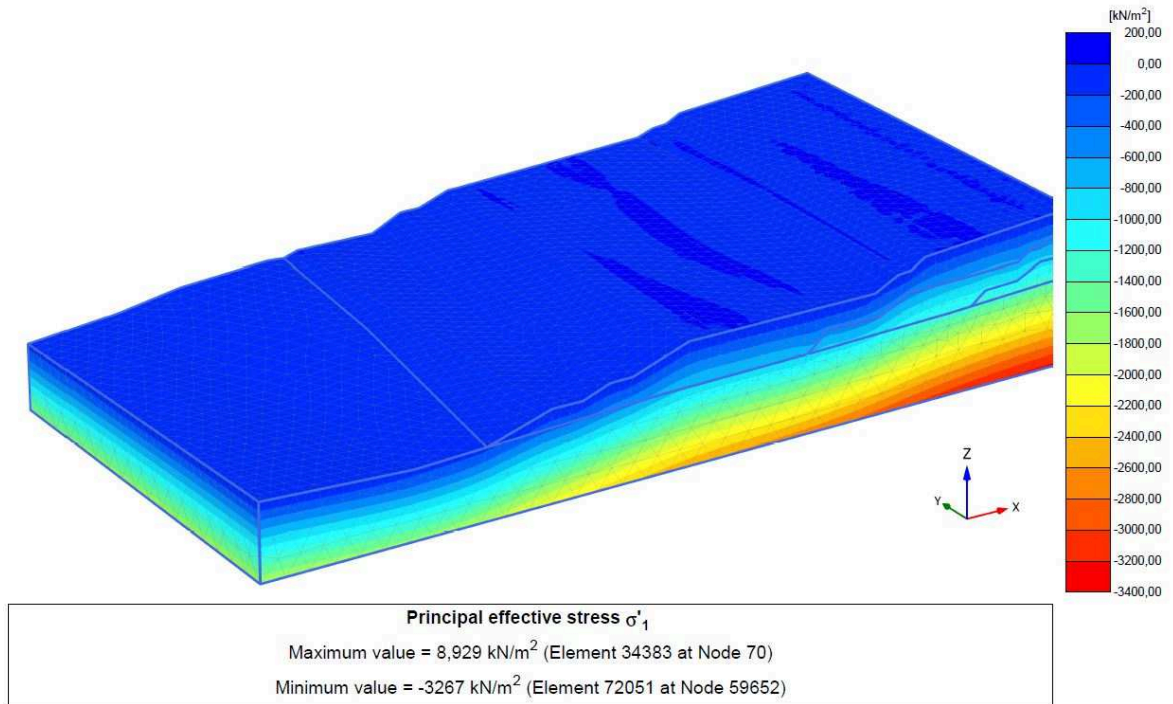
Grafické výstupy napětí z programu Plaxis 3D Output jsou uvedeny v **Příloze 1**.



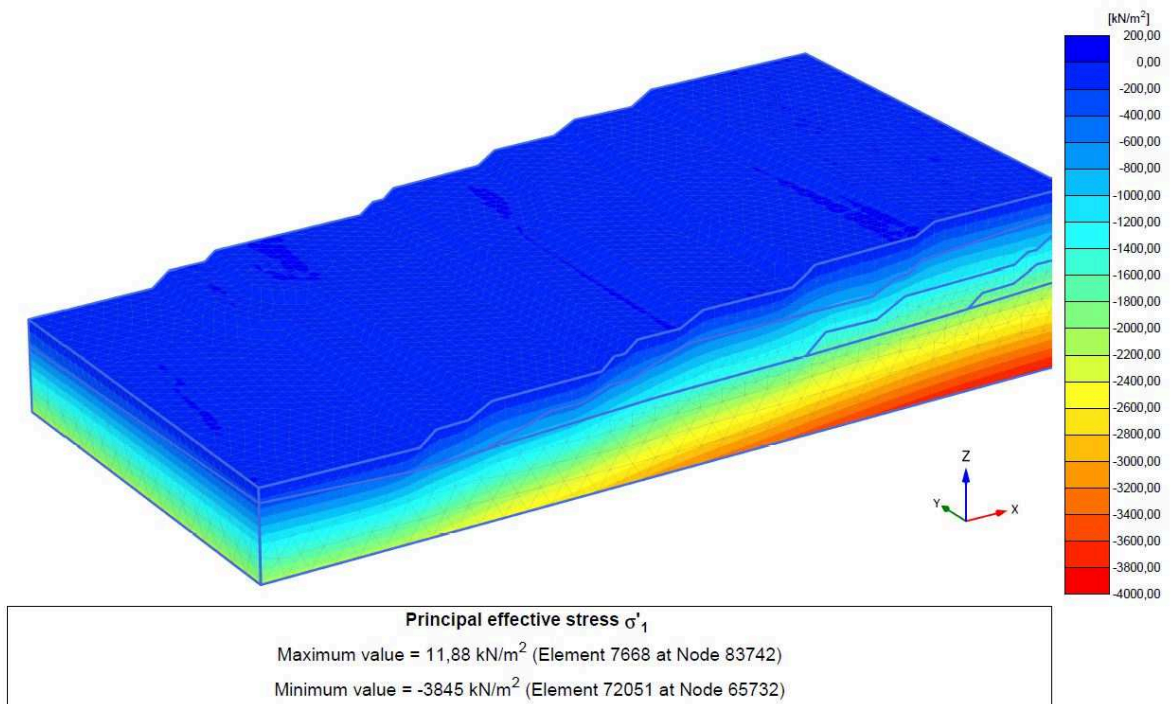
Obr. 36: Hlavní efektivní napětí 2004 (Plaxis 3D)



Obr. 37: Hlavní efektivní napětí 2006 (Plaxis 3D)



Obr. 38: Hlavní efektivní napětí 2010 (Plaxis 3D)



Obr. 39: Hlavní efektivní napětí 2014 (Plaxis 3D)

5.1.2 Celkové posuny

Tabulka 3 ukazuje závislosti hodnot sedání a jeho přírůstku, jak na jednotlivých fázích, tak na jednotlivých vrstvách těchto fází.

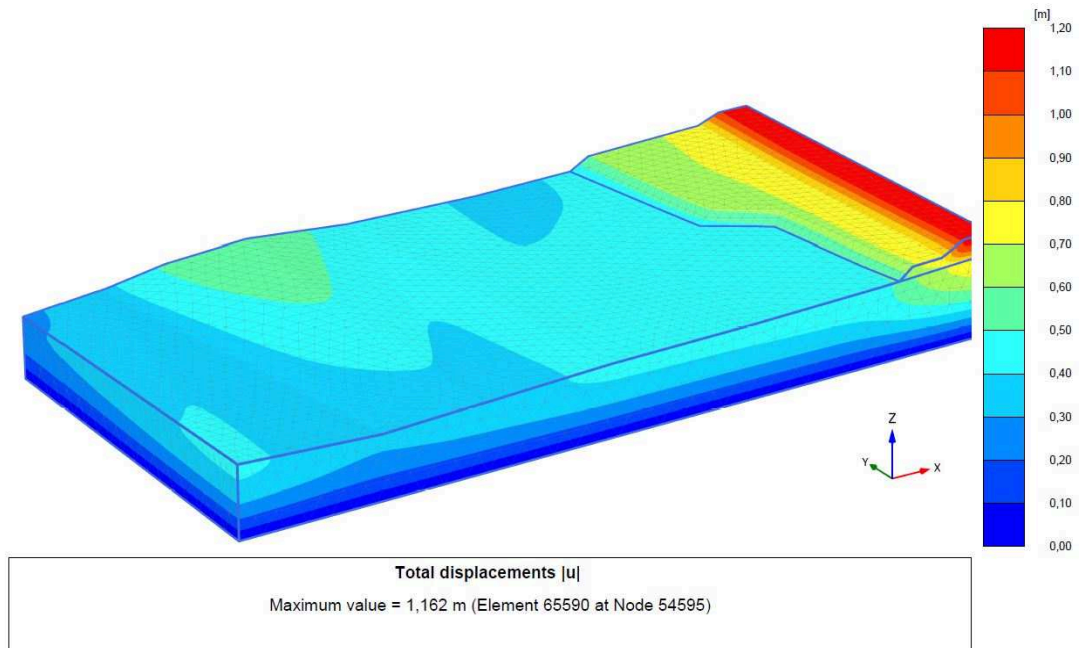
Celkové posuny		[m]				
		Podložka	1. Fáze	2. Fáze	3. Fáze	4. Fáze
Podložka	celkové	0,595				
	přírůstek	0,595				
2004	celkové	0,809	1,162			
	přírůstek	0,214	0,353			
2006	celkové	1,038	2,298	3,097		
	přírůstek	0,229	1,26	0,799		
2010	celkové	1,298	2,935	4,317	4,65	
	přírůstek	0,26	1,637	1,382	0,333	
2014	celkové	1,569	3,695	5,751	6,554	7
	přírůstek	0,271	2,126	2,056	0,803	0,446

Tab. 3: Celkové posuny a jejich jednotlivé přírůstky

Grafické výstupy celkových posunů z programu Plaxis 3D Output jsou uvedeny v **Příloze 1**.

V následujících kapitolách jsou zhodnoceny celkové posuny a přírůstky posunů jednotlivých etází.

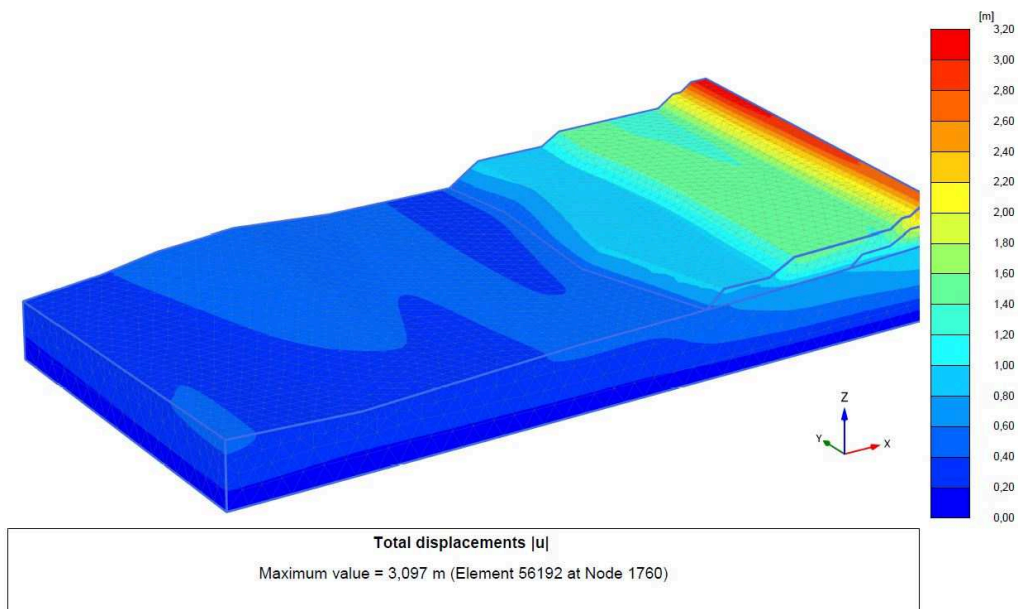
Rok 2004



Obr. 40: Celkové posuny 2004 (Plaxis 3D)

Absolutní posuny dosahují maximální hodnoty 1,162m. Posuny samotné etáže roku 2004 dosahují maximální hodnoty 0,353m.

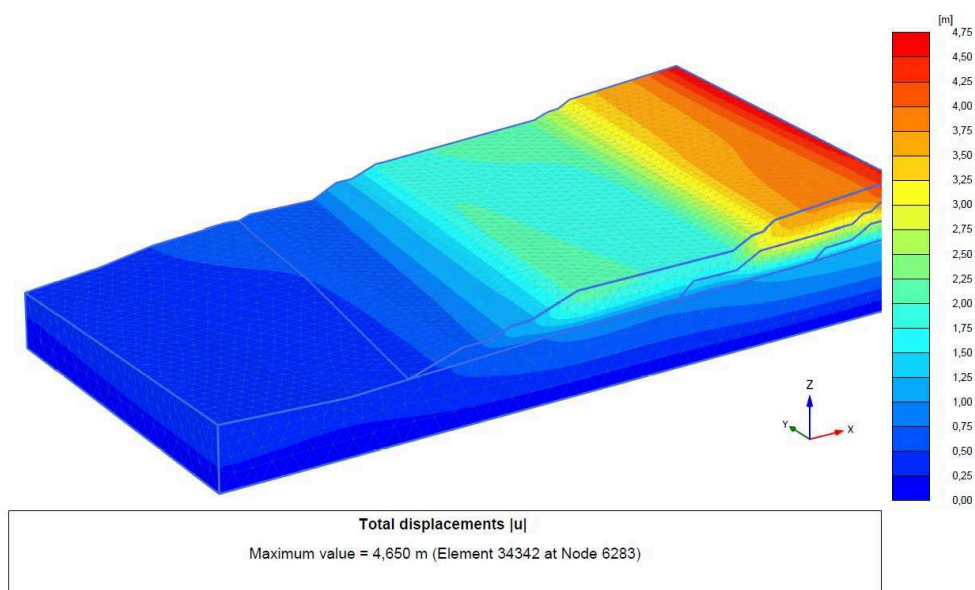
Rok 2006



Obr. 41: Celkové posuny 2006 (Plaxis 3D)

Absolutní posuny dosahují maximální hodnoty 3,097m. Posuny samotné etáže roku 2004 dosahují maximální hodnoty 0,799m.

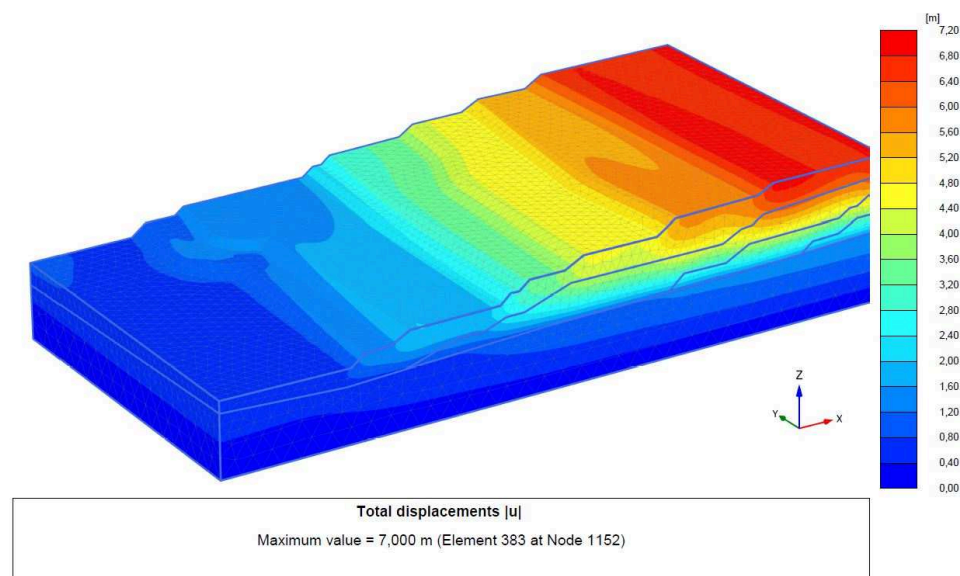
Rok 2010



Obr. 42: Celkové posuny 2010 (Plaxis 3D)

Absolutní posuny dosahují maximální hodnoty 4,650m. Posuny samotné etáže roku 2010 dosahují maximální hodnoty 0,333m.

Rok 2014



Obr. 43: Celkové posuny 2014 (Plaxis 3D)

Absolutní posuny dosahují hodnoty 7,0m. Posuny samotné etáže roku 2014 dosahují maximální hodnoty 0,446m. Zmíněných 7m představuje konečné sednutí celkového modelu a odpovídá sednutí v roce 2014.

Jelikož vnitřní výsypka dolu Bílina není monitorována s ohledem na hodnoty sedání, nelze tuto konečnou hodnotu sedání porovnat s reálnými. Po konzultaci s odborníkem z oddělení geotechniky SD a.s. lze považovat tuto konečnou hodnotu sedání za reálnou a odpovídající modelu.

5.1.3 Horizontální posuny

Další výhodnou veličinou jsou vodorovné posuny uvnitř výsypkového tělesa a na rozhraní výsypky a podložky. Vektory těchto posunů směřují v případě modelované výsypky směrem do pánve.

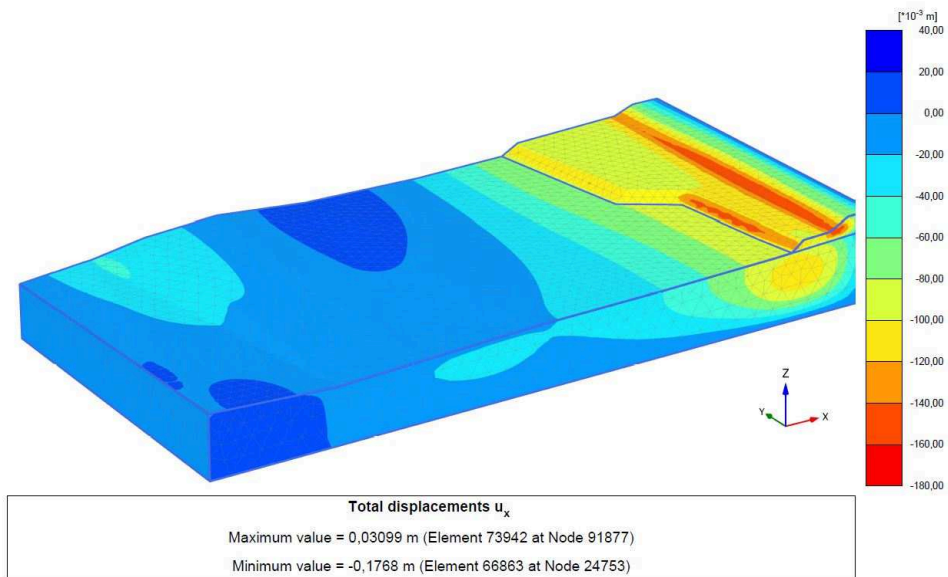
Tabulka 4 ukazuje závislosti hodnot horizontálních posunů a jejich přírůstků, a to jak na jednotlivých fázích a podložce, tak na jednotlivých vrstvách těchto fází.

Horizontální posuny - x		[m]				
		Podložka	1. Fáze	2. Fáze	3. Fáze	4. Fáze
Podložka	celkové	0,066				
	přírůstek	0,066				
2004	celkové	0,12	0,18			
	přírůstek	0,054	0,06			
2006	celkové	0,22	0,49	0,53		
	přírůstek	0,1	0,27	0,04		
2010	celkové	0,32	0,68	1,07	1,1	
	přírůstek	0,1	0,36	0,39	0,03	
2014	celkové	0,47	0,77	1,287	1,553	1,78
	přírůstek	0,15	0,3	0,517	0,266	0,227

Tab. 4: Horizontální posuny a jednotlivé přírůstky

Grafické výstupy horizontálních posunů z programu Plaxis 3D Output jsou uvedeny v **Příloze 1**.

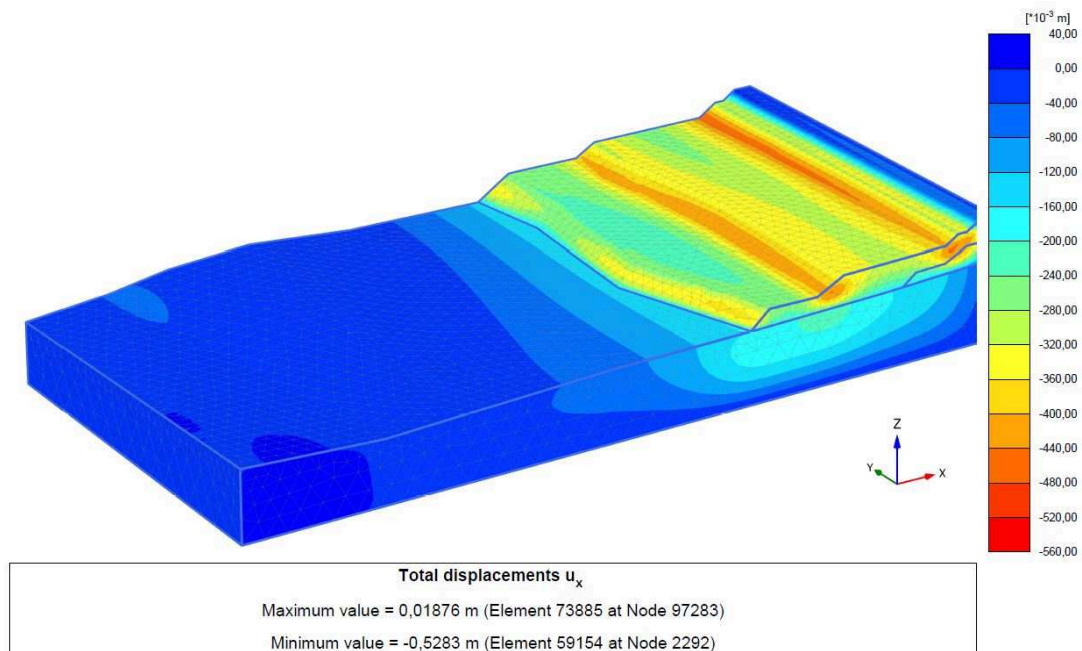
Rok 2004



Obr. 44: Horizontální posuny 2004 (Plaxis 3D)

Absolutní horizontální posuny dosahují maximální hodnoty 0,18m. Posuny samotné etáže roku 2004 dosahují maximální hodnoty 0,06m.

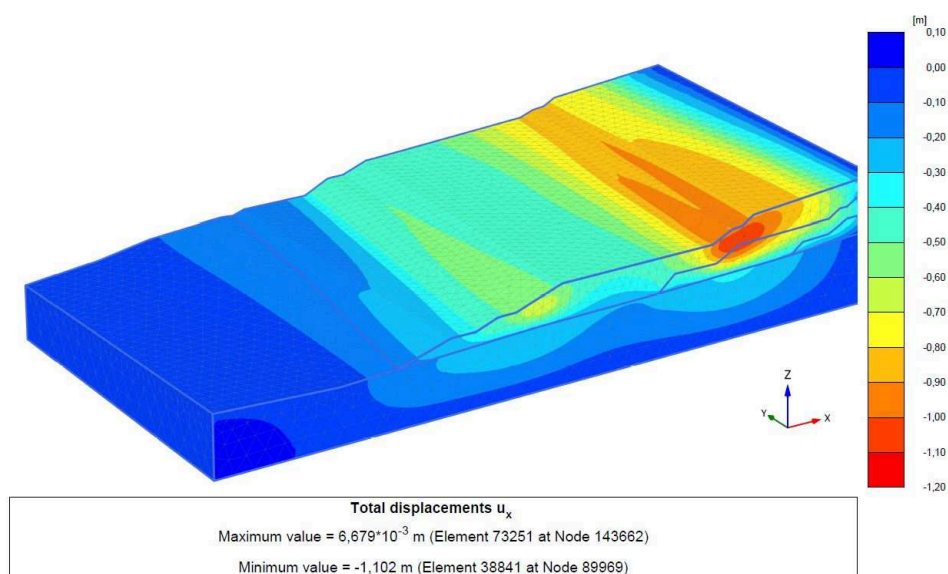
Rok 2006



Obr. 45: Horizontální posuny 2006 (Plaxis 3D)

Absolutní horizontální posuny dosahují maximální hodnoty 0,53m. Posuny samotné etáže roku 2006 dosahují maximální hodnoty 0,04m.

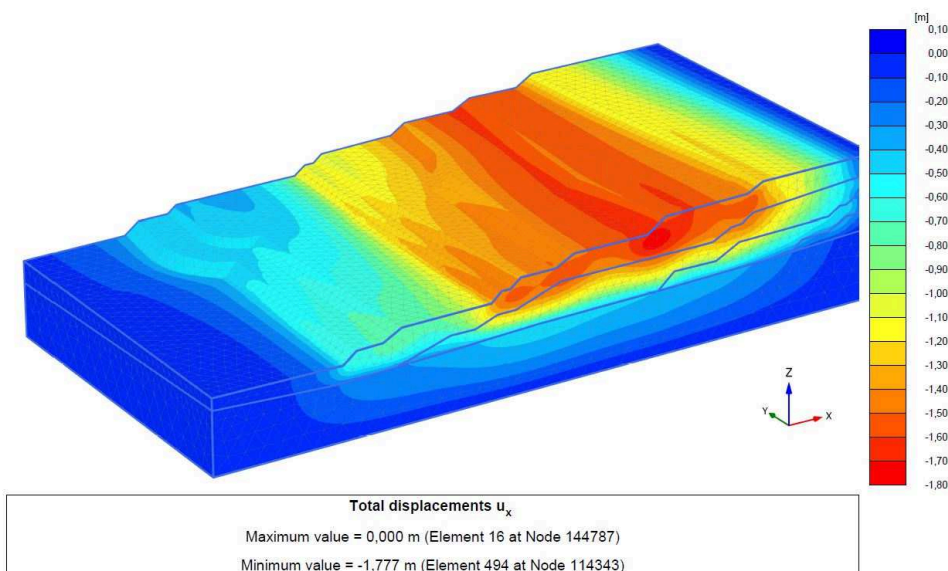
Rok 2010



Obr. 46: Horizontální posuny 2010 (Plaxis 3D)

Absolutní horizontální posuny dosahují maximální hodnoty 1,102m. Posuny samotné etáže roku 2010 dosahují maximální hodnoty 0,03m.

Rok 2014



Obr. 47: Horizontální posuny 2014 (Plaxis 3D)

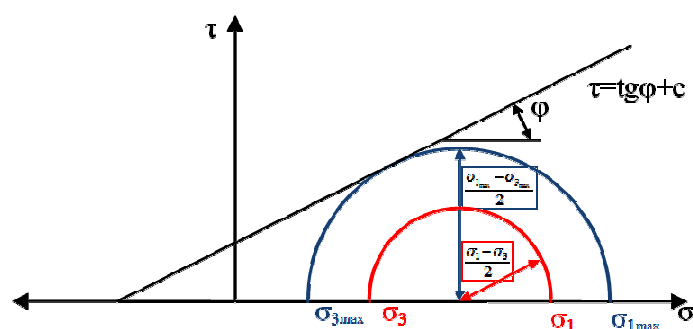
Absolutní horizontální posuny dosahují maximální hodnoty 1,777m. Posuny samotné etáže roku 2014 dosahují maximální hodnoty 0,227m.

5.2 Čerpání smykové pevnosti a výskyty plastických bodů

5.2.1 Čerpání smykové pevnosti

Čerpání smykové pevnosti je vyjádřeno poměrem mezi poloměrem Mohrovy kružnice r , jež vystihuje napěťový stav s poloměrem Mohrovy kružnice, která se dotýká Mohrovy obálky r_{max} , jak je znázorněno na obrázku č. 48.

$$RSS = \frac{r}{r_{max}} = \frac{\frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}}{\frac{\sigma_{1max} - \sigma_{3max}}{2}}$$

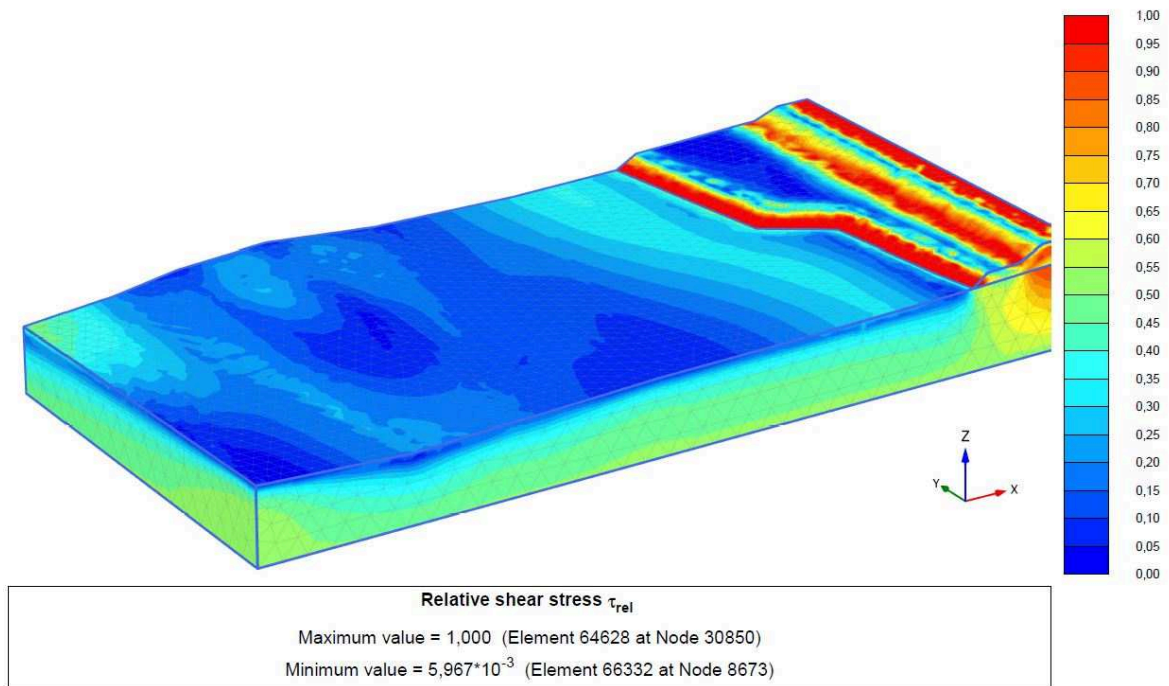


Obr. 48: Čerpání smykové pevnosti [10]

Jednotlivé výsledky výpočtu čerpání smykové pevnosti jsou zobrazeny v následujících grafických výstupech. Maximální čerpání smykové pevnosti se vyskytuje vždy v místech hran a pat jednotlivých svahů etáží výsypky. Vzhledem k tomu, že v jednotlivých fázích ukládání výsypkových těles jsou změněny pevnostní a deformační parametry podloží těchto fází, projeví se tento vývoj i v čerpání smykové pevnosti.

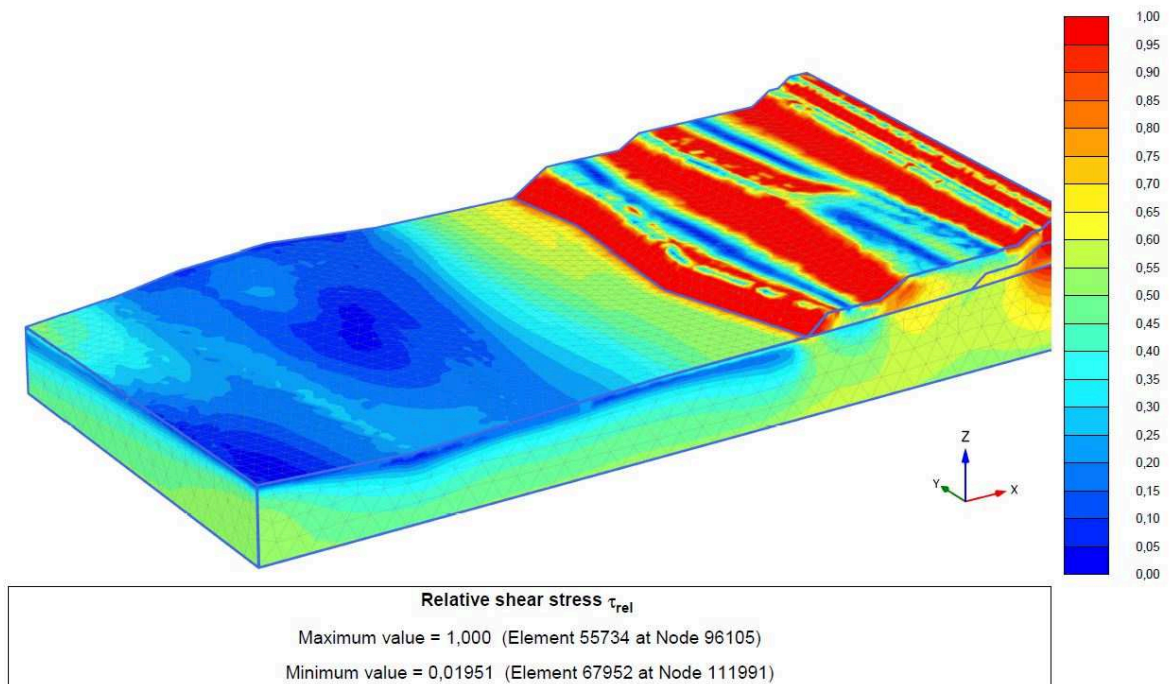
Grafické výstupy čerpání smykové pevnosti z programu Plaxis 3D Output jsou uvedeny v **Příloze 2**.

Rok 2004



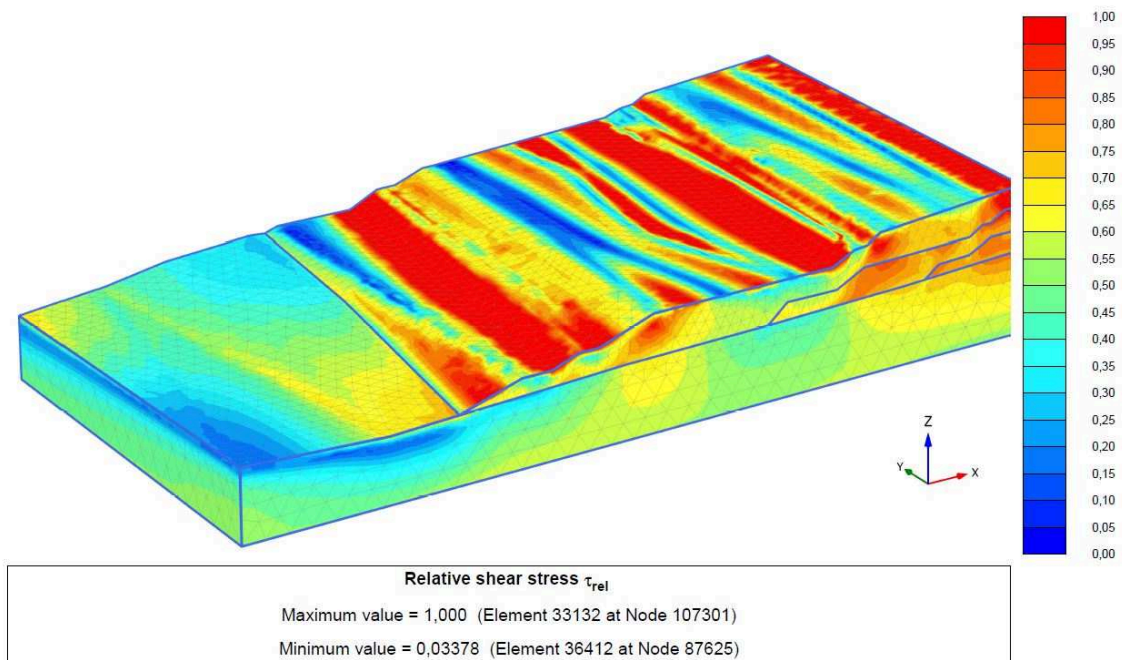
Obr. 49: Čerpání smykové pevnosti 2004 (Plaxis 3D)

Rok 2006



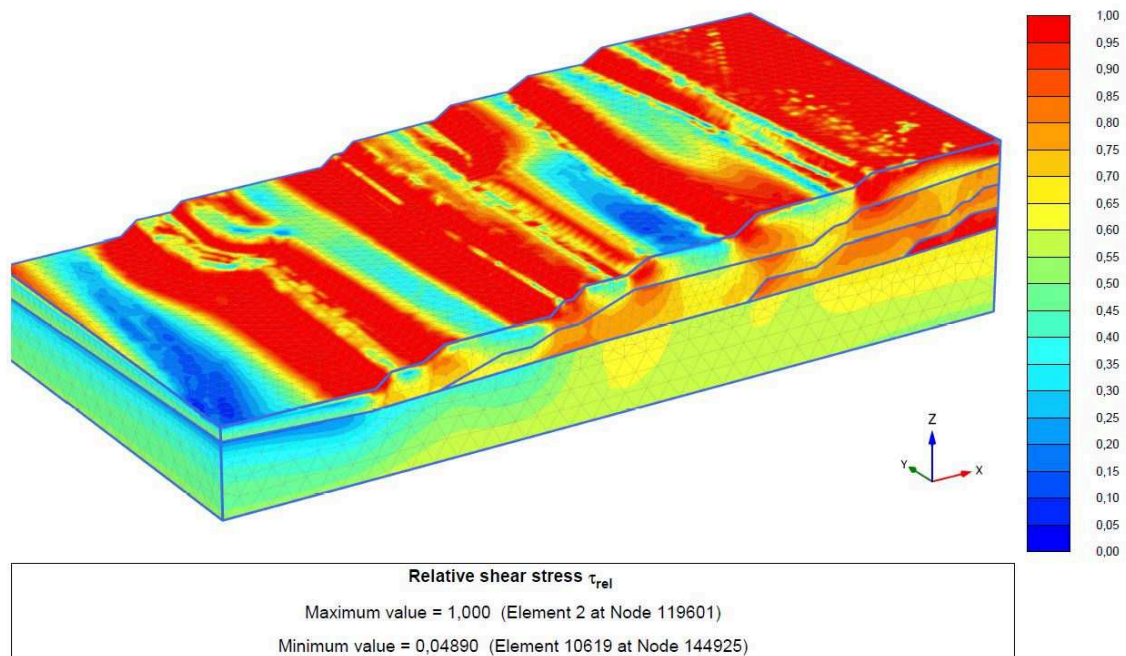
Obr. 50: Čerpání smykové pevnosti 2006 (Plaxis 3D)

Rok 2010



Obr. 51: Čerpání smykové pevnosti 2010 (Plaxis 3D)

Rok 2014

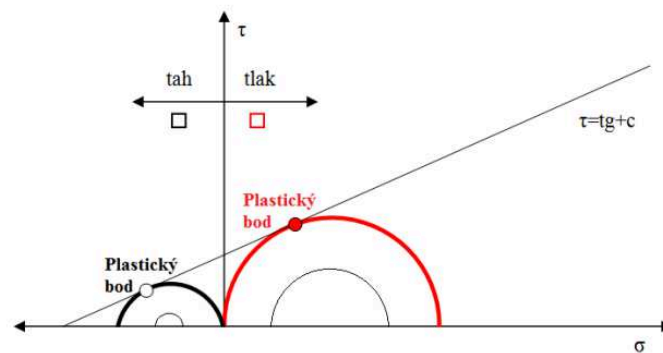


Obr. 52: Čerpání smykové pevnosti 2010 (Plaxis 3D)

Na obrázku č. 52 je očekávaný průběh čerpání smykové pevnosti, ovšem významná je oblast nejnižší fáze z roku 2006, jejíž smyková pevnost je čerpána relativně v celém objemu.

5.2.2 Plastické body

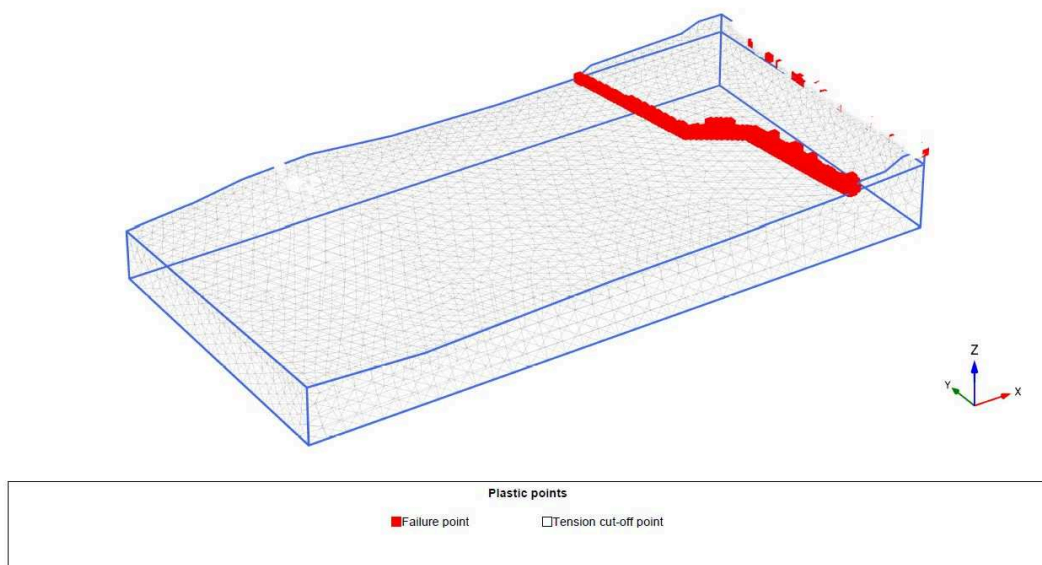
Podmínka vzniku plastických bodů je znázorněna na Obr. 53. Červeně jsou znázorněny tlakové plastické body, černě plastické body tahové. Tlakový plastický bod nastává na pravé straně od vertikální osy, hlavní napětí tedy nabývají kladných hodnot, zatímco porušení v tahu je zakresleno na levé straně od vertikální osy a hlavní napětí nabývají záporných hodnot.



Obr. 53: Plastické body (Hastíková A., 2013)

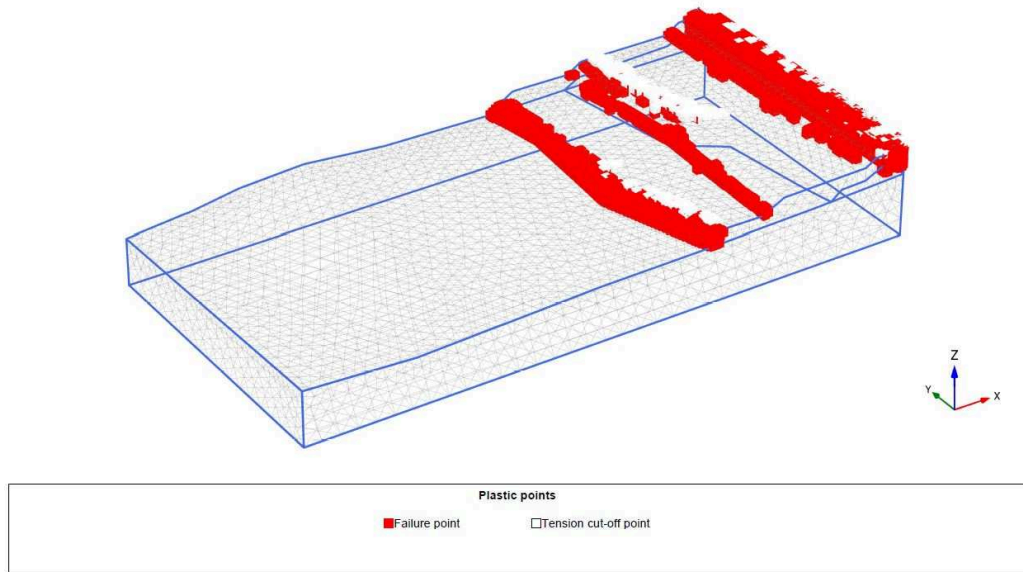
Grafické výstupy plastických bodů z programu Plaxis 3D Output jsou uvedeny v **Příloze 2**.

Rok 2004



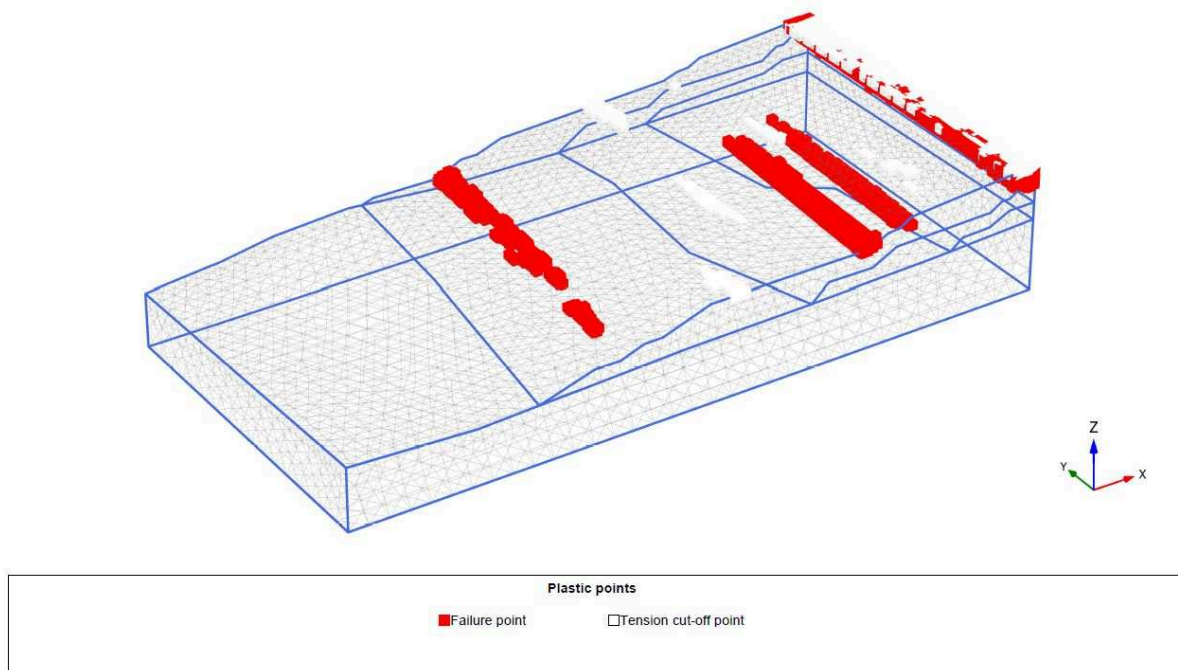
Obr. 54: Plastické body 2004 (Plaxis 3D)

Rok 2006



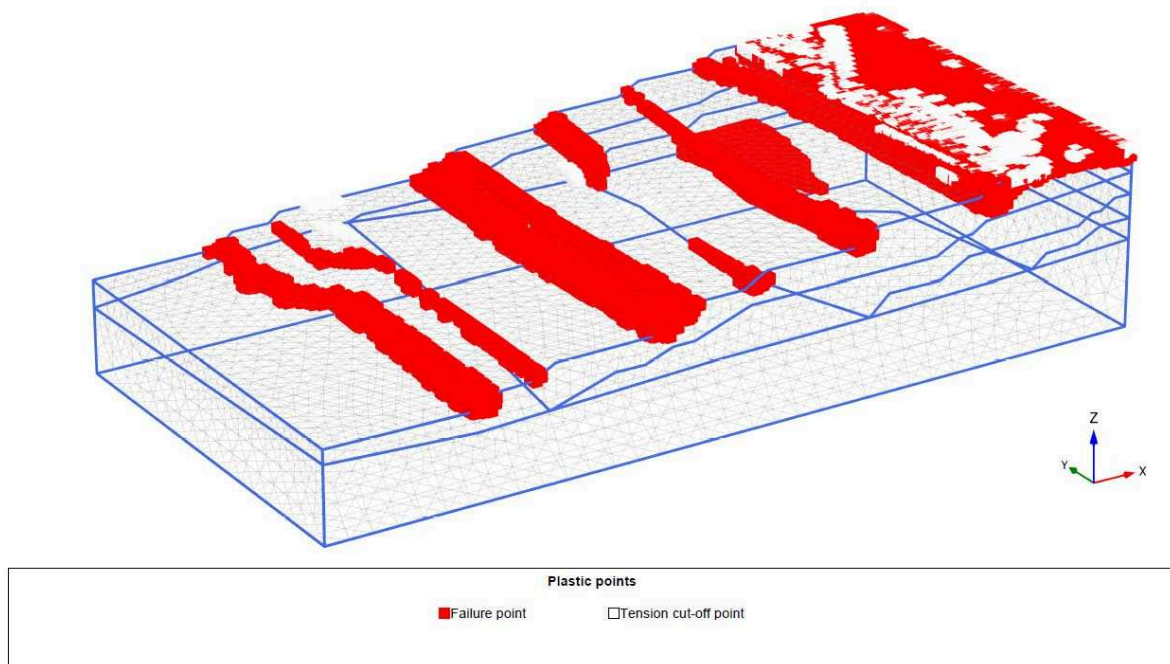
Obr. 55: *Plastické body 2006 (Plaxis 3D)*

Rok 2010



Obr. 56: *Plastické body 2010 (Plaxis 3D)*

Rok 2014



Obr. 57: Plastické body 2014 (Plaxis 3D)

Plastické body, jakožto známka tlakového namáhání, jsou znázorněny červenou barvou, vyskytují se ve všech fázích, obdobně jako při čerpání smykové pevnosti v místech, kde dosahuje hodnot 1,0. Plastické tahové body naznačené bílou barvou jsou na obrázcích ukazatelem tahového namáhání. Tyto výskyty jsou lokalizovány nejčastěji na pojezdových rovinách výsypkových těles.

Na výstupu z roku 2010 lze detekovat dokonce přítomnost pouze tahových plastických bodů na rovině střední etáže, lze tedy předpokládat, že na některých rovinách bude docházet k tahovému porušení a to většinou při povrchu jednotlivých etáží.

5.3 Stabilita svahů

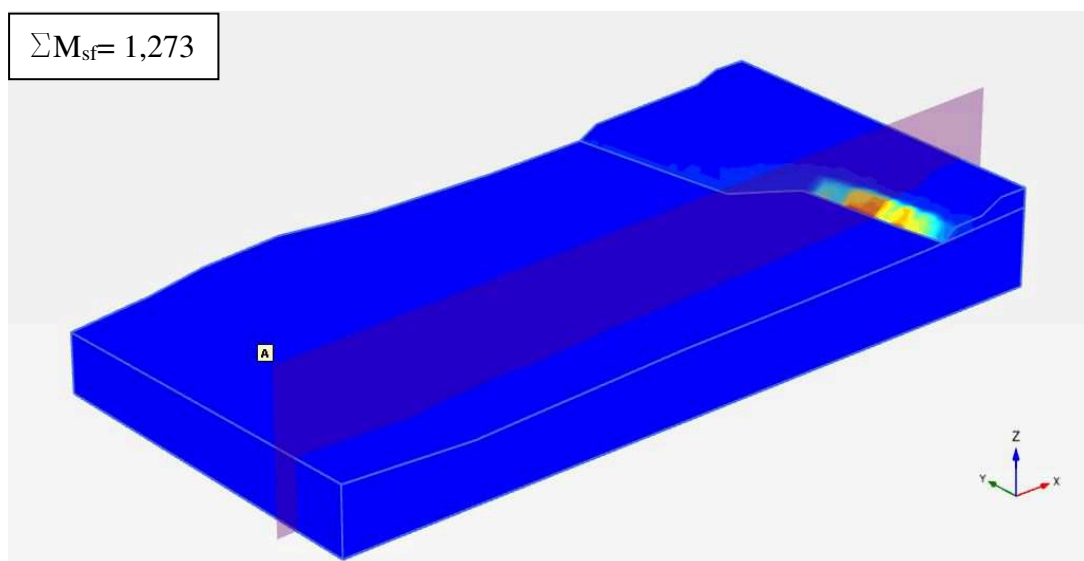
Na výstupech z jednotlivých let, lze pozorovat jednotlivé umístění smykových ploch znázorňující lokální nestabilitu výsypkových etáží.

Rok	2004	2006	2010	2014
Σ Msf	1,273	0,994	1,671	1,248

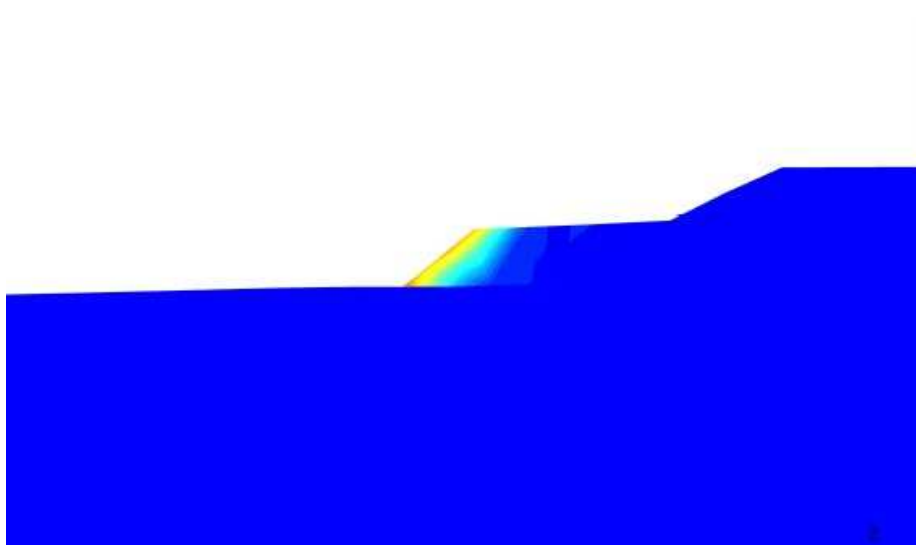
Tab. 5: Tabulka stupňů stability

Grafické výstupy jednotlivých stupňů stability z programu Plaxis 3D Output jsou uvedeny v **Příloze 3**.

Rok 2004



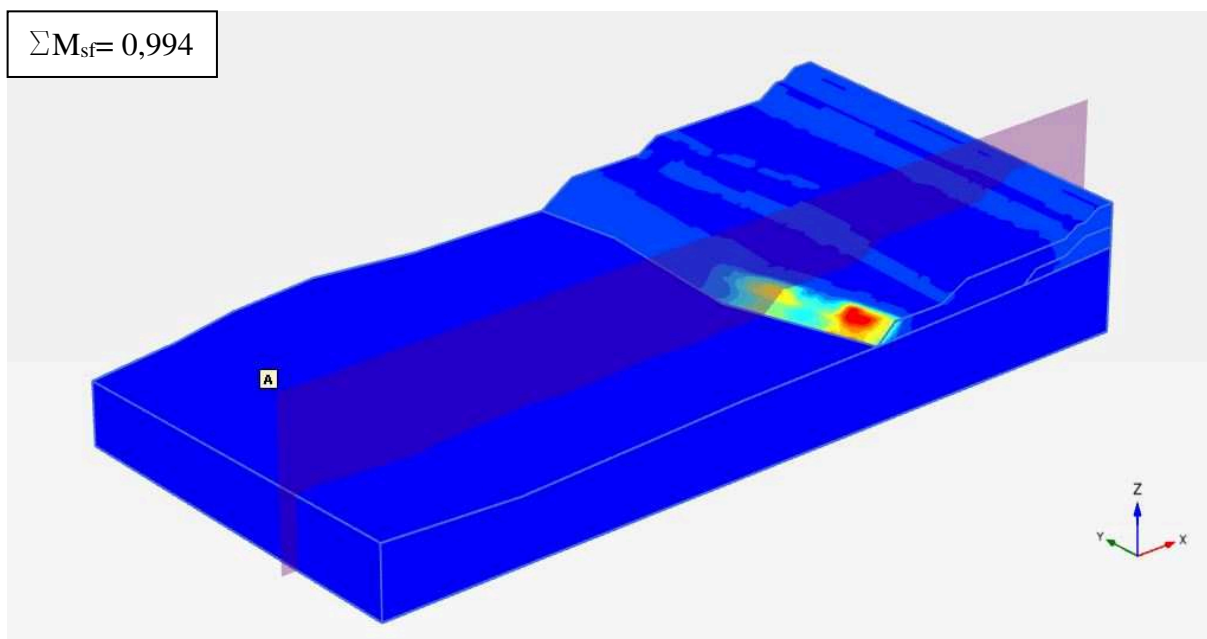
Obr. 58: Smyková plocha 2004 (Plaxis 3D)



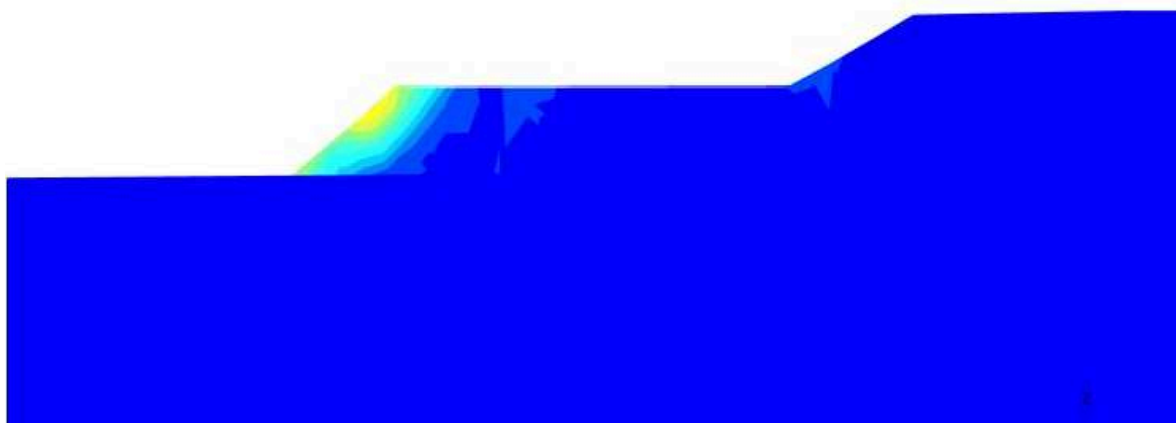
Obr. 59: Řez A-Á smykovou plochou – 2014 (Plaxis 3D)

Rok 2006

$$\Sigma M_{sf} = 0,994$$



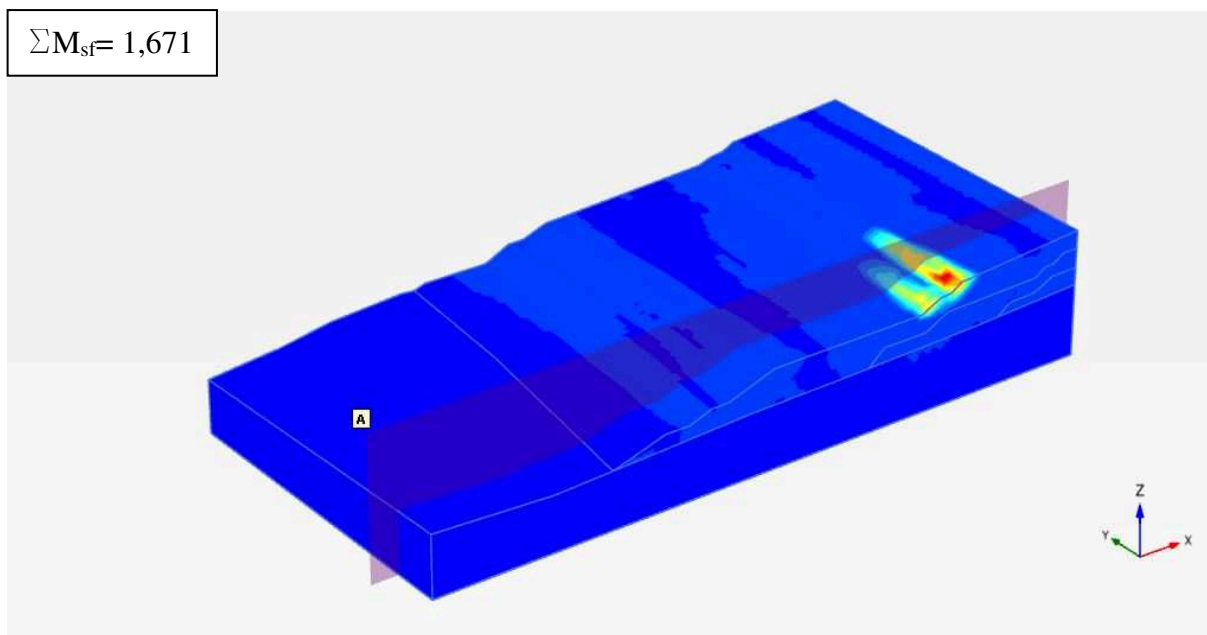
Obr. 60: Smyková plocha 2006 (Plaxis 3D)



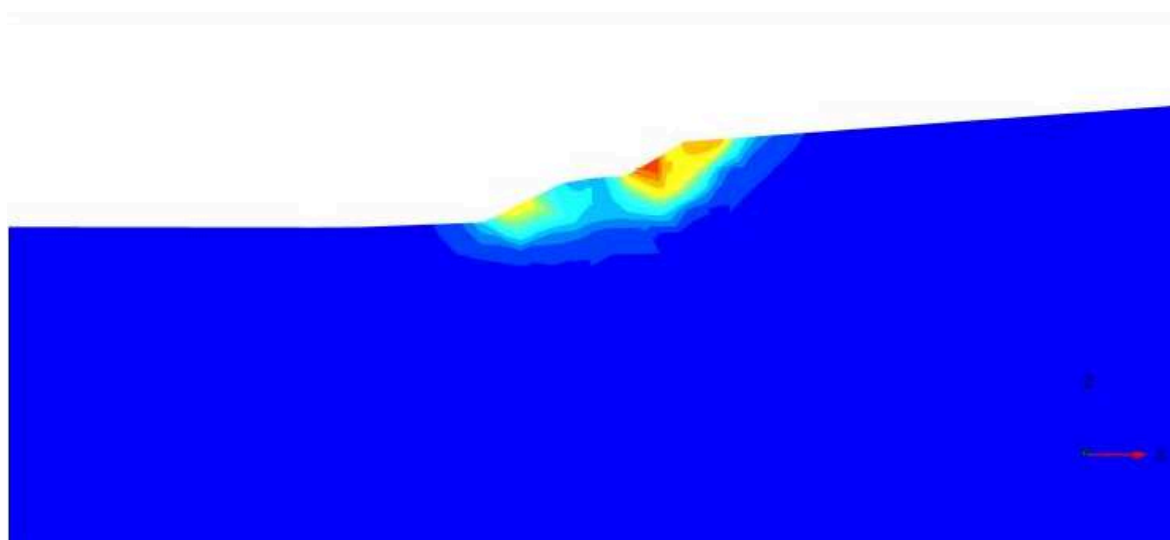
Obr. 61: Řez A-Á Smykovou plochou – 2006 (Plaxis 3D)

Rok 2010

$$\Sigma M_{sf} = 1,671$$



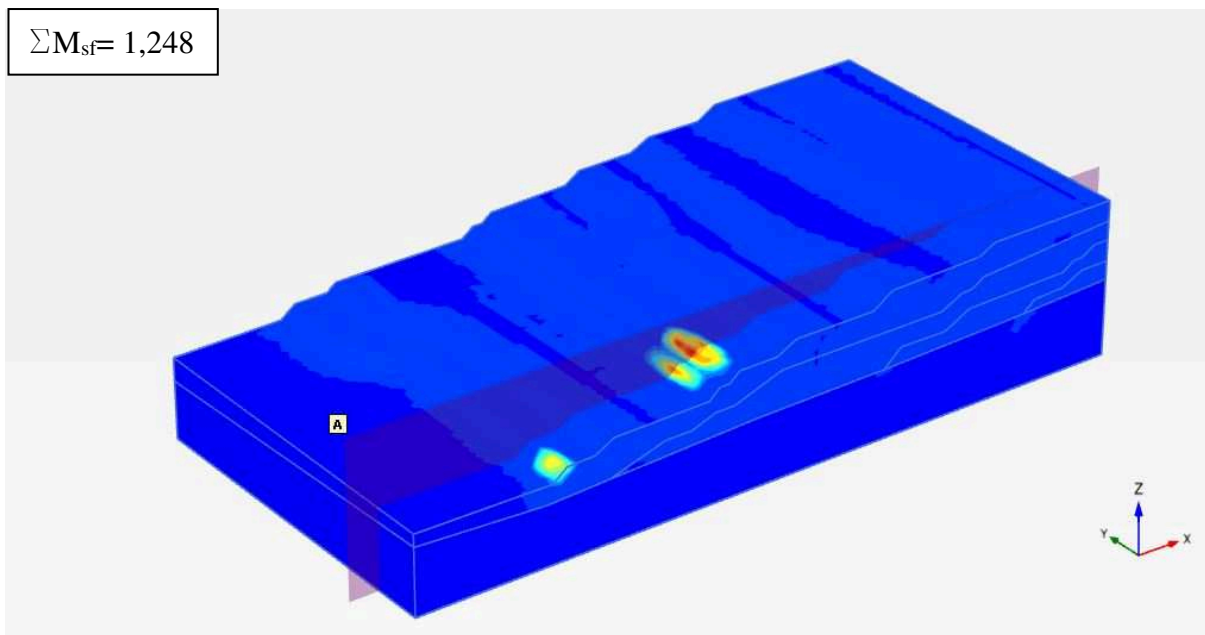
Obr. 62: Smyková plocha 2010 (Plaxis 3D)



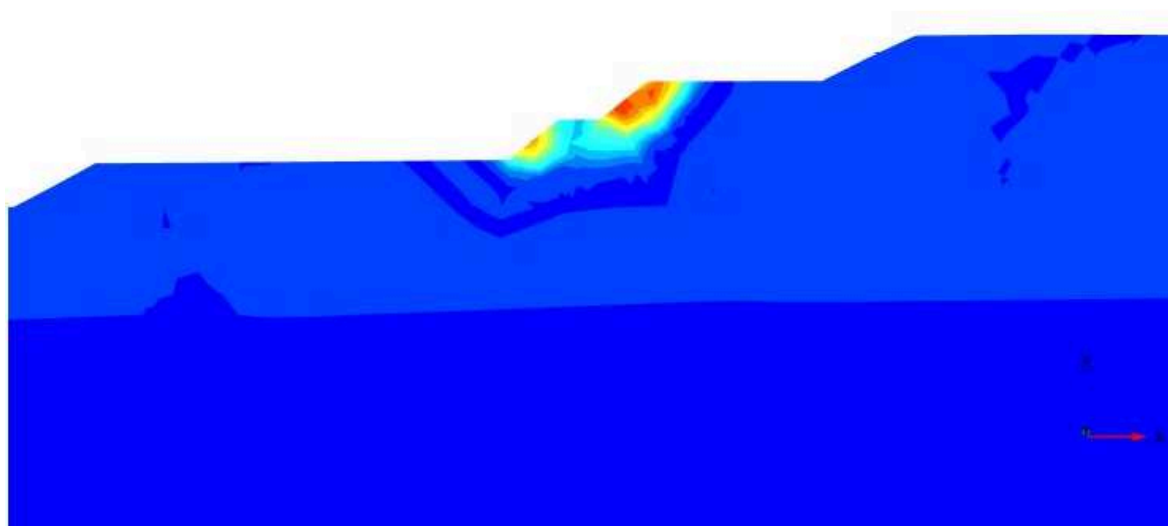
Obr. 63: Řez A-Á smykovou plochou – 2010 (Plaxis 3D)

Rok 2014

$$\Sigma M_{sf} = 1,248$$



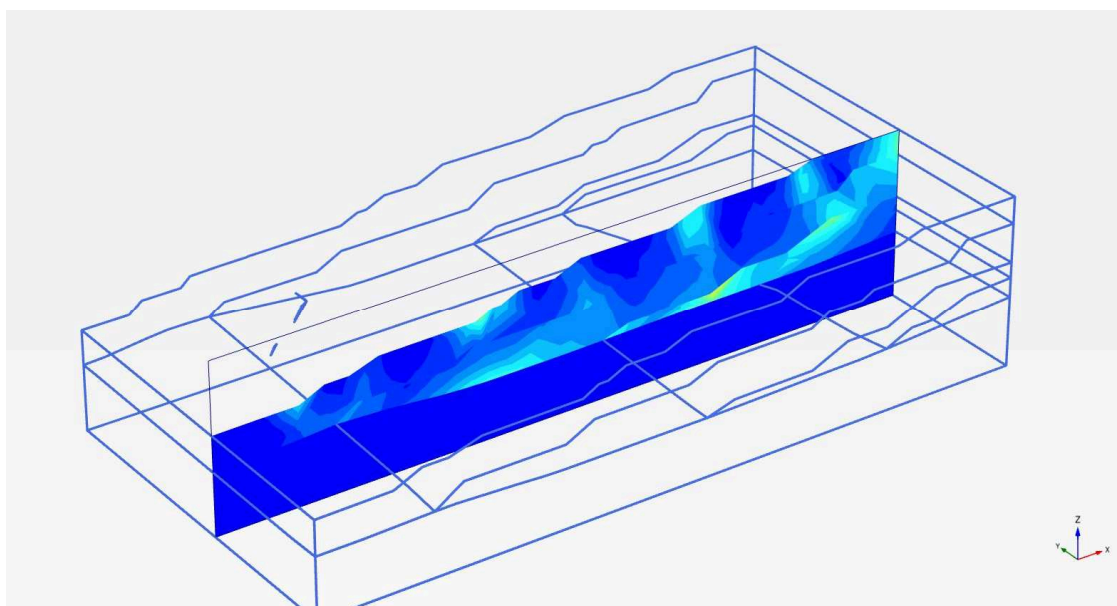
Obr. 64: Smyková plocha 2014 (Plaxis 3D)



Obr. 65: Řez A-Á smykovou plochou – 2014 (Plaxis 3D)

Z jednotlivých grafických výstupů lze odvodit, že znaky výrazné nestability vznikají hlavně v místech, kde se nacházejí dvojité lavičky.

Výsledná smyková plocha



Obr. 66: Zobrazení výsledné smykové plochy (Plaxis 3D)

Na obr. 66 si lze všimnout, že jednotlivé smykové plochy vytvářejí výslednou smykovou plochu. Průběh této smykové plochy z praktických zkušeností odpovídá realitě, kdy smyková plocha nezasahuje do podložky, ale je umístěna na rozhraní výsypka-podložka, kde v naprosté většině případů dochází k usmyknutí.

6 ZÁVĚR

Hlavním cílem diplomové práce bylo obecné shrnutí problematiky chování výsypkových těles a následné vytvoření 3D modelu za pomoci softwarového vybavení Plaxis 3D.

Během procesu vytváření 3D modelu se vyskytlo několik problémů. Zásadní problém nicméně nastal, při importování velmi přesných povrchů do programu Plaxis 3D. Z důvodů výskytu velkého množství zlomů, depresí a jiných terénních nerovností, vznikaly při generování sítě konečných prvků zásadní chyby, jež právě tuto síť neumožnily vytvořit. Pro generalizování jednotlivých povrchů byla nejdříve zvolena metoda upravování pomocí systémových nástrojů programů AutoCAD civil 3D a Báňský model. Bohužel tento postup byl pro generalizování jednotlivých povrchů poměrně časově náročný a z tohoto důvodu i kontraproduktivní. Proto bylo velmi důležité najít nové adekvátní řešení. Toto řešení tkvělo v procesu generalizace jednotlivých povrchů pomocí systémových nástrojů programu Plaxis 3D, kterými byl problém geometrické generalizace odstraněn viz. **kapitola 4.2.1**. Následně byl vytvořen model, který je po výšce rozdělen povrchy z let 2004, 2006, 2010 a 2014. Toto rozdělení umožnilo simulovat postupnou výstavbu výsypky za období 10 let.

Půdorysné rozměry vytvořeného modelu jsou 500 x 1000 metrů a jeho celková výška činí 210 metrů. Podložka dosahuje mocnosti okolo 90 metrů a konečná výška modelované výsypky tak mírně přesahuje hranici 120 metrů. Model výsypky je po výšce rozdělen povrchy jednotlivých let. Průměrná hodnota mocnosti jedné vrstvy je 30 metrů. Na takto vytvořenému modelu proběhlo úspěšné generování sítě konečných prvků viz. **kapitola 4.4**. Po vygenerování sítě konečných prvků mohlo být přistoupeno k nastavení výpočtu.

Výpočet byl proveden na odvodněném prostředí (Drained) a byl řešen pomocí **MC materiálového modelu**. Z hlediska složité hydrogeologie a jejího nastavení v prostředí výsypky proběhl výpočet bez nastavení hladiny podzemní vody. Výpočet byl složen z výchozí fáze (Initial phase), na kterou krok za krokem navazovala výpočetní fáze Plastic (plastická) a Safety (bezpečnost) jednotlivých let. Toto rozčlenění simulovalo postupnou výstavbu výsypky. Do výpočtu bylo nutné zavést skutečnost, že s postupem narůstání výšky výsypky se postupně přetvářely geomechanické parametry sypaniny. A to tak, že s postupem do hloubky se úhel vnitřního tření snižoval a zároveň narůstaly hodnoty pevnosti a soudržnosti viz. **kapitola 4.5.3**. Po nastavení všech potřebných parametrů byl spuštěn výpočet.

Po proběhnutí výpočtu bylo možné, zaměřit se na jednotlivé vyhodnocení výsledků, které proběhlo v programu Plaxis 3D OUTPUT. Byly vyhodnoceny napěťo-deformační stavy jakožto napětí, celkové a horizontální posuny včetně jejich přírůstků. Další zkoumanou veličinou bylo čerpání smykové pevnosti, která je v interakci s výskytem plastických bodů. Posledním výstupem výpočtu bylo určení stupňů stability jednotlivých svahů výsypek a zhodnocení výskytu smykových ploch a lokálních nestabilit. Hodnoty stupňů stability se pohybovaly v hodnotách kolem 1,27 v letech 2004 a 2014, v roce 2010 byl vypočítán stupeň stability 1,69. Jen v roce 2006 byl vypočítán stupeň v hodnotách pod 1,0 a to nejspíš z důvodu lokální nestability svahu.

Konečným výsledkem současného výzkumu modelování výsypkových těles, je tedy skutečnost, že lze namodelovat různé povrchy výsypek, vytvořit 3D funkční model a na tomto modelu provést jednotlivé výpočty. Je však potřeba zdokonalit a zjednodušit tvorbu povrchů pomocí systémových nástrojů Plaxis 3D a pokud možno vyhnout se úpravám v programu AutoCAD civil 3D. Pro výpočet odpovídající ještě více realitě bude potřeba i rozfázování ukládání jednotlivých etází ve sledu, který bude odpovídat reálné výstavbě výsypky. Dalším nezbytným krokem bude modelace vody a charakterizování její přítomnosti ve výsypkovém tělese a to z důvodů nastavení a provedení výpočtu konsolidace. Pro modelování metodou konečných prvků by bylo výhodné vypočtené hodnoty porovnat s výsledkem reálných monitorovacích měření prováděných in-situ.

Modelování vnitřní výsypky v programu Plaxis 3D je tedy z hlediska složitého heterogenního prostředí velmi náročné. Avšak z výsledků diplomové práce vyplývá, že je možné tento software použít pro vytvoření funkčního modelu výsypky a výpočet jejího celkového napěťo-deformačního stavu včetně čerpání smykových pevnostních parametrů, což má při současném deficitu výsypného prostoru vnitřní výsypky dolu Bílina **hlavní význam**.

. V současné době je v realizaci 3D model o půdorysných rozměrech 1x3 km, který se opírá o základy vytvořené vypracováním této diplomové práci. Do budoucna se však předpokládá vytvoření celkového modelu vnitřní výsypky dolu Bílina o rozměrech 4x4 km.

7 POUŽITÁ LITERATURA

[1] ČSN EN 1997-1 : 2006. Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 1: Obecná pravidla. Praha: Český normalizační institut, 2006.

[2] ČSN EN 1997-2 : 2008. Eurokód 7 - Navrhování geotechnických konstrukcí – část 2: Průzkum a zkoušení základové půdy. Praha: Český normalizační institut, 2008

[3] BRINGREVE, J.B.R. - Plaxis reference manual. Amsterdam: Vydavatelství Balkema, 2011.

[4] BORŠI, Milan. RNDr. DOLY BÍLINA- Vnitřní výsypka, Stabilitní analýza: Praha, GeoTec GS, 2009

[5] DNT, Severočeské doly – Soubor laboratorních zkoušek. Chomutov, 1992

[6] HERŠTUS, Jiří. DrSc., Ing. – DNT – Ideový projekt monitoringu výsypek DNT. Praha, září 1991

[7] HLAVÍN, P., Ing. – Zpráva o výsledcích geologickoprůzkumných prací: Praha, Stavební Geologie, 1990

[8] LAHUTA, Hynek. Doc. Dr. Ing. Hynek Lahuta - Informační stránka [online]. 2005, poslední revize 25.5 2010. Dostupné z: www.fast.vsb.cz/lahuta

[9] MAŠÍN, David. Mgr, MPhil.- Vliv konstitučního modelu na predikce deformací okolo tunelu v jemnozrnných zeminách. Karlova Universita, Praha

[10] VĚTROVSKÝ, Milan. – Bakalářská práce – Modelování napěťových a deformačních projevů výsypek programem Plaxis 3D 2012. Ostrava, 2013

[11] ZMÍTKO, Jiří. RNDr. - 40 let výstavby výsypek v podkrušnohorských hnědouhelných revírech: Praha, GeoTec GS, 2010

[12] ZMÍTKO, Jiří. RNDr. SEVEROČESKÉ DOLY A.S., DOLY BÍLINA: Vnitřní výsypka, rešerše a digitalizace archivních podkladů: Praha, GeoTec GS, 2011

8 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 1: Vnitřní výsypka dolu Bílina (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 2: Skrývkové řezy a uhelná sloj (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 3: Pokles - oblast Braňany r. 2013 (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 4: Pokles na výsypkové etáži, projev lokální nestability výsypky na lomu Bílina r. 2013 (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 5: Pohled na vnitřní výsypku lomu Libouš - pokles na výsypce v délce 1500 m činil až 3 m, r. 2012 (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 6: Pohled na nestabilitu výsypkové etáže – vnitřní výsypka Bílina r. 2014 (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 7: Lokální sesuv etáže vnitřní výsypky dolu Bílina 2014 (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 8: Zakládání výsypky na odvodněné a vyuhlené dno lomu (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 9: Zemina vhodného typu (RNDr. Jiří Zmítko, 2011) [12]
- Obr. 10: Zemina podmíněčně vhodného typu (RNDr. Jiří Zmítko, 2011) [12]
- Obr. 11: Zemina nevhodného typu a její charakteristická kulovitá struktura (RNDr. Jiří Zmítko, 2011) [12]
- Obr. 12: Tvarování koruny výsypky r. 2014 (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 13: Totální a efektivní obálka smykové pevnosti jílovcové sypaniny [6]
- Obr. 14: Vytváření pórového tlaku v průběhu sypání vodorovné vrstvy [6]
- Obr. 15: Vnitřní výsypka dolu Hambach (geolocation.ws)
- Obr. 16: Lom Hambach – zleva nahoře vnější výsypka Sophienhöhe, vnitřní výsypka Hambach, těžba hnědého uhlí a skrývkové řezy (Google Earth)
- Obr. 17: Vnitřní výsypka dolu Hambach (geolocation.ws)
- Obr. 18: Mohr-Coulombův materiálový model [10]
- Obr. 19: Vymezená zájmová oblast (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 20: Fotogrammetrický snímek celého těžebního prostoru včetně vnitřní výsypky dolu Bílina (Severočeské doly a.s.)
- Obr. 21: Překrývání povrchů (Plaxis 3D)
- Obr. 22: Neupravený povrch 2014 s vyznačenými místy složité morfologie povrchu (Plaxis 3D)
- Obr. 23: Upravený povrch 2014 (Plaxis 3D)
- Obr. 24: Upravené povrchy - podložka, 2004, 2006, 2010, 2014 (Plaxis 3D)
- Obr. 25: Vytvoření objemu (Plaxis 3D)

Obr. 26: Model po rozdělení jednotlivými povrchy (Plaxis 3D)
Obr. 27: Připravený model pro nastavení vstupních charakteristik (Plaxis 3D)
Obr. 28: Nadefinovaný model připravený pro výpočet (Plaxis 3D)
Obr. 29: 10-nodes (uzlový) prvek sítě MKP (Plaxis 3D manual) [3]
Obr. 30: Vygenerovaná síť konečných prvků (Plaxis 3D)
Obr. 31: Nastavení výpočetních fází (Plaxis 3D)
Obr. 32: Výpočetní fáze 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 33: Výpočetní fáze 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 34: Výpočetní fáze 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 35: Výpočetní fáze 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 36: Hlavní efektivní napětí 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 37: Hlavní efektivní napětí 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 38: Hlavní efektivní napětí 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 39: Hlavní efektivní napětí 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 40: Celkové posuny 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 41: Celkové posuny 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 42: Celkové posuny 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 43: Celkové posuny 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 44: Horizontální posuny 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 45: Horizontální posuny 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 46: Horizontální posuny 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 47: Horizontální posuny 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 48: Čerpání smykové pevnosti [10]
Obr. 49: Čerpání smykové pevnosti 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 50: Čerpání smykové pevnosti 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 51: Čerpání smykové pevnosti 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 52: Čerpání smykové pevnosti 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 53: Plastické body (Hastíková A., 2013)
Obr. 54: Plastické body 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 55: Plastické body 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 56: Plastické body 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 57: Plastické body 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 58: Vznik smykové plochy 2004 (Plaxis 3D)
Obr. 59: Řez smykovou plochou A-Á – 2014 (Plaxis 3D)

- Obr. 60: Vznik smykové plochy 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 61: Řez smykovou plochou A-Á – 2006 (Plaxis 3D)
Obr. 62: Vznik smykové plochy 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 63: Řez smykovou plochou A-Á – 2010 (Plaxis 3D)
Obr. 64: Vznik smykové plochy 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 65: Řez smykovou plochou A-Á – 2014 (Plaxis 3D)
Obr. 66: Zobrazení výsledné smykové plochy (Plaxis 3D)

9 SEZNAM TABULEK

- Tab. 1: Materiálové charakteristiky
Tab. 2: Rozfázování geomechanických vlastností výsypky
Tab. 3: Celkové posuny a jejich jednotlivé přírůstky
Tab. 4: Horizontální posuny a jednotlivé přírůstky
Tab. 5: Tabulka stupňů stability

10 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 - Výstupy napěťo-deformačních stavů
Příloha 2 - Výstupy čerpání smykové pevnosti a výskytu plastických bodů
Příloha 3 - Výstupy stability svahů