

Geova, s.r.o., Medená 23, 040 17 Košice

**„PREHODNOTENIE VPLYVOV ZATOPENIA BANE
LUBENÍK NA POVRCH NUMERICKÝM MODELOVANÍM“**

Objednávateľ: SLOVMAG, a.s. Lubeník, Lub

Zhotoviteľ: Geova, s.r.o. Medená 23, K

Ing. Pavol Vavrek, PhD.

Ing. Ivana Vavreková

Košice, február 2024

OBSAH

1. Úvod	1
2. Voda v horninách	2
3. Vplyv vody na geotechnické vlastnosti hornín a masívu.....	3
3.1 Fyzikálne a hydrofyzikálne vlastnosti hornín	3
3.2 Mechanické a pretvárne vlastnosti hornín v mokrom stave	5
4. Posúdenie mokrej likvidácie hlavných banských diel v DP Lubeník numerickým modelovaním.....	9
4.1 Všeobecné aspekty prognózy stability vydobytých priestorov s dopadom na povrch.....	10
4.2 Numerické simulačné schémy pri mokrej likvidácii v programe Flac3D	10
4.3 Verifikácia numerickej simulácie	11
4.3.1 Suchý model.....	11
4.3.2 Mokrý model.....	12
5. Tvorba 3D modelu a pre-processing.....	17
5.1 Geotechnické vlastnosti horninového prostredia vstupujúceho do modelu.....	17
5.2 Definovanie matematického modelu horninového prostredia.....	17
5.3 Okrajové podmienky geometrické, deformačné a napäťové.....	18
6. Processing a postprocessing.....	20
6.1 Výsledky modelovania.....	22
6.2 Posúdenie stavu stability horninového masívu pre úroveň zatopenia po VII. obzor.....	23
6.2.1 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastností hornín.....	23
6.2.3 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastnosti hornín, uplift (zdvih) terénu.....	37
6.3 Posúdenie stavu stability horninového masívu pre úroveň zatopenia po V. obzor.....	42
6.3.1 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastnosti hornín.....	42
6.3.2 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastnosti hornín, uplift (zdvih) terénu.....	56
6.4 Posúdenie stability ťažnej jamy č. 3, jej okolia a stanovenie bezpečnostného pásma jamy č. 3.....	61
6.4.1 Definovanie matematického modelu jamy č. 3, okrajové podmienky.....	61
6.4.2 Vlastnosti zasypu jamy.....	64
6.4.3 Vplyv zasypu nespevneného nesúdržného materiálu na stabilitu vystuženej jamy	66
6.4.4 Stabilita jamy č. 3 po zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru.....	68
6.4.5 Stabilita jamy č. 3 po zatopení podzemia po úroveň V. obzoru.....	73
6.5 Posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem.....	78
6.5.1 Stabilita závalového pásma v reze 11-11'.....	79
6.5.1.1 Stabilita rezu 11-11' pri zatopení podzemia po úroveň 172 m n. m. (VII. obzor)	80
6.5.1.2 Stabilita rezu 11-11' pri zatopení podzemia po úroveň 282 m n. m. (V. obzor)...	83
6.5.2 Stabilita závalového pásma pri zatopení podzemia stanovená pomocou tzv. polzávalu.....	86
6.5.2.1 Stabilita polzávalu pri zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru (172 m n. m.)	87
6.5.2.2 Stabilita polzávalu pri zatopení podzemia po úroveň V. obzoru (282 m n. m.)....	91

7. Zhodnotenie výsledkov numerického modelovania.....	95
7.1 Stabilita horninového masívu, tzv. celý model	95
7.2 Stabilita jamy č. 3	97
7.2.1 Bezpečnostné pásmo jamy č. 3.....	99
7.3 Stabilita závalových pásiem.....	101
7.3.1 Stabilita rezu 11-11'	101
7.3.2 Stabilita závalového pásma pri zatopení podzemia stanovená pomocou tzv. polzávalu.....	102
8. Záver.....	104
9. Literatúra.....	106

1.Úvod

Na základe Dodatku č. 1 Zmluvy o dielo podpísanej medzi firmou SLOVMAG, a.s. Lubeník (Objednávateľ) a firmou Geova, s.r.o., Medená 23, Košice (Zhotoviteľ) zo dňa 9.11.2023 bol vypracovaný odborný posudok týkajúci sa:

- 1) posúdenia stability horninového masívu v dobývacom priestore (DP) Lubeník počas zatápania (3 úrovne hladín zatápania) a po zatopení podzemnej prevádzky (tzv. „mokrý stav“),
- 2) posúdenie stability ťažnej jamy č. 3, jej okolia a stanovenie bezpečnostného pásma jamy č. 3,
- 3) posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem.

Pozn. k bodu 1): Na základe dojednania medzi zástupcami firiem Slovmag,a.s. Lubeník, Tratec, s.r.o. Prešov – projektant Plánu likvidácie hlavných banských diel v DP Lubeník a Geova, s.r.o. Košice zo dňa 30.11.2023 a následnému potvrdeniu v nadväznnej e-mailovej komunikácii bolo posúdenie stability horninového masívu prevedené pre úroveň zatopenia VII. obzoru – 172 m n. m. a V. obzoru - 282 m n. m.

Objednávateľom úlohy boli Zhotoviteľovi poskytnuté tieto podklady (z riešenia tzv. „suchého variantu“):

- mapová dokumentácia z predmetnej oblasti v tlačenej a digitálnej podobe (banská mapa bane Lubeník - obzorové mapy v mierke M 1:1000 s poslednými aktualizáciami zo začiatku 21. storočia, povrchová mapa Lubeník M 1:1000 s poslednou aktualizáciou z roku 1991, priečne rezy ložiskom Lubeník, pozdĺžny rez ložiskom Lubeník 27-27' v mierke M 1:1000),
- Rekultivácia poklesnutých priestorov po ťažbe magnezitu SLOVMAG a.s. Lubeník, ÚVR Košice a.s., Magnezitárska 11, Košice, 1997,
- Prehodnotenie ďalšieho postupu dobývania a likvidácie na závode SMZ Lubeník, ÚVR Košice, 1984,
- Aktualizácia ďalšieho postupu dobývania a likvidácie vyrúbaných priestorov na ložisku Lubeník, BGÚ Lubeník, máj 1992,
- Zhodnotenie skutkového stavu likvidácie pilierov v ložisku Lubeník, OBV VÚ SMZ, 10/1991,
- Štúdia technického riešenia otvarky a GP prác pod IX. Obz. Lubeník, SMZ, n. p. Košice, 1986.
- fotodokumentáciu zo subhorizontálneho vrtu v osi budúcej odvodňovacej štolne, jamový terč a parametre výstuže jamy č. 3, dobu zatopenia bane po úroveň V. obzoru a pod. poskytla zhotoviteľovi firma Tratec, s.r.o. Prešov.

Súčasťou Dodatku č. 1 sú v bode IV. Povinnosti objednávateľa uvedené tieto podklady, ktoré zabezpečí objednávateľ a odovzdá zhotoviteľovi:

- **geologický profil fáracej a ťažnej jamy č.3 po celej hĺbke.**

Pozn.: Aj napriek úsiliu všetkých zúčastnených strán [Slovmag,a.s. Lubeník, Tratec, s.r.o. Prešov (projektant) a Geova, s.r.o. Košice] sa geologický profil nepodarilo zabezpečiť. Pri geotechnickom modelovaní jamy č. 3 sa vychádzalo z poznatkov projektanta, ktorý na jednaní dňa 30.11.2023 uviedol, že cca do 1/3 hĺbky od povrchu je jama č. 3 vyhlbená v sericiticko-chloritických fýlitoch a zvyšok v karbonátoch- dolomity a vápence resp. magnezity. Zhotoviteľ považuje v tomto bode povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 30.11.2023.

- **jamový terč jamy č. 3.**

Pozn.: Dodané projektantom 18.9.2023. Povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 18.9.2023.

- **spôsob vystuženia jamy č. 3 po celej hĺbke.**

Pozn.: Dodané projektantom 18.9.2023. Povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 18.9.2023.

- **zameranie povrchu záujmovej závalovej oblasti a širšieho okolia DP Lubeník.**

Pozn.: Dodané projektantom 18.9.2023. Povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 18.9.2023.

- **časovú a výškovú os zatápania.**

Pozn.: Viď poznámka k bodu 1). Povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 30.11.2023.

- **fyzikálno-mechanické a hydrofyzikálne vlastnosti podlažia, v ktorom je zhotovená jama č.3**

Pozn.: V e-mailovej odpovedi Ing. Vargu (Tratec, s.r.o.) zo dňa 8.12.2023 na e-mailovú komunikáciu od zhotoviteľa zo dňa 4.12.2023 boli uvedené vlastnosti sericiticko-chloritických fylitoch, ktoré projektant používa pri návrhu zátky ohlbne jamy č. 3. Povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 8.12.2023. Hydrofyzikálne vlastnosti podlažia neboli zhotoviteľovi zaslané projektantom.

- **spôsob zaistenia prieniku odvodňovacej štôlne s jamovým telesom.**

Pozn.: Informáciu o riešení prieniku odvodňovacej štôlne s jamou č. 3 zaslal projektant zhotoviteľovi dňa 14.2.2024. Povinnosti objednávateľa voči zhotoviteľovi splnené dňa 14.2.2024.

2. Voda v horninách

Geotechnické hodnotenie horninového prostredia vychádza zo základných geologických poznatkov, opiera sa o údaje o vlastnostiach hornín a charakteristické parametre horninového masívu. Horniny predstavujú viacložkové heterogénne systémy zahrňujúce pevnú, kvapalnú a plynnú fázu. Hornina ako časť masívu, ohraničená plochami nespojitosti sa vyznačuje odlišnými vlastnosťami ako horninový masív. Práve pri tomto rozlíšení sa ukazujú ako veľmi potrebné štruktúrno-tektonické poznatky o stavbe horninového masívu. Navyše, v prípadoch prítomnosti dostatočného množstva vody v horninovom prostredí pri úplnom zatopení bane, ide o analýzu a zdôvodnenie všetkých pochodov v sústave hornina-voda-vzduch.

Závažným činiteľom spôsobujúcim zmenu fyzikálno-mechanických vlastností hornín a masívu je voda. Reálne zhodnotiť tento fakt v predmetnej oblasti znamená, že pri riešení otázok likvidácie by objektívny vplyv vody nemal byť podcenený, ale ani precenený.

V skúmanom území je potrebné sa zamerať na zistenie vplyvu zvýšeného obsahu vody v horninách a masíve, až po stav ich úplného nasiaknutia banskou vodou v procese prirodzeného vzostupného zatápania. Ide o to, ktoré vlastnosti a akou mierou budú ovplyvňované zmenou vlhkosti a aké zmeny to vyvolá v napäťovo-deformačnom stave horninového masívu, ale najmä ako sa úplné zatopenie prejaví na pilierový systém bane s dopadom na deformáciu povrchu.

Ak u hornín je prítomnosť kvapalnej fázy podmienená pórovitosťou hornín, tak u horninových masívov je podmienená systémom puklín a zlomov (prípadne ich výplňou) a u masívov s vydobýtimi časťami ložiska aj systémom banských chodieb a dobývacích priestorov.

Vodu, ktorá sa nachádza pod povrchom, označujeme ako podzemnú vodu (resp. banskú vodu). Z hľadiska genetického vo väčšine prípadov ide o vodu povrchovú, prenikajúcu do podzemia z vôd atmosférických alebo povrchových tokov. Táto voda sa pohybuje z povrchu do podzemia pôsobením gravitácie a horniny presakujúcu vodu pohlcujú a zadržujú.

Horniny môžu obsahovať voľnú vodu vo forme všetkých troch skupenstiev, obsahujú tiež vodu chemicky a fyzikálne viazanú. Jednotlivé druhy vody sa často v konkrétnej hornine prelínajú a dochádza medzi nimi k zložitým interaktívnym javom, ktorých podstata nie je doposiaľ úplne objasnená. Všeobecne možno uviesť, že sa tu uplatňujú rôzne sorpčné schopnosti hornín, difúzia, oxidácia a ďalšie chemické a molekulárne pochody. Pri skúmaní otázok vody v hornine treba uvažovať aj s vodnou parou, prípade s inými plynmi. Pri takomto komplexnom ponímaní vody v hornine, ako už bolo naznačené pôjde vždy o riešenia v sústave hornina-voda-vzduch. Aj keď sa v podzemí stretávame najmä s voľnou vodou (teda tečúca vo voľných podzemných dielach) z hľadiska banskej praxe má význam i viazaná voda. Táto je na horniny viazaná v troch formách:

1. Voda v mikroštruktúre minerálov (molekulárna a konštitučná).
2. Voda v makroštruktúre hornín (hygroskopická a obalová).
3. Voda v štruktúre pohorí (puklinová a pórová).

Migrácia vody v horninovom masíve, v ktorom bola realizovaná ťažba, sa sústreďuje najmä na banské priestory. V procese postupného zatápania, v chodbách a dobývkach in situ, bude dochádzať k vplyvu vody na okolité horniny, čo môže vyvolať procesy vylúhovania pri ľahko rozpustných horninách, alebo vyplavovanie výplní trhlín. Možnosti väčšej migrácie vody v prípadoch interakcie

vody s puklinovým masívom, sú zviazané s charakteristikami a absolútnou početnosťou jednotlivých puklinových systémov.

Treba tiež podčiarknuť, že vydobyté priestory v prípade zatopenia umožnia rýchly transport vody k starým trhlinám a zlomom, a tým môže dôjsť k reaktivácii pohybov. Totiž pukliny, ktoré sú plochami mechanického oslabenia, kde však zatiaľ nedošlo k výraznejšiemu pohybu, budú pri dlhodobom satureovaní vodou predurčenými plochami možného pohybu. V takomto prípade môže následne dôjsť k prepojeniu s ďalšími – i netektonickými – puklinami (vzniknutými sekundárne, pôsobením zvýšených horninových tlakov) a potom k vzniku výraznejších pohybov hornín i porušeniu stability pilierov.

3. Vplyv vody na geotechnické vlastnosti hornín a masívu

Z hľadiska riešeného problému je nevyhnutné posudzovať hlavne tieto fyzikálno mechanické vlastnosti:

- objemová hmotnosť hornín v suchom stave, po nasiaknutí,
- nasiakavosť hornín,
- pevnostné parametre v suchom stave a po nasiaknutí,
- pretvárne vlastnosti v suchom stave a po nasiaknutí.

Ideálnym postupom v rámci riešenia predmetnej problematiky by bola realizácia komplexného laboratórneho výskumu a meraní in situ, ktorých výstupom by boli parametre hornín a masívu rozhodujúce pre riešenie tzv. suchého a mokrého variantu vyskytujúcich sa v posudzovanej oblasti, pre suchý stav a po nasiaknutí.

Vzhľadom na časovú a finančnú náročnosť takéhoto prístupu sa od tohto riešenia upustilo. Vlastnosti dotknutých typov hornín (ložisková výplň, podložné a nadložné bridlice, hlbšie podložie – diabázy, vyššie nadložie – vápence) pre suchý stav vychádzali z dostupných hlavne domácich prameňov. Táto problematika je detailne riešená vo výskumnej správe z júna 2023 (Vavrek, P., Vavreková, I., 2023).

Pre mokrý stav boli používané hlavne zahraničné pramene. Súčasťou tohto posúdenia je aj vyjadrenie sa k stabilite hlavnej jamy č. 3, ktorá je hĺbená asi do 1/3 hĺbky od povrchu v sericiticko – chloritických fylitoch (SCHF). Súčasťou tejto kapitoly je teda aj vyjadrenie sa k parametrom SCHF pre suchý a mokrý stav, ako aj k parametrom zásypu jamy č. 3.

3.1 Fyzikálne a hydrofyzikálne vlastnosti hornín

Zhotoviteľ v rámci svojich technických možností realizoval stanovenie nasiakavosti na vzorkách grafitických bridlíc a magnezitov (tab. 1), ktoré boli odobraté z podzemia v marci 2023, podrobené testu nasiakavosti boli v dobe od 30.3.2023 do 9.12.2023 (obr. 1,2). Pre zaliatie bola použitá banská voda odobratá na IX. obzore.

Nasiakavosť hornín je schopnosť hornín prijímať do svojich pórov a iných nespojitosťí vodu alebo inú kvapalinu. Stanovuje sa ako prírastok vody, ktorú prijme vzorka horniny za určitého tlaku, teploty a po určitej dobe nasiakavania.



Obr. 1: Vzorky bridlíc počas zalievania



Obr. 2: Vzorky magnezitu

Tab. 1: Nasiakavosť

Číslo vzorky	Miesto odberu	Popis	Nasiakavosť [%]	Nasiakavosť pr. [%]
1	K-1014	grafitické bridlice	1,0	1,1
2	K-1014	grafitické bridlice	1,1	
3	K-1014	grafitické bridlice	1,4	
4	K-1014	grafitické bridlice	0,9	
5	K-1014	grafitické bridlice	1,3	
6	II. MOCH - 1015	grafitické bridlice	0,9	0,9
7	II. MOCH - 1015	grafitické bridlice	1,2	
8	II. MOCH - 1015	grafitické bridlice	0,6	
9	II. MOCH - 1015	grafitické bridlice	0,7	
10	XI. obzor	magnezit	0,2	0,3
11	XI. obzor	magnezit	0,3	
12	XI. obzor	magnezit	0,4	

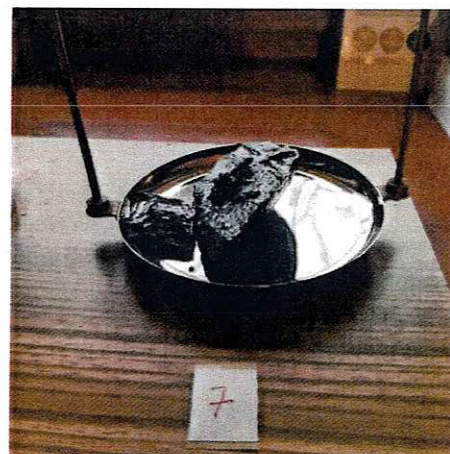
Pozn.: Nasiakavosť pr. – Nasiakavosť priemerná

Priemerná nasiakavosť grafitických bridlíc v závislosti od miesta odberu sa pohybuje v rozmedzí 0,9 – 1,1 %. Je cca 3 až 3,5 krát vyššia ako je nasiakavosť magnezitov (tab. 1).

Nasiakavosť je významným ukazovateľom stavu horniny (stupeň zvetrania). Výsledná hodnota nasiakavosti korešponduje obvykle s hodnotou pórovitosti, keď u bežných skalných hornín je nižšia o cca 1 až 2 percentuálne body.

Pri dlhodobom ponorení skúšobných vzoriek magnezitu v banskej vode tieto nevykazovali žiadne zmeny v tvare a objeme.

Vzorky grafitických bridlíc pri dlhodobom ponorení vo vode vykazovali nepatrné zmeny, ktoré sa prejavovali vo výskyte malých čiastočiek na dne sklenených nádob o veľkosti jemnozrnného prachu až jemného a stredného piesku. Pri vzorke č.7 došlo k odlúpnutiu malého kúska bridlice po ploche odlučnosti (obr. 3). Vo všeobecnosti platí, že pri použitých skúšobných vzorkách - grafitické bridlice nedošlo k žiadnemu prejavu rozpadavosti až rozbredavosti. Vzorky ukázali dostatočnú štruktúrnú stálosť (s výnimkou vzorky č. 7) aj pri dlhodobom ponorení v banskej vode.



Obr. 3: Vzorka bridlíc s odlupkom

Nasiakavosť magnezitu z lokality Hnúšťa a Bankov (Hatala, J. a kol., 1985) sa pohybujú v intervale 0,16 – 0,18 %, čo sú hodnoty mierne nižšie akú sú hodnoty uvedené v tab. 1. Nasiakavosť pri bežných postupoch sa stanovuje spravidla pri 48 hod. ponorení skúšobných vzoriek do vody, čo je aj prípad podľa Hatalu, J.. Vzorky z Lubeníka boli podrobované dlhodobej nasiakavosti, preto sú ich hodnoty vyššie.

Pórovitosť je podiel objemu dutín a pórov v objemovej jednotke horniny. Nestanovuje sa priamou skúškou, ale sa dopočítava z hustoty a objemovej hmotnosti podľa nasledujúceho vzťahu:

$$n = \left(1 - \frac{\rho_o}{\rho_m}\right) \cdot 100 \quad [\%] \quad (1)$$

kde ρ_o – objemová hmotnosť,

ρ_m – hustota resp. merná hmotnosť.

Dutiny, t.j. póry a trhliny v horninách sú veľmi dôležité formy nerovnorodosti štruktúry a textúry hornín. Póry v hornine sú malé, spravidla vzájomne prepojené dutiny, ktoré majú prepojenie s vonkajším prostredím resp. na vzduch v ich okolí. Stupeň pórovitosti závisí od druhu a štruktúry

horniny. U bežných typov hornín je pórovitosť veľmi nízka, v rozsahu niekoľkých percent. V mechanike hornín sa táto veličina používa málo.

Pórovitosť závisí na tvare a rozmeroch zŕn minerálov tvoriacich horninu, na prítomnosti tmelu medzi zrnami a na zhutnení. Rovnozné horniny majú vyššiu pórovitosť, ako horniny s rôznym rozmerom zŕn, u ktorých zrná malých rozmerov vyplnili priestor medzi väčšími zrnami. U hornín s výskytom tmelu medzi zrnami závisí od jeho množstva a samotnej hutnosti. Rozlišujeme úplnú a efektívnu pórovitosť. Úplnú pórovitosť tvoria všetky póry v hornine, uzavreté, aj póry prepojené navzájom i s vonkajším prostredím. Stanovuje sa zo známej mernej a objemovej hmotnosti (vzťah 1). Efektívnu pórovitosť tvoria len póry spojené navzájom a s vonkajším prostredím, schopné prepúšťať kvapaliny a plyny.

Objemové a merné hmotnosti boli prevzaté z príslušnej literatúry buď priamo pre pomery na ložisku Lubeník, alebo pre rovnaké horninové typy z iných rudných resp. nerudných ložísk na Slovensku (tab. 2).

Tab. 2: Pórovitosť

Typ hornín	Objemová hmotnosť ρ_o [t.m ⁻³]	Merná hmotnosť ρ_m [t.m ⁻³]	Pórovitosť n [%]	Pramene
magnezit – pod VII. obzorom	3,0	3,02	0,66	Hatala, J. a kol., 1988
magnezit – nad VII. obzorom	3,0	3,05	1,6	OBÚ SNV – str. 81
grafitické bridlice	2,64	2,80	5,7	OBÚ SNV – str. 103
diabázy	2,81	2,82	0,4	OBÚ SNV – str. 12
vápence	2,96	3,0	1,33	Hatala, J. a kol., 1988
schfilyty	2,53	2,7	6,3	OBÚ SNV – str. 103

Pozn.: schfilyty – sericiticko chloritické fylity

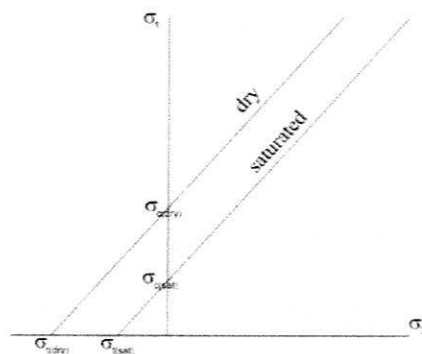
Pri riešení problematiky prúdenia a tečenia kvapalín v podzemí numerickým modelovaním je pórovitosť vstupným parametrom pri výpočtovej schéme založenej na báze efektívnej hustoty. Z tohto dôvodu bolo potrebné podrobnejšie sa venovať aj pórovitosti. Výpočtom stanovené parametre pórovitosti pre dotknuté horninové typy boli následne použité vo výpočtových modeloch (tab. 2). Vyššie uvedené hodnoty pórovitosti korešpondujú s hodnotami pórovitosti pre rovnaké typy hornín uvedenými v zahraničných prameňoch – napr. pre fylity (Ozbek, A. a kol., 2018).

3.2 Mechanické a pretvárne vlastnosti hornín v mokrom stave

Vzostup hladiny podzemnej vody, ktorý je výsledkom prerušenia čerpania banských vôd, je jedným z faktorov, ktoré môžu ovplyvniť dlhodobú stabilitu banských diel a nadložia s negatívnym dopadom na deformácie povrchu terénu ovplyvnenej oblasti. Zmena hydraulického prostredia môže mať veľký vplyv na napäťovo-deformačný stav v masíve ako aj na mechanicko-pretvárne vlastnosti horninového masívu.

Vplyv vody na mechanicko-pretvárne vlastnosti hornín a masívu je možné posudzovať pomocou hodnôt mechanických a pretvárných veličín u jednotlivých hornín, ktoré boli napr. získané pri výskumoch v predchádzajúcom období. Vychádza sa pritom hlavne z hodnôt jednoosového namáhania v tlaku a zníženia týchto hodnôt pri nasýtení hornín vodou.

Zatopenie horninového masívu a jeho vplyv na mechanické vlastnosti sa bežne vyjadruje súčiniteľom zmäknutia K_{ZK} (STN 72 1163), ktorý číselne vyjadruje iba vplyv vody u jednoosovej pevnosti v tlaku. Znamená pomer pevnosti nasiaknutej horniny ku pevnosti vysušenej horniny. Tento koeficient je bezrozmerný.



Obr. 4: Vplyv vody na Coulombovu čiaru pevnosti (Vásárhelyi, B. a kol., 2018)

Hodnoty mechanických vlastností dotknutých horninových typov po nasiaknutí vodou použité v tomto posudku boli oproti tzv. suchým hodnotám znížené pomerne resp. paralelne na základe zahraničných poznatkov z tejto oblasti. Pri Coulombovej teórii sa takýmto spôsobom znížili napr. súdržnosť a ťahová pevnosť (obr. 4).

Podobný prístup bol použitý aj pri znížení pretvárných charakteristík. Pri britských pieskovcoch je napríklad koeficient zmäknutia pre pevnosť v prostom tlaku a koeficient zmäknutia pre modul pružnosti úplne rovnaký. Takýto alebo podobný pomer medzi týmito súčiniteľmi zmäknutia je zrejmy aj pre iné horninové typy (Vásárhelyi, B., 2018).

Základnou úlohou je stanoviť o koľko percent dôjde k zníženiu pevnosti v prostom tlaku pre daný horninový typ (tab. 3) a následne sa takáto hodnota zníženia použila aj pre ďalšie mechanicko – pretvárne parametre.

Tab. 3: Koeficient zmäknutia pre pevnosť v prostom tlaku

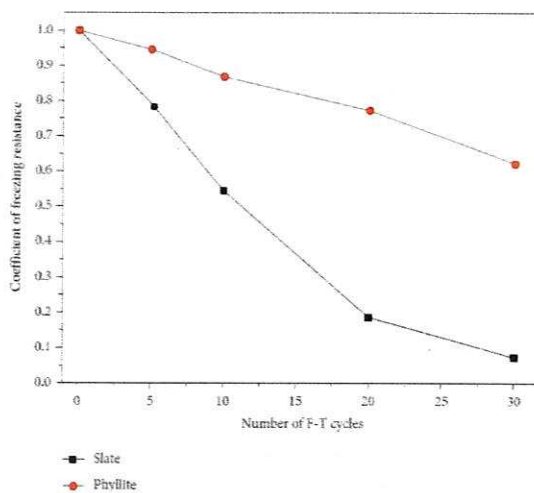
Typ hornín	σ_{dls} [MPa]	σ_{dlw} [MPa]	K_{ZK}	Pramene
magnezit – pod VII. obzorom	179,5	178,1	0,99	Kasim, M. a kol., 1996
magnezit – nad VII. obzorom	-	-	0,94	odhad
grafitické bridlice	58,1	22,2	0,50	Li, Z. a kol., 2020
diabázy	181,6	181,0	0,99	Kasim, M. a kol., 1996
vápence	48,0	28,6	0,66	Rajabzadeh, M., L. a kol., 2012
schfylity	-	-	0,50	odhad

Pozn.: schfylity – sericiticko chloritické fylity; σ_{dls} – pevnosť v prostom tlaku suchá, σ_{dlw} – pevnosť v prostom tlaku po nasiaknutí

Vzhľadom k tomu, že koeficienty zmäknutia pre magnezity nie sú dostupné v domácej ani zahraničnej literatúre, bol tento koeficient nahradený pre pevnostne podobný karbonát – dolomit. Koeficient zmäknutia pre magnezit pod VII. obzorom bol stanovený odhadom.

Koeficient zmäknutia pre sericiticko chloritické fylity bol stanovený odhadom, pretože konkrétne hodnoty tohto súčiniteľa neboli identifikované ani v domácej ani v zahraničnej literatúre. Pri odhade sa vychádzalo z poznatkov, že rozdiel v koeficientoch zmäknutia napr. po 5 zmrazovacích cykloch u bridlíc a fylitov je cca 0,2 (obr. 5). Bridlice vykazujú výrazne nižšiu rezistenciu voči zmrazovacím cyklom v porovnaní s fylitmi (Guopeng, W., a kol., 2023).

Čiže bridlice podliehajú výraznejšej degradácii pevnostných a šmykových parametrov v porovnaní s fylitmi, preto bol koeficient K_{ZK} pre fylity mierne zvýšený v porovnaní s bridlicami (tab. 3).



Obr. 5: Závislosť koeficient zmäknutia-zmrazovacie cykly (Guopeng, W. a kol., 2023)

Ako je vyššie popísané, mechanicko-pretvárne vlastnosti hornín použitých vo výpočtových modeloch sa stanovili vynásobením príslušných parametrov zodpovedajúcimi koeficientami zmäknutia K_{ZK} podľa všeobecného vzťahu:

$$(\text{coh, fri, ten, bulk, shear})_{\text{mokry}} = K_{ZK} * (\text{coh, fri, ten, bulk, shear})_{\text{suchy}} \quad (2)$$

kde coh – súdržnosť (Pa),

fri – uhol vnútorného trenia (°),
ten – ťahová pevnosť (Pa),
Bu (K) – objemový modul (Pa),
She (G) – šmykový modul (Pa).

Vlastnosti pre suchý stav boli prevzaté zo správy pre suchý variant vypracovanej zhotoviteľom v júni 2023. V nasledujúcich tab. 4-8 sú uvedené parametre pre jednotlivé horninové typy, ktoré boli použité vo výpočtoch pre mokrý variant.

Tab. 4: Vlastnosti magnezitov nad VII. obzorom

Typ horniny	Vlastnosti	Suchý variant	K _{ZK} (-)	Mokrý variant
magnezit – nad VII. obz.	coh (Pa)	7e6	0,94	6,6e6
	fri (°)	29		27,3
	ten (Pa)	0,35e6		0,33e6
	Bu (Pa)	16033e6		15071e6
	She (Pa)	8267e6		7771e6

Tab. 5: Vlastnosti magnezitov pod VII. obzorom

Typ horniny	Vlastnosti	Suchý variant	K _{ZK} (-)	Mokrý variant
magnezit – pod VII. obz.	coh (Pa)	12,2e6	0,99	12,1e6
	fri (°)	33		32,7
	ten (Pa)	1,2e6		1,19e6
	Bu (Pa)	37559e6		37183e6
	She (Pa)	20406e6		20202e6

Tab. 6: Vlastnosti bridlic

Typ horniny	Vlastnosti	Suchý variant	K _{ZK} (-)	Mokrý variant
bridlice	coh (Pa)	2e6	0,50	1e6
	fri (°)	18,5		18,5
	ten (Pa)	0,12e6		0,06e6
	Bu (Pa)	496e6		248e6
	She (Pa)	357e6		236e6

Tab. 7: Vlastnosti diabázov

Typ horniny	Vlastnosti	Suchý variant	K _{ZK} (-)	Mokrý variant
diabázy	coh (Pa)	11e6	0,99	10,9e6
	fri (°)	37,6		37,2
	ten (Pa)	0,8e6		0,79e6
	Bu (Pa)	29778e6		29480e6
	She (Pa)	20503e6		20298e6

Tab. 8: Vlastnosti vápencov

Typ horniny	Vlastnosti	Suchý variant	K _{ZK} (-)	Mokrý variant
vápence	coh (Pa)	1,4e6	0,66	0,93e6
	fri (°)	19,3		19,3
	ten (Pa)	0,1e6		0,07e6
	Bu (Pa)	2294e6		1514e6
	She (Pa)	1120e6		740e6

Pre potreby tohto posudku bolo potrebné dodatočne stanoviť parametre sericiticko – chloritických fylitov v suchom stave (obr. 6) s následným prepočtom na podmienky mokrého stavu.

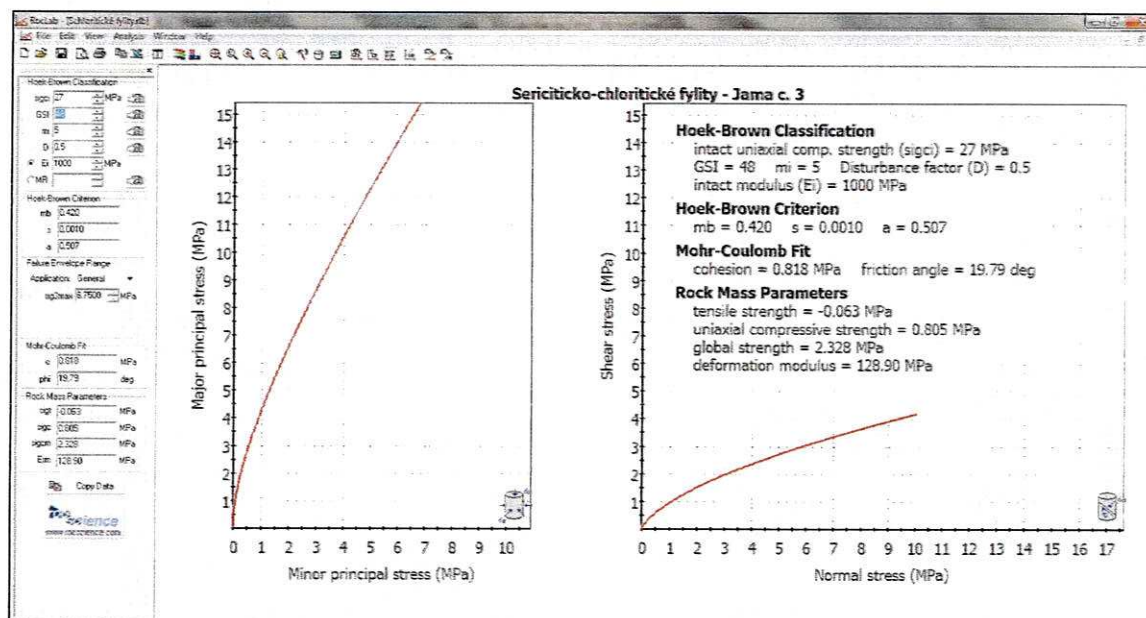
Pre stanovenie vlastností SCHF v suchých podmienkach bol použitý výpočtový systém RocLab, používajúci zatriedenie horninového masívu podľa GSI klasifikácie (Geological Strength Index). Bázovým parametrom pre systém RocLab je jednoosová tlaková pevnosť posudzovaných intaktných hornín (obr. 7).

Tlaková pevnosť vychádzala z nameraných hodnôt SCHF pre podmienky ložiská Mária baňa-Strieborná, ktorých výskum vykonal Zhotoviteľ pre firmu Gemer Can, s.r.o. v roku 2013.

Ďalšie parametre (m_i , D , GSI) vstupujúce do systému RocLab boli stanovené odhadom pomocou zaslanej fotodokumentácie SCHF zo subhorizontálneho vrtu od firmy Tratec.



Obr. 6: SCHF (Tratec, s.r.o., Prešov, 2023)



Obr. 7: Vlastnosti sericiticko chloritických fylitov – suchý stav

Podobne ako pri predchádzajúcich horninových typoch, boli parametre pre sericiticko chloritické fylity po nasiaknutí stanovené podľa rovnice 2 (tab. 9).

Tab. 9: Vlastnosti SCHF

Typ horniny	Vlastnosti	Suchý variant	K_{ZK} (-)	Mokrý variant
SCHF	coh (Pa)	0,8e6	0,50	0,4e6
	fri (°)	19,8		19,8
	ten (Pa)	0,06e6		0,03e6
	Bu (Pa)	119e6		60e6
	She (Pa)	87e6		44e6

4. Posúdenie mokrej likvidácie hlavných banských diel v DP Lubeník numerickým modelovaním

Proces likvidácie banských diel mokrou cestou resp. zatopením musí rešpektovať okrem hľadísk bezpečnosti najmä tieto aspekty:

- minimalizovanie nožnej ekologickej záťaže (včítane monitoringu po ukončení likvidácie),
- revitalizácia územia (včítane rekultivácie terénu a prepadlísk s uplatnením ochranných pásiem pri územnom plánovaní),
- vysporiadanie banských škôd (včítane širších sociálnych dopadov),
- tvorba finančných rezerv formou dlhodobých pôsobiacich ekonomických nástrojov pre nepredvídané následky (včítane ochrany nerastných zdrojov a ich možného využívania v budúcnosti, po prípadnej zmene cien komodít),
- uchovanie všetkého fotografického materiálu o likvidovanom ložisku.

Posúdenie stability podzemných priestorov a prejavov banskej činnosti na povrch sa realizuje na základe poznania napätovo-deformačného stavu horninového masívu v širšom okolí oblasti ovplyvnenie ťažobnou činnosťou. Podľa metódy skúmania môžeme rozdeliť metódy zisťovania napätovo – deformačného stavu horninového masívu do dvoch základných skupín: experimentálne a teoretické.

Riešenie zložitých geotechnických problémov rôzneho charakteru (stabilita svahov a podzemných priestorov, prejavy ťažobnej činnosti na povrch a pod.) sa dnes najčastejšie realizuje geotechnickým matematickým modelovaním, ktoré spadá do teoretickej skupiny metód skúmania napätovo-deformačného stavu.

Všeobecne platná teória vzniku a mechanizmu poklesov pri hlbinnom dobývaní nebola rozpracovaná. Mechanizmus rozrušovania nadložia v prípade úplného nasiaknutia hornín a horninového masívu vodou pri likvidácii bane zatopením preto patrí medzi najzložitejšie úlohy, ktoré v mnohých prípadoch pri súčasnej úrovni poznatkov, sú len veľmi ťažko riešiteľné analytickým spôsobom.

Likvidácia podzemných banských prevádzok mokrou cestou (dobývky, závaly, banské diela) vedie k pohybu horninového masívu a zemského povrchu v dôsledku tlakových zmien v zatopených zónach. Zmeny vyplývajúce zo stúpajúcej hladiny podzemnej vody spôsobené zmenami v napätí a deformácii, ako aj fyzikálno-mechanických vlastností hornín môžu viesť k poškodeniu povrchových stavebných objektov a zmenám prostredia, ako je chemické znečistenie povrchových vôd. To je dôvod, prečo schopnosť predpovedať pohyby horninových masívov vytvorených v dôsledku uzavretia bane zatopením zohráva kľúčovú funkciu vo vzťahu k ochrane povrchu krajiny a budov na ňom prítomných.

V súčasnosti je svetová literatúra prezentujúca metódy predpovedania zdvihu povrchu terénu pri záplavách baní veľmi skromná a obmedzuje sa na tri analytické metódy: Pöttgensovu, Fenkovu a Srokovu metódu. Numerické metódy používané v tejto oblasti sú však obmedzené len na modelovanie javu metódou spätnej analýzy a nepoužívajú sa na prognózovanie.

Meniac sa situácia v globálnej ťažbe surovín a vzťah s likvidáciou početných podzemných uhoľných baní spôsobili nové environmentálne problémy vrátane nebezpečenstva pohybu povrchu terénu vo forme vztlaku. Tomuto fenoménu je vo svetovej literatúre venovaná len marginálna pozornosť.

V posledných rokoch sa niekoľko vedcov pokúsilo použiť numerické metódy na modelovanie pohybov povrchu vplyvom zatopenia banského podzemia. Žiaľ, k dnešnému dňu existuje len veľmi málo publikácií týkajúcich sa numerického modelovania tohto javu, no vzhľadom na meniacu sa energetickú politiku v Európe počet vedcov, ktorí sa zaoberajú touto problematikou, neustále narastá (Dudek, M. a kol., 2020).

Potenciálnym geomechanickým dopadom na banské prostredie vplyvom jeho likvidácie mokrou cestou bola venovaná mála pozornosť (Todd, F. a kol., 2019).

Pokles spôsobený ťažbou sa skúmal už celé desaťročia. Navrhuje sa niekoľko prístupov, ako napríklad empirické metódy (vrátane grafickej metódy a metódy profilovej funkcie), metódy ovplyvňujúcej funkcie a fyzikálne modely. S neustálym vývojom výpočtového hardvéru a softvéru sa

v posledných rokoch na predikciu a analýzu poklesu aplikujú numerické simulačné techniky. Najmä v posledných rokoch sa čoraz väčšia pozornosť venuje zdvihu zemského povrchu vyvolaného zatopením opustených baní. Nedávne publikácie ukazujú prvé aplikácie numerických nástrojov na simuláciu zdvihu (Zhao, J. a kol., 2021).

Vyššie uvedené citácie dokumentujú súčasný stav v oblasti riešenia problematiky dopadov mokrej likvidácie hlbinných baní na povrch terénu a riziká spojené s touto činnosťou numerickým modelovaním.

4.1 Všeobecné aspekty prognózy stability vydobytých priestorov s dopadom na povrch

Pri hľadaní východísk a spracovaní tohto posudku bola snaha o sformulovanie hypotézy o zákonitostiach a mechanizme zavalovania a poklesov pri zatápaní ložiska. Vychádzalo sa pritom hlavne z týchto pozícií :

- predpokladá sa, že stabilita dobývacieho priestoru ako celku po zatopení bude závisieť od zmeny fyzikálno-mechanických vlastností hornín pilierového systému podmienenej účinkami pôsobenia banskej vody na horniny reagentné na vodu, s dopadom na zmenu napäťovo-deformačného stavu dotknutého územia,
- predpokladá sa, že stabilita dobývacieho priestoru po zatopení bude závisieť od veľkosti, tvaru a usporiadania (hlavne vo vertikálnom smere) dobývok i banských chodieb,
- predpokladá sa, že stabilita dobývacieho priestoru po zatopení bude ohrozená v oblasti výskytu štruktúrno-tektonických prvkov.

Na hlbšie poznanie niektorých vplyvov narušujúcich stabilitu masívu pri postupnom zatápaní bane sa použilo geotechnické numerické modelovanie.

Pričom základná hypotéza, z ktorej sa vychádzalo možno uviesť nasledovne: **overiť vplyv zmien vlastností hornín v procese zatápania na zmenu geostatického tlaku, od veľkosti ktorého závisí zaťaženie existujúceho skeletu dobývacieho priestoru.**

Vzhľadom na časovú a vecnú náročnosť sa numerickým modelovaním neriešila problematika vplyvu štruktúrno-tektonického zoslabenia masívu na napäťovo-deformačný stav záujmovej oblasti.

Pre riešenie tohto čiastkového problému by bolo potrebné mať k dispozícii vlastnosti tektonických línií v suchom stave a po nasiaknutí vodou.

Základným predpokladom posúdenia dosahu mokrej likvidácie bane Lubeník na povrch a pilierový systém dobývok je stanovenie veľkosti napätí a deformácií v okolí vyrúbaných resp. voľných priestorov vo vzťahu k pevnostno-pretvárnej charakteristike hornín v ložisku a na kontakte s ložiskom.

Práce a metodiky, ktoré by posudzovali horninový masív z hľadiska prenikania vody do jeho okolia sú ojedinelé. Najčastejšie sa v nich zdôrazňuje úloha drobnej tektoniky z hľadiska priestorovej orientácie i početnosti a kvality tektonických prvkov. V týchto súvislostiach je potrebné uviesť, že ani v použitých matematických modeloch sa priamo parametre drobnej tektoniky nevyskytujú. Nepriamo do určitej miery, sú zhrnuté v ostatných uvažovaných charakteristikách masívu (cez redukčné súčinitele kódu RocLab).

4.2 Numerické simulačné schémy pri mokrej likvidácii v programe Flac3D

Geotechnická prognóza vplyvu zatopenia banského podzemia v DP Lubeník na podzemné priestory a povrch numerickým modelovaním sa dá realizovať rôznymi spôsobmi. Použitý softvér umožňuje použiť pre danú problematiku rôzny prístup.

Modelovanie zatopenia podzemia sa dá realizovať týmito simulačnými schémami (Zhao, J. a kol., 2021):

1) *Full coupling (plné prepojenie resp. väzba)*

Pri riešení sa používa tzv. fluid-flow model v kombinácii s mechanickým modelom. Mechanická a hydraulická simulácia prebiehajú paralelne, dochádza k ich vzájomnému ovplyvňovaniu. Ide o plnú mechanicko-hydraulickú analýzu, ktorej nevýhodou je náročnosť hlavne na hydraulické vstupy modelovaných horninových polôh (napr. Biot modulus, Biot koeficient, súčiniteľ permeability a pod.). Je to z časového a hardwarového hľadiska najnáročnejšia alternatíva.

2) *Partial coupling (paralelné prepojenie resp. väzba)*

Mechanická a hydraulická simulácia prebiehajú súbežne, ide o tzv. dvojstupňovú väzbu. Hydraulické komponenty ovplyvňujú mechanickú odozvu, k ovplyvňovaniu v opačnom smere nedochádza. Kvôli úspore strojového času, je prepojenie mechanickej a hydraulickej väzby vzťahované len na konečnú úroveň hladiny podzemnej vody.

3) *Effective density (efektívna hustota)*

Ide o čisto mechanickú simuláciu s využitím pôsobenia podzemnej vody vo forme pórových tlakov. Rozlišuje sa hustota hornín nad a pod hladinou podzemnej vody. V tejto schéme sa neberú do úvahy zmeny prietoku tekutiny a pórového tlaku.

4) *Effective stress (efektívne napätia)*

Ide o čisto mechanickú simuláciu s využitím pôsobenia podzemnej vody vo forme pórových tlakov. Rozlišuje sa hustota hornín nad a pod hladinou podzemnej vody. Metóda efektívnych napätí je založená na Terzaghiho teórii, podľa ktorej je $\sigma_{ef} = \sigma_{tot} - p$ (efektívne napätie = totálne napätie – pórový tlak).

Pokiaľ je potrebné analyzovať tok vody resp. prestup kvapaliny v horninovom masíve, rozptyl pórových tlakov, konsolidáciu saturovaných zemín apod., vtedy je potrebné použiť simulačnú schému na báze plnej väzby.

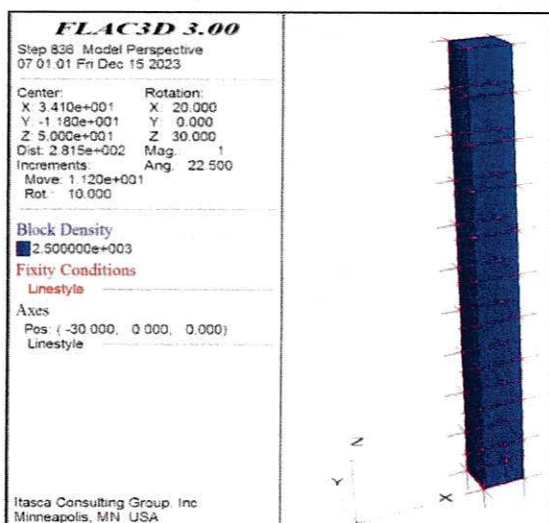
4.3 Verifikácia numerickej simulácie

Účelom tejto podkapitoly je overiť presnosť riešenia numerickej simulácie pomocou kódu Flac3D v porovnaní s analytickým riešením pri mechanickej a hydraulickej analýze. Táto verifikácia je demonštrovaná na stĺpci hornín o výške 100 m s veľkosťou subzón 10 m (obr. 8).

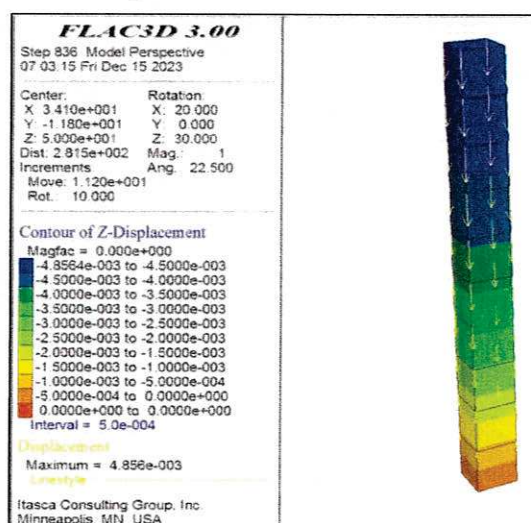
4.3.1 Suchý model

Pri riešení je použitý elastický model s fixáciou vo forme tzv. tuhej vane (pohyb na spodnom okraji modelu je fixovaný, po stranách modelu je v zvislom smere pohyb umožnený, do bokov fixovaný) (obr. 8). Gravitačný model je zadefinovaný týmito mechanickými parametrami:

- modul pružnosti $E = 19,6$ GPa,
- Poissonovo číslo $\nu = 0,29$,
- objemový modul $K = 15,6$ GPa,
- šmykový modul $G = 7,6$ GPa
- objemová hmotnosť v suchom stave $\rho_0 = 2\,500$ kg.m⁻³.



Obr. 8: Model horninového stĺpca



Obr. 9: Priebeh z-deformácií (m)

Obr. 8 dokumentuje použitie horninového typu o objemovej hmotnosti $\rho_o = 2500 \text{ kg.m}^{-3}$. Numerickým modelom vypočítané vertikálne z-deformácie dosahujú maximum o veľkosti cca $4,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$, čo je 4,9 mm. Vektor z-deformácií smeruje v smere gravitácie – v smere osi z (obr. 9).

Pri analytickom riešení deformácie horninového stĺpca sa postupuje podľa tohto vzťahu:

$$\Delta \sigma_{zz} + \alpha \Delta p = (K + 4G/3) \Delta \varepsilon_{zz} \quad (3)$$

kde $\Delta \sigma_{zz}$ - prírastok vertikálneho napätia, $\Delta \varepsilon_{zz}$ - prírastok vertikálneho pretvorenia, α – Biot koeficient, Δp – prírastok pórového tlaku, K – objemový modul, G – šmykový modul.

Pri suchom modeli je prírastok pórového tlaku $\Delta p = 0$, rovnicu (3) potom môžeme napísať v tvare:

$$-\rho_o g (H_m - Z) = (K + 4G/3) \frac{du}{dZ} \quad (4)$$

kde H_m – výška modelu,

Z – úroveň pozície výpočtu deformácie horninového stĺpca.

Integráciou rovnice (4) a jej úpravou získame vzťah pre výpočet deformácie :

$$u = - \frac{\rho_o g}{K + 4G/3} \times (H_m - \frac{Z}{2}) Z \quad (5)$$

Pri výpočte deformácie v zvislom smere na hornom okraji modelu platí, že $Z = H_m$, následnou úpravou vzťahu (5) dostaneme

$$u_{vrch} = - \frac{\rho_o g H_m^2}{2(K + 4G/3)} \quad (6)$$

Použitím vzťahu (6) a vyššie uvedených parametrov je deformácia povrchu horninového stĺpca $u_{vrch} = 4,9 \text{ mm}$.

Výsledky analytického riešenia a numerického modelu sú v zhode. Znamienko – v rovnici (6) reprezentuje smer pôsobiacich deformácií.

4.3.2 Mokrá model

Podobne ako pri suchom modeli je použitý elastický model s fixáciou vo forme tzv. tuhej vane (pohyb na spodnom okraji modelu je fixovaný, po stranách modelu je v zvislom smere pohyb umožnený, do bokov fixovaný) (obr. 8). Gravitačný model je zadefinovaný týmito mechanickými a fyzikálnymi parametrami:

- modul pružnosti $E = 19,6 \text{ GPa}$,
- Poissonovo číslo $\nu = 0,29$,
- objemový modul $K = 15,6 \text{ GPa}$,
- šmykový modul $G = 7,6 \text{ GPa}$,
- objemová hmotnosť v suchom stave $\rho_o = 2\,500 \text{ kg.m}^{-3}$,
- pórovitosť $n = 0,12$,
- Biot koeficient $\alpha = 1$.

Rovnica (3) pri hodnote Biotického súčiniteľa $\alpha = 1$ zohľadňuje pôsobenie pórového tlaku, a vyjadruje vzťah medzi napätím a pórovým tlakom voči pretvoreniu podľa nasledujúcej rovnice:

$$\Delta\sigma_{zz} + \Delta p = (K + 4G/3) \frac{du}{dZ} \quad (7)$$

Pokiaľ pozícia vo vertikálnom smere na stanovenie zvislej deformácie Z verifikačného modelu variuje medzi 0 a aktuálnou výškou H_w , rovnica (7) prechádza do tvaru:

$$-n\rho_w g(H_w - Z) + \rho_w g(H_w - Z) = (K + 4G/3) \frac{du}{dZ} \quad (8),$$

$$0 < Z < H_w$$

kde H_w je aktuálnou výškou vodnej hladiny.

Po integrácii vzťahu (8) má rovnica na výpočet vertikálnej deformácie nasledujúci vzťah:

$$u = \frac{(1-n)\rho_w g}{K + 4G/3} \left(H_w - \frac{Z}{2}\right)Z, \quad 0 < Z < H_w \quad (9)$$

Pokiaľ sa z – ová súradnica pohybuje v intervale $H_w < Z < H_m$, vzťah (9) prechádza do tvaru:

$$u = \frac{(1-n)\rho_w g H_w^2}{2(K + 4G/3)} \quad (10)$$

Pre plne saturovaný model platí, že $H_w = H_m$, vertikálna deformácia na vrchu modelu sa potom stanoví podľa vzťahu:

$$u_{vrch} = \frac{(1-n)\rho_w g H_w^2}{2(K + 4G/3)} = \frac{(1-n)\rho_w g H_m^2}{2(K + 4G/3)} \quad (11)$$

Použitím parametrov uvedených na začiatku podkapitoly 4.3.2 je analytickým spôsobom vypočítaná hodnota deformácie vrchu modelu podľa vzťahu 11 pre plne saturovaný horninový stĺpec $u_{vrch} = 1,7$ mm. Deformácia pôsobí opačným smerom ako pri analytickom riešení pre suchý model, čiže jej smer je proti smeru gravitácie.

Aplikáciou komplexnej mechanicko – hydraulickej analýzy numerickým modelovaním je možné stanoviť vertikálne deformácie v ľubovoľnej výške modelu.

Výslednú z -deformáciu povrchu modelu je možné stanoviť aj použitím tzv. nepriamej metódy simulačnej metódy pracujúcej napr. na princípe efektívnej hustoty.

Tento spôsob verifikácie analytického a modelovacieho prístupu bol zvolený z dôvodu, že princíp stanovenia dopadov pretvorenia povrchu terénu vplyvom mokrej likvidácie banskej prevádzky na uhoľnom ložisku v podmienkach Poľska použili riešitelia medzinárodného projektu RFCS-CT-2015-00004 (Dudek, M. a kol., 2020).

Simulačná schéma na báze efektívnej hustoty so zohľadnením vztlaku kvapaliny počíta s plne saturovanou horninou podľa vzťahu $\rho_{sat} - \rho_w$, čo znamená, že hustota horniny pod vodnou hladinou sa mení na $\rho_s - (1-n)\rho_w$, pretože $\rho_{sat} - \rho_w = (\rho_s + n\rho_w) - \rho_w$, kde ρ_{sat} je objemová hmotnosť nasiaknutej horniny. Podľa Archimedovho zákona vztlaková sila na jednotku objemu horniny (V_{hor}) je:

$$\rho_w g V_{def} = \rho_w g (1-n) V_{hor} \quad (12)$$

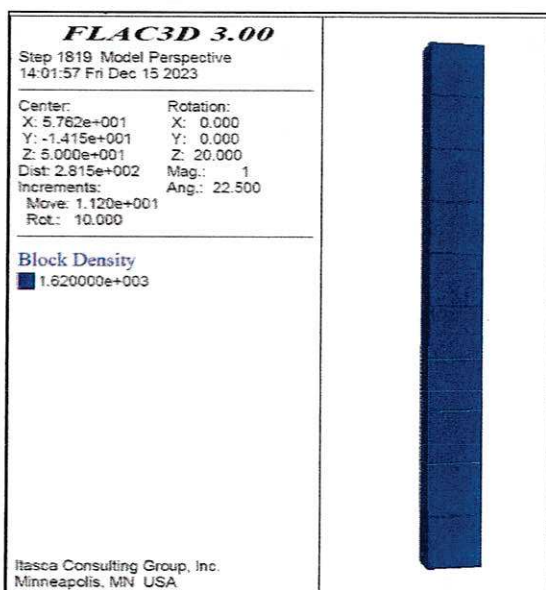
kde V_{def} je objem vytlačenej vody.

Celková sila je $(\rho_s - g - \rho_w g(1-n))V_{hor}$, čo znamená efektívnu hustotu $\rho_s - (1-n)\rho_w$ pre horninu pod hladinou podzemnej vody.

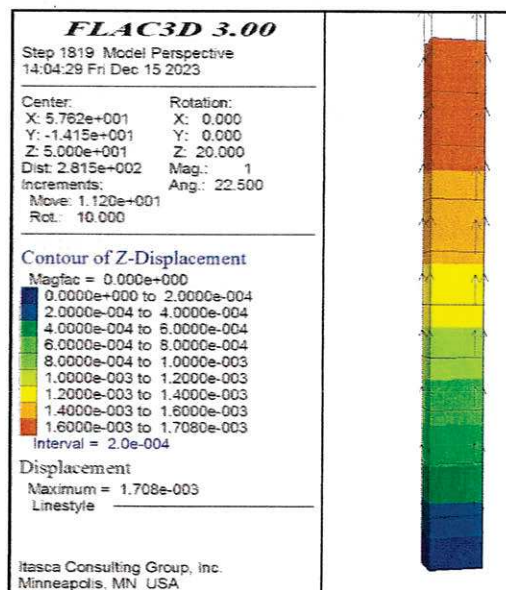
Pre riešený príklad horninového stĺpca v tejto podkapitole je efektívna hustota horniny pod hladinou podzemnej vody (obr. 10):

$$2500 - (1 - 0,12) \times 1000 = 1620 \text{ kg/m}^3 \quad (13)$$

V tejto simulačnej schéme sa neberú do úvahy zmeny prietoku tekutiny a pórového tlaku, ale vypočítaný vzostup povrchu modelu je rovnaký, ako pri použití komplexnej mechanicko – hydraulickej väzby (Zhao, J. a kol., 2021).



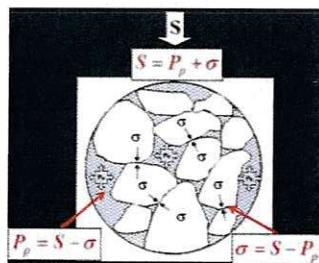
Obr. 10: Objemová hmotnosť horniny nadľahčovanej vodou



Obr. 11: Deformácie modelu v zvislom smere (m)

Vplyvom použitia postupu efektívnej hustoty pre horninový stĺpec je maximálna deformácia vo vertikálnom smere o veľkosti 1,7 mm. Deformácie pôsobia proti smeru gravitácie, na numerický model pôsobí vztlak podľa Archimedovej teórie, čo vyvoláva zdvih povrchu modelu (obr. 11). Tieto poznatky sú v zhode s výsledkom analytického riešenia.

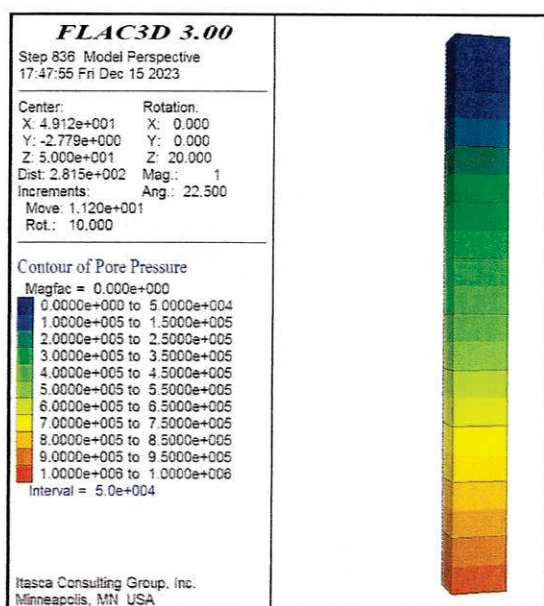
Z hľadiska napätového stavu sa pri metóde efektívnej hustoty uplatňuje aj princíp efektívnych napätí podľa Terzaghiho teórie (obr. 12 – 15).



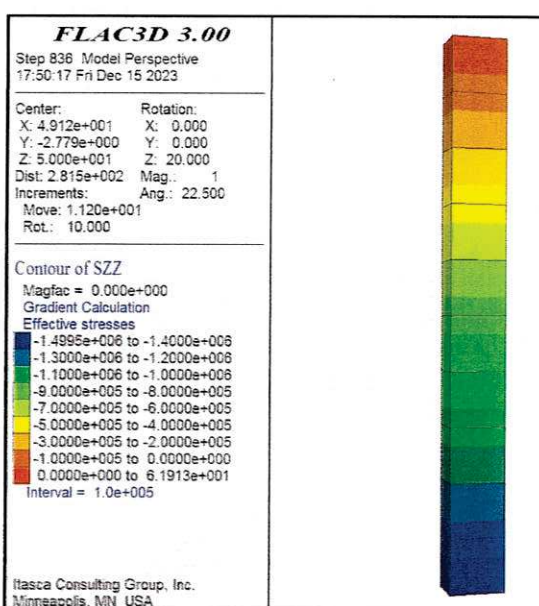
Obr. 12: Efektívne napätia podľa Terzaghiho (Velázquez-Cruz, D., a kol., 2017)

Napätie v nadloží (S) je súčtom pórových tlakov (P_p) a efektívnych napätí (σ) (obr. 12). Pri normálovom napätí sa voda, ktorá vyplňa dutiny v zeminách resp. horninách podieľa na prenose

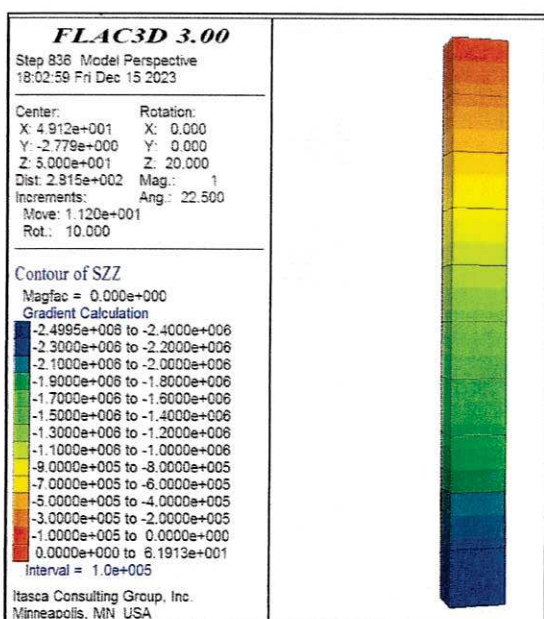
zaťaženia napr. vo forme tiaže nadložia. Pri šmykovom namáhaní voda neprenáša tento druh zaťaženia, ktoré sprostredkúva len pevná fáza horniny. Ide o kontaktné resp. efektívne napätie, ktoré má význam hlavne pri súdržných typoch zemín.



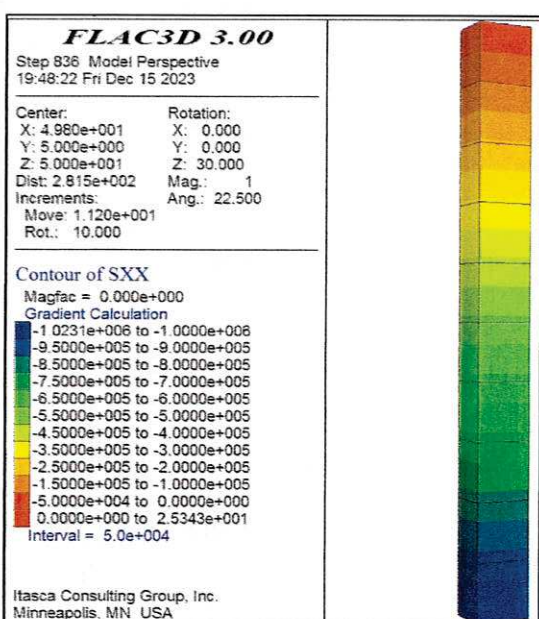
Obr. 13: Priebeh pórových tlakov (Pa)



Obr. 14: Efektívne napätia (Pa)



Obr. 15: Totálne napätia (Pa)



Obr. 16: Totálne napätia v bočnom smere S_{xx}

Pórové tlaky sa postupne zvyšujú z nulovej hodnoty na úrovni povrchu horninového stĺpca na hodnotu 1 MPa na úrovni spodku modelu pri jeho 100 m výške (obr. 13). Pozitívne hodnoty pórových tlakov reprezentujú v kóde Flac3D tlakové napätia.

Veľkosť celkových totálnych napätí v zvislom smere z približne nulovej hodnoty na povrchu narastajú na hodnotu cca 2.5 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 15). Negatívne hodnoty napätí v rámci medzinárodného uzrovnenia znamenajú tlakové napätia.

Efektívne napätia podobne ako totálne napätia narastajú z nulových hodnôt na povrchu modelu na hodnotu cca 1,5 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 14). Negatívne napätia sú tlakovými napätiami aj v prípade efektívnych napätí. Vzhľadom na opačné značenie klasických tlakových napätí (-) voči opačnému značeniu pórových tlakov (+) v kóde Flac3D sú potom hodnoty:

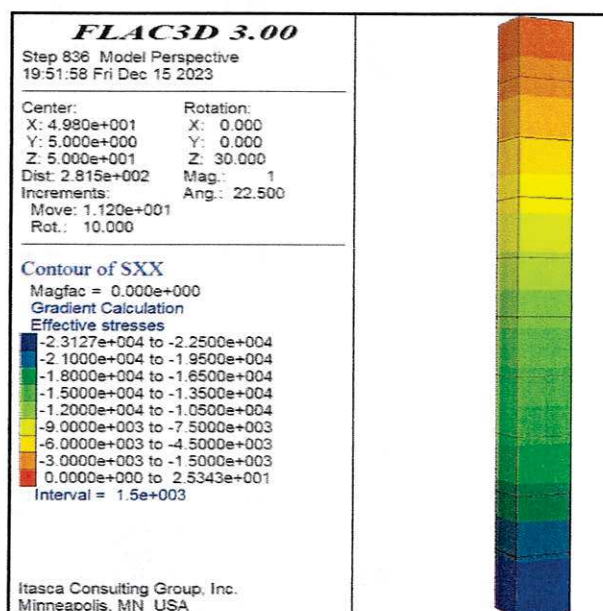
$$\text{efektívnych napätí } \sigma' = \text{totálne napätia } \sigma + \text{pórové tlaky } p \quad (14),$$

v početnom vyjadrení:

$$-1,5 \text{ MPa} = -2,5 \text{ MPa} + 1 \text{ MPa}$$

Vzhľadom na znamienkovú konvenciu používanú v kóde Flac3D, je vyjadrenie efektívnych napätí odlišné (rovnica 14), od všeobecne zaužívaného značenia (obr. 12).

Maximálne hodnoty totálnych bočných napätí v smere osi x - S_{xx} na spodnom okraji modelu sú na úrovni -1,02 MPa (obr. 16). Maxima efektívnych hodnôt bočných napätí v smere S_{xx} sú na úrovni -0,023 MPa (obr. 17).



Obr. 17: Efektívne napätia v smere osi x

Prevedené porovnanie v podkap. 4.3 preukázalo, že pri riešení problematiky dopadov mokrej likvidácie bane Lubeník na povrch terénu je možné použiť tzv. nepriamu metódu numerického geotechnického modelovania založenej na simulačnej schéme efektívnej hustoty.

Vyššie prezentované výsledky analytického a numerického výpočtu má obmedzenie vo forme použitia elastického materiálovo-konštitučného modelu horninového prostredia. Pri tomto type modelu nie je možné previesť analýzu stavu stability jednotlivých zón tvoriacich model ani formou implementovanej funkcie „Block State“ ani pomocou stupňa bezpečnosti „FoS“. Riešenia na báze elastického prístupu, použité aj v prácach Dudek, M. a kol., 2020, Todd, F. a kol., 2019, sú zamerané len na deformačný prejav vplyvov zatápania banského podzemia na povrch.

Ďalším typickým znakom vyššie citovaných prác, ale aj prác iných autorov (napr. Luo, Y., 2021; Wesolowski, M., 2012; Vervoort, A. a kol., 2017; Dudek, M. a kol., 2022) je to, že riešenia sa sústreďujú na problematiku mokrej likvidácie čiernouhoľných ložísk.

Pre okruh rudných alebo nerudných ložísk so stredne pevnými, vysokými až veľmi vysokými pevnosťami ložiskovej výplne a sprievodných hornín z oblasti problematiky mokrej likvidácie sú vedecké práce resp. výskumné projekty výnimočné.

5. Tvorba 3D modelu a pre-processing

Posúdenie stability podzemných priestorov a prejavov banskej činnosti na povrch sa realizuje na základe poznania napäťovo-deformačného stavu horninového masívu v širšom okolí - oblasti ovplyvnenej ťažobnou činnosťou.

Matematický model je delený sieťou konečných priestorových elementov tak, aby v maximálnej miere vystihovali kontúry kontaktov pevnostne a deformačne odlišných typov hornín. Po vytvorení siete konečných elementov ako vstupné údaje sa zadávajú objemové hmotnosti modelovaných horninových typov, ich moduly deformácie a šmykové pevnosti. Pre vydobyť resp. voľnú plochu sa zadávajú nulové hodnoty týchto parametrov, tzv. null model resp. delete model. Výsledkom riešenia je stanovenie veľkosti napätí v ťažisku každého prvku a veľkosť posunutí vo všetkých vrchoch prvku.

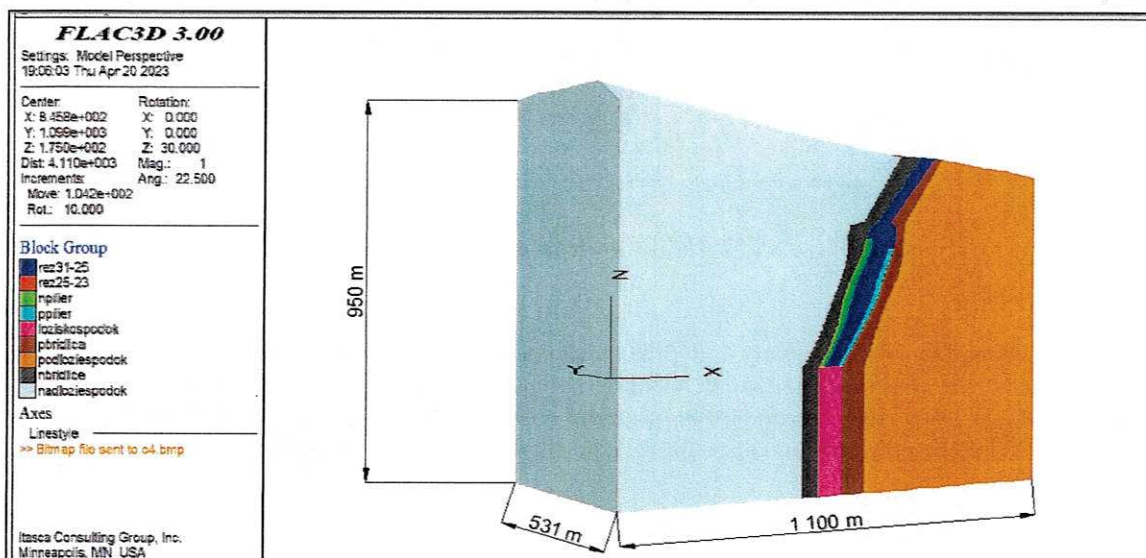
Presnosť výsledkov matematického modelovania závisí aj od tvaru a veľkosti priestorových elementov, z ktorých sa model skladá, od tzv. meshingu. Najpresnejšie riešenia sa dosahujú pri hexaedrických sieťach s približne rovnakou veľkosťou použitých zón. Takýto typ siete bol použitý pri konštruovaní výpočtového modelu.

5.1 Geotechnické vlastnosti horninového prostredia vstupujúceho do modelu

Fyzikálno-mechanické a pretvárne vlastnosti horninových typov použitých vo výpočtových modeloch ovplyvnených vodou (po nasiaknutí) vychádzali z parametrov v suchom stave (Vavrek, P., Vavreková, I., 2023). Podrobnosti k tejto problematike sú riešené v kap. 3.

5.2 Definovanie matematického modelu horninového prostredia

Pri likvidácii banského podzemia v DP Lubeník mokrou cestou bol použitý numerický geotechnický model z tzv. suchého variantu (obr. 18) z júna 2023 (Vavrek, P., Vavreková, I., 2023).



Obr. 18: Rozmery modelu a skupiny zón použitých v modeli

Vyššie prezentovaný primárny resp. plný model, použitý v tomto posudku, pozostáva z cca 247 000 zón typu hexaéder (šesťsten), ktoré sú tvorené cca 260 000 gridpointmi (vrcholovými bodmi hexaédrov). Prostredie Flac3D nepoužíva pri tvorbe siete grafický mód ale špeciálne príkazy na tvorbu príslušných typov priestorových zón, z ktorých sa model vyskladá.

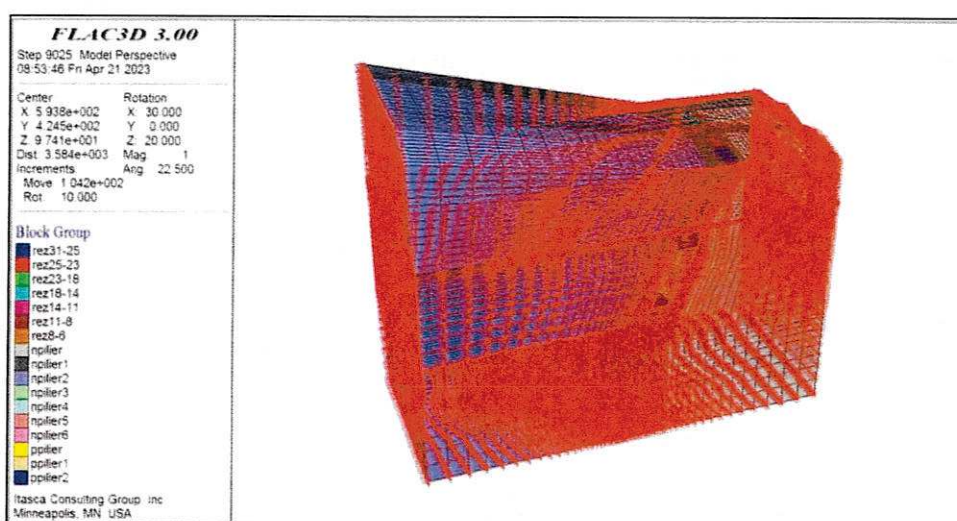
Pri tvorbe 3D modelu sa z priečných rezov ložiska Lubeník 31-31', 25-25', 23-23', 18-18', 14-14', 11-11', 8-8' a 6-6' postupne konštruovala ložisková poloha. Digitalizované priečne rezy boli spracované v grafickom prostredí, následne boli prekonvertované do prostredia MIDAS GTS, v ktorom sa v čiastkových horizontálnych rezoch vo vertikálnej vzdialenosti 30 m zisťovali priestorové súradnice prieniku horizontálnej roviny s požadovanými obrysami geologických rozhraní (napr. obrys ložiska, obrys podložných a nadložných bridlíc a pod.).

5.3 Okrajové podmienky geometrické, deformačné a napät'ové

Okrajové podmienky použité v tomto posudku sú rovnaké ako pri suchom variante. Matematický model je zostrojený tak, aby čo najvierohodnejšie zachytil modelovanú situáciu t.j. priestorový tvar a polohu dobývok voči terénu, systém ochranných pilierov, usporiadanie dobývok. Veľkosť celého modelu bola zvolená tak, aby okrajové podmienky čo najmenej ovplyvňovali modelovanú záujmovú oblasť a zároveň sa minimalizovali požiadavky na časovú náročnosť jednotlivých modelovaných variantov.

Model bez vydobytých priestorov a kráterov po banskej činnosti tzv. plný model bol následne upravený tak, aby čo najvierohodnejšie zachytil situáciu po ťažobnej činnosti na jednotlivých obzoroch. Pre vytváranie voľných priestorov sa v prostredí Flac3D používa tzv. null model na okraji ktorého nepôsobia gravitačné sily.

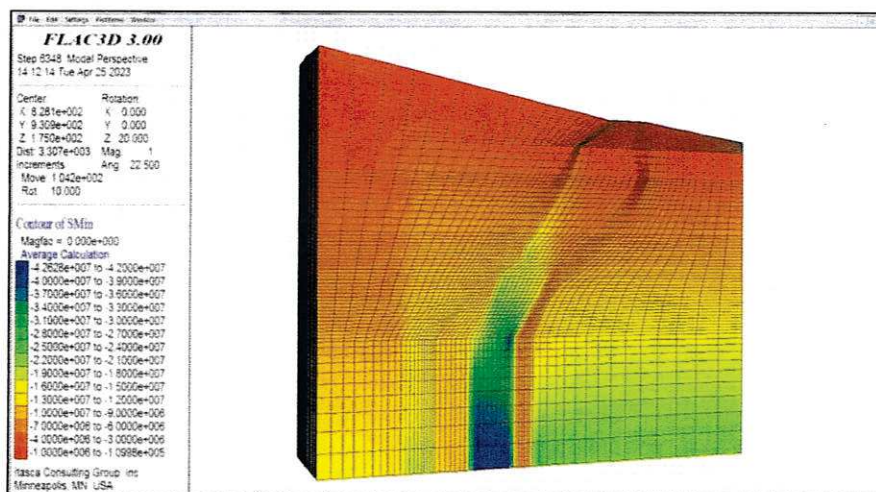
Podobne ako v suchom modeli boli aj v mokrom variante použité deformačné okrajové podmienky vo forme tuhej vane (obr. 19).



Obr. 19: Fixácia modelu – tuhá vaňa

Na základe úložných pomerov a definície matematického modelu boli stanovené zložky tenzora primárneho stavu napätí klasickým výpočtom, t.j. použitím gravitačného modelu. Najideálnejším spôsobom stanovenia jednotlivých zložiek tenzora inicializačných napätí by boli merania in situ, resp. použitie výsledkov z takýchto meraní realizovaných v predchádzajúcom období.

Na spodnom okraji modelu pôsobia napätia v zvislom smere o veľkosti cca 43,0 MPa. Maximálne hodnoty sa sústreďujú do oblasti ložiskovej polohy. Na úrovni X. obzoru dosahujú maximum hodnoty cca 38 - 40 MPa. Na povrchu terénu pôsobiace napätia v zvislom smere dosahujú hodnoty blízke nule (obr. 20).



Obr. 20: Priebeh inicializačných maximálnych hlavných napätí S_{min}

V grafických výstupoch pri použití softvéru sú sledované veličiny napr. napätia, deformácie, pórové tlaky, teploty a pod. uvádzané v exponenciálnom tvare tzv. vedeckom E- zápise. Jednotky s ktorými pracuje program Flac3D sú základné jednotky sústavy SI (napr. Pa, m, °C).

Podľa všeobecnej konvencie sa pri numerickom modelovaní maximálne hodnoty hlavných napätí označujú skratkou S_{min} , minimálne hodnoty hlavných napätí sa označujú skratkou S_{max} .

Na obr. 20 - tmavomodrej farbe t.j. veľkosti maximálnej hodnoty hlavných napätí (S_{min}) pôsobiacich na spodku modelu zodpovedá hodnota $-4.2628e7$ Pa čo je 42,628 MPa. Tak ako je bežné v mechanike hornín, znamienko mínus pri napätiach znamená pôsobenie tlakového zaťaženia, znamienko plus pôsobenie ťahové napätia.

Pri deformáciách znamienko pri výsledných hodnotách reprezentuje smer pôsobiacich deformácií. Mínusové hodnoty predstavujú deformácie pôsobiace v smere gravitácie t.j. do výrubu, kladné hodnoty deformácie pôsobiace proti smeru gravitácie t.j. z výrubu.

Pri výpočtoch boli použité bočné inicializačné napätia, ktorých veľkosť bola vypočítaná podľa zvoleného Poissonovho čísla μ pre jednotlivé typy modelovaných hornín.

6. Processing a postprocessing

Základným predpokladom posúdenia stability horninového masívu, dobývok a povrchu ovplyvneného banskou činnosťou je stanovenie veľkosti napätí a deformácií v okolí vyrúbaných resp. voľných priestorov vo vzťahu k pevnostno-pretvárnej charakteristike hornín, hlavne na kontakte s ložiskom.

Numerické modelovanie môže poskytnúť súhrnné poznatky o priebehu pretvárania horninového masívu v závislosti na vývoji zmien napätí, a to spravidla v každom mieste modelovaného profilu. Využitie metód numerického modelovania pri vyhodnocovaní napäťovo-deformačných zmien horninového masívu je v súčasnosti najviac používanou technikou. V geotechnickej praxi však nie je možné pristúpiť k jeho nasadeniu bez hlbšieho rozboru. Výsledky numerického modelovania totiž závisia na celej rade činiteľov, ktorých voľba závisí výlučne na spracovateľovi riešenia. To platí pre každú zo štyroch základných zložiek numerického modelu horninového prostredia. Týmito zložkami sú:

- základné fyzikálne rovnice, ktoré nezávisia na druhu a vlastnostiach materiálu (napr. zákon o zachovaní hmotnosti, hybnosti, energie a pod.),
- konštitučný vzťah popisujúci matematicky závislosť medzi pretvorením, súvisiacim napätím a stavovými veličinami horniny,
- okrajové geometrické a počiatočné napäťové podmienky,
- sústava rovníc, ktorých prostredníctvom sa realizuje vlastné matematické riešenie.

Správna funkcia každej z týchto zložiek podmieňuje úspešnosť použitia celého numerického modelu. Jadrom numerického modelu sú konštitučné vzťahy. Je to tá časť numerického modelu, ktorá prostredníctvom istej funkcie popisuje obecnú závislosť pretvorenia ideálnej látky na tenzore napätí. Skutočné chovanie posudzovaného horninového masívu sa pri modelovaní nahradzuje približným konštitučným vzťahom takej ideálnej látky, ktorá umožňuje pre danú postupnosť zmien zaťažovacích stavov najlepšiu predpoveď jeho skutočného pretvárania.

Pre modelovanie pretvárania horninového masívu sú k dispozícii rôzne konštitučné vzťahy. K najvýznamnejším patria elasticko-lineárne, elasticko-multilineárne, hyperbolické, elasticko-plastické a hypoplastické vzťahy. Každý z týchto materiálovo-konštitučných vzťahov má svoje výhody aj nevýhody. Chovanie hornín najvernejšie modelujú elasticko-plastické konštitučné vzťahy, a to i v úsekoch pred zahájením progresívneho porušovania vedúceho k strate stability.

Likvidácia banskej prevádzky zatopením je sprevádzaná zmenou obsahu vody v horninovom masíve v dôsledku postupného zaplavovania podzemných priestorov v dôsledku ukončenia črpacej prevádzky. Počas zatápania sa môžu vyvinúť rôzne javy: indukovaná seizmicita, terénna nestabilita (obmedzený zdvih, kontinuálne alebo diskontinuálne poklesy), chemická degradácia vody.

Vplyv vody na banské diela a vydobyté priestory je ťažké vyhodnotiť, pretože existujú hodnoverné argumenty pre priaznivé aj škodlivé účinky. Rovnováha týchto účinkov určuje, či je mokrá likvidácia v danom stave stabilizujúca alebo škodlivá (napr. podľa povahy zatopených hornín, ťažobných metód).

Pri mokrej likvidácii je potrebné rozlíšiť obdobie zatápania, pri ktorom vznikajú dynamické efekty a stabilizačné obdobie, kedy sa narušená hlavne napäťovo – deformačná rovnováha v podzemí stabilizuje (statický efekt).

Odborníci v oblasti mechaniky hornín vplyv vody na stabilitu podzemných priestorov posudzujú hlavne z hľadiska (Mine closure, 2008):

Modifikácie pevnosti hornín a masívu ovplyvnených vodou

Geomateriály majú vyššiu pevnosť, keď sú suché ako keď sú mokré. Tento pokles pevnosti pre citlivé horniny môže presiahnuť až 50 % (Hamrol, A., 1961). Tento fyzikálny „hydratačný efekt“ súvisí s účinkom tlaku vody v póroch. Horniny citlivé na vodu môžu stratiť polovicu svojej pevnosti z úplne suchého stavu do úplne nasýteného stavu.

Horninový masív je často ešte pred zatopením takmer nasýtený (cca 80 % obsah vlhkosti), pretože voda aj pri aktívnej banskej prevádzke cirkuluje okolo podzemných priestorov. Zníženie pevnosti z vlhkej horniny na úplne nasýtenú horninu (100 %) predstavuje cca 20 %, čo je oveľa menej

významné ako zníženie pevnosti zo suchej (0 %) na nasýtenú (100 %), podľa metodík na stanovenie koeficientov zmäknutia.

Dá sa teda usúdiť, že voda prirodzene prítomná v skalných útvaroch už pravdepodobne výrazne znížila pevnosť horniny a proces zatápania bude často vytvárať iba malé dodatočné efekty zo zatopenia podzemia (Hawkins, A.B. a kol. 1992).

Niektoré typy hornín, s obsahom ílových minerálov (illit, kaolinit, montmorillonit) chemicky alebo fyzikálne reagujú s vodou a napučiaavajú alebo sa rozpadávajú.

V podzemí sa môžu vyskytnúť oblasti, kde sú banské diela väčšinou necitlivé na vodu a iné oblasti napr. so štruktúrami v opukách (pilieri, nadložie, podložie) s výraznou degradáciou po kontakte s vodou.

Posledný vplyv vody na pevnosť horninového masívu sa týka skutočnosti, že masív obsahuje prirodzené plochy nespojitostí, zlomy, prešmyky, posuvy a ťažbou vyvolané sekundárne plochy nespojitostí, hlavne rozvoľnenia. Keď sú tieto mikro a makroštruktúry suché, majú dostatočnú šmykovú pevnosť, ktorá drží masív v kompaktnejšom resp. súdržnejšom stave.

Vplyvom vody, dochádza k zníženiu trenia na šmykových plochách, horninové kĺby sa môžu vplyvom účinku vztlaku podzemnej vody otvárať, čím sa znižuje stabilita zatopenej štruktúro-tektonickej predisponovanej oblasti. Problematika zníženia útvarovej pevnosti v podmienkach úplného nasýtenia je riešená v kap. 3.

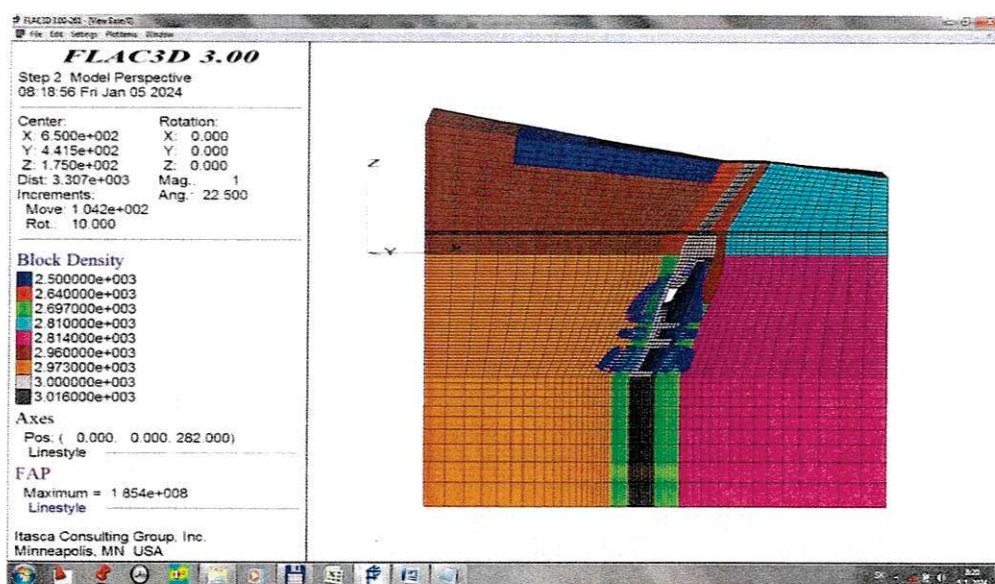
Modifikácie napätí pri zatopení podzemia

Pri zatopení podzemných diel a priestorov sú tieto vystavené tlaku vody. Vertikálne efektívne napätie sa podľa Terzaghiho teórie zníži (čo je na strane bezpečnosti), podobne sa zníži aj efektívne napätie v horizontálnom smere (viď podkap. 4.3.2), ktoré má dôležitú podpornú funkciu z hľadiska objemového stavu napätí pri pôsobení bočných napätí, čo by mohlo viesť k zníženiu stability takto namáhaných hornín.

Podľa konečnej hladiny podzemnej vody a tvaru pilierov, môže mať globálny efekt v niektorých konfiguráciách významný vplyv na stabilitu pilierového systému.

V prípade výskytu polôh nepriepustných hornín, voda neprenikne do horninového masívu. Zatopenie podzemia potom generuje hlavne horizontálny tlak na čela pilierov alebo dutín a môže prispieť k zlepšeniu stability.

Vyššie popísaný napäťový stav (pôsobenie horizontálneho tlaku vody zodpovedajúcemu výške vodného stĺpca) bol aplikovaný aj na podmienky ložiska Lubeník (obr. 21). Vzhľadom na výskyt málo priepustných polôh bridlic resp. fylitov subvertikálneho uloženia v bezprostrednom nadloží aj podloží ložiskovej výplne, je tento prístup plne opodstatnený (OBÚ SNV, 1989).



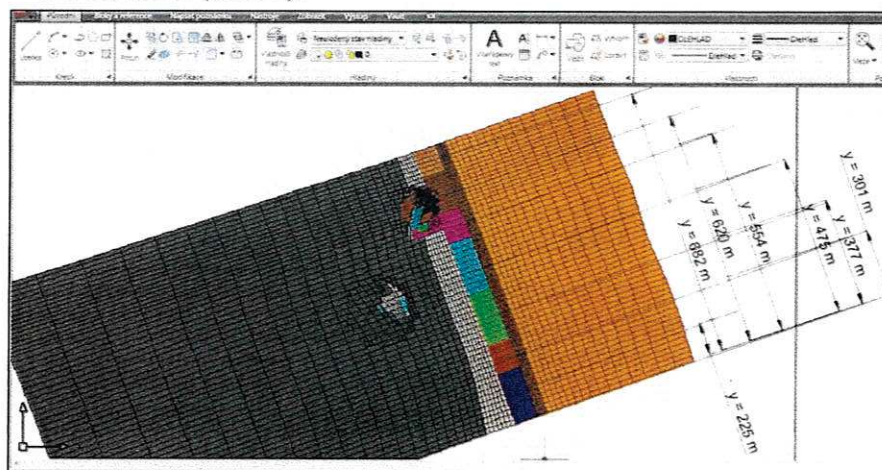
Obr. 21: Implementácia horizontálnych napätí nahradzujúcich silový účinok vody pri zatopení V. hor.

Bočný tlak vody bol zadáný vo forme zodpovedajúcich bočných napätí S_{xx} zväčšujúcich sa z nulovej hodnoty na úrovni napr. 282 m n. m. na hodnotu cca 2,67 MPa na úrovni 15 m n. m. Na obr. 21 je pôsobenie bočných tlakov vykresľované prostredníctvom bočných síl (tzv. FAP – Apply Body Force), ktorých hodnoty sú dané súčinom horizontálnych napätí na pôsobiacu plochu (obr. 21).

Podobný prístup bol zvolený aj pre pôsobenie podzemnej vody s maximom na úrovni VII. horizontu.

Pri vyhodnocovaní deformačného stavu na ložisku Lubeník v stave mokrej likvidácie bol kladený dôraz hlavne na:

- priebeh deformácií povrchu ovplyvneného banskou činnosťou pri odstavení čerpania banských vôd (mokrý stav) v troch smeroch pretvoreni (x , y , z) približne v polovici rezov, z ktorých je ložisko vymodelované $y = 225$ m, 301 m, 377 m, 475 m, 554 m, 620 m, 682 m (obr. 22).



Obr. 22: Poloha posudzovaných rezov

Z obr. 21 je zrejmé aj zmena objemových hmotností (Block Density) jednotlivých typov modelovaných hornín nad a pod hladinou podzemnej vody.

6.1 Výsledky modelovania

Problematika vplyvu likvidácie banskej činnosti v DP Lubeník zatopením a jej dopadov na povrch terénu bola riešená pre tieto dielčie úlohy:

- posúdenie stability horninového masívu v dobývacom priestore (DP) Lubeník počas zatápania podzemnej prevádzky pre úroveň VII. (172 m n. m.) a V. (282 m n. m.) obzoru tzv. „mokrý stav“;
- posúdenie stability ťažnej jamy č. 3, jej okolia a stanovenie bezpečnostného pásma jamy č. 3,
- posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem.

Algoritmus riešenia vyššie uvedených dielčích úloh je založený na princípoch nepriamej analýzy fluid – flow problematiky (viď podkap. 4.2, 4.3) a vychádzal z týchto základných krokov:

- 1) výpočet úlohy v suchom stave, vynulovanie deformácií, rýchlosti a stavu stability,
- 2) inštalácia úrovne hladiny banskej vody tzv. inicializáciou pórových tlakov v požadovaných hĺbkových úrovniach s implementáciou lineárnych bočných napätí závislých od výšky vodného stĺpca na kontakte voľný resp. vydobytý priestor - nadložný a podložný pilier resp. nadložné a podložné bridlice (fylity),
- 3) redukcia fyzikálno-mechanických parametrov jednotlivých horninových typov po nasiaknutí (viď kap. 3).

Plnú fluid-flow analýzu nebolo možné realizovať z dôvodu chýbajúcich základných hydrofyzikálnych údajov k jednotlivým horninovým typom použitých v numerických modeloch (Biot koeficient, permeabilita, Biot modulus, fluid Bulk modulus a pod.).

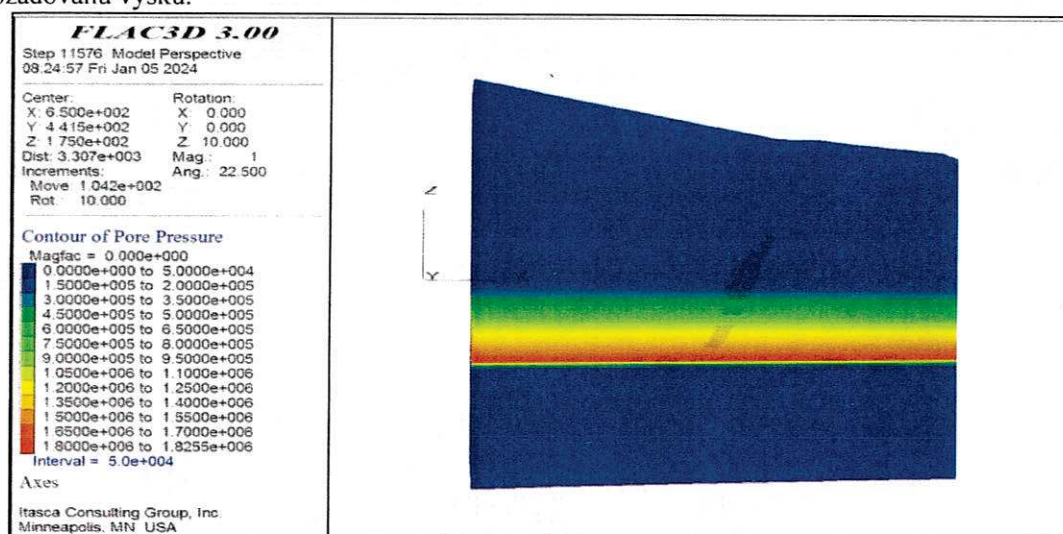
Pre potreby tohto posudku je plne postačujúca aj nepriama analýza, ktorá zohľadňuje pôsobenie podzemnej vody pre jednotlivé hĺbkové úrovne, zmenu objemových hmotností pod a nad hladinou podzemnej vody, efektívne a totálne napätia ale nerieši napríklad vývoj pórových tlakov v čase vo výpočtových modeloch.

Vynulovanie rýchlostí, deformácií a stavu stability suchého modelu s následným výpočtom v podmienkach zatápania umožnilo determinovať deformácie a zmenu stavu stability len vplyvom mokrej likvidácie.

6.2 Posúdenie stavu stability horninového masívu pre úroveň zatopenia po VII. obzor

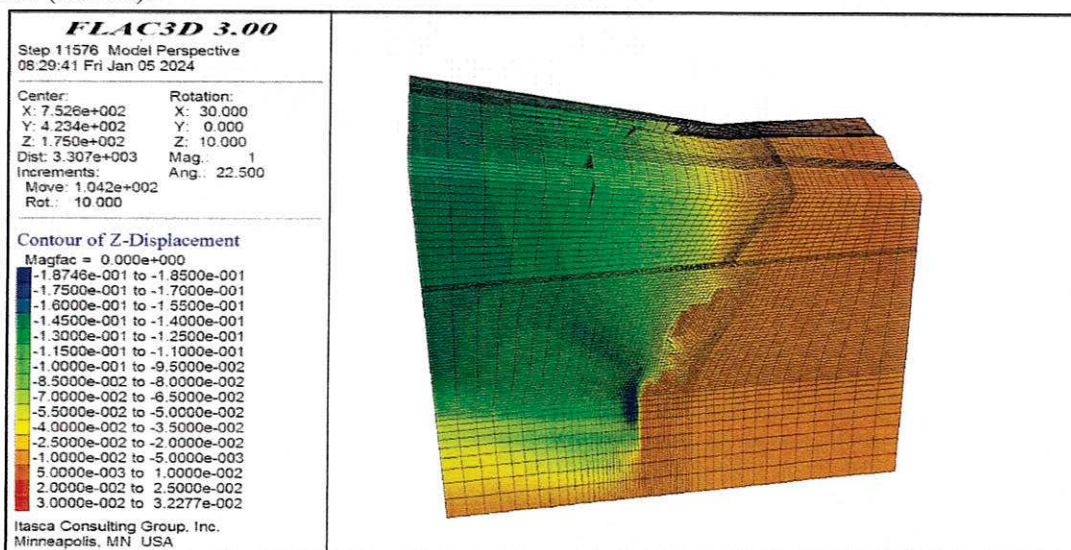
6.2.1 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastnosti hornín

V tejto podkapitole po výpočte napäťovo-deformačného stavu komplexného modelu v suchom stave a znulovaní deformácií, rýchlostí a stavu stability boli inštalované pórové tlaky (pore pressure) resp. banská voda na úroveň VII. obzoru – 172 m n. m. (obr. 23) a následne znížené vlastnosti pre stav úplného nasiaknutia hornín. Pore pressure boli inicializované po celej šírke a dĺžke 3D modelu na požadovanú výšku.

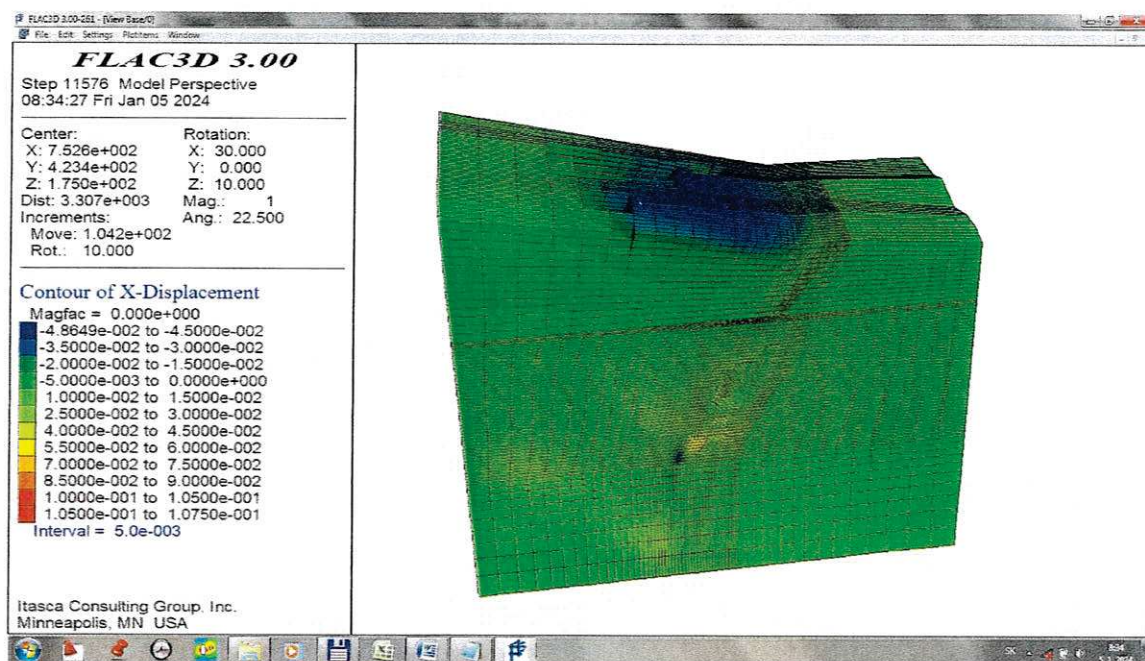


Obr. 23: Kontúry pórových tlakov

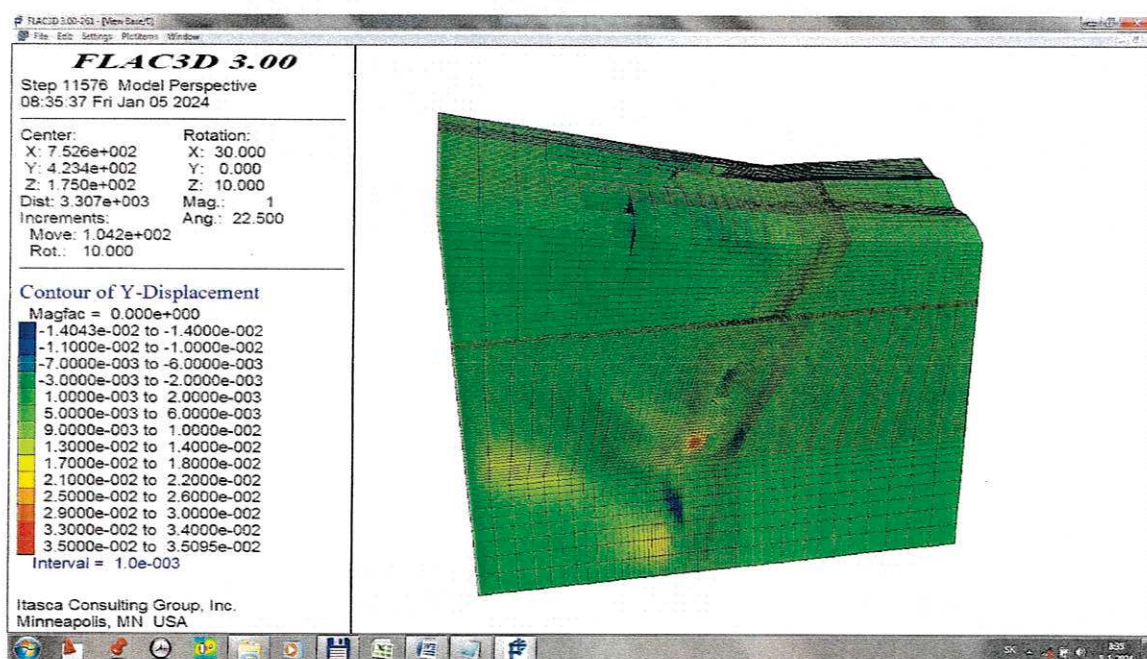
Pórové tlaky z nulovej hodnoty na úrovni VII. obzoru narastajú na hodnotu cca 1,8 MPa v hĺbke cca 30 m pod počvou najspodnejšieho horizontu. Ide o ustálený stav (steady state) hladiny pórových tlakov (obr. 23).



Obr. 24: Vertikálne deformácie v reze $y = 225$ m



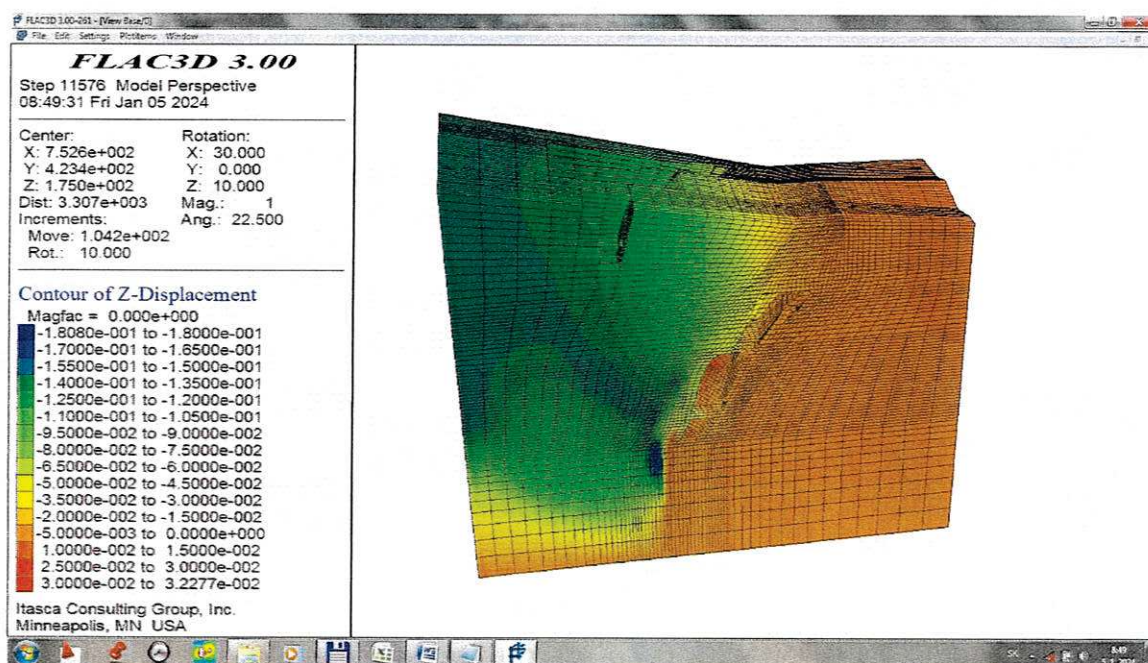
Obr. 25: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 225$ m



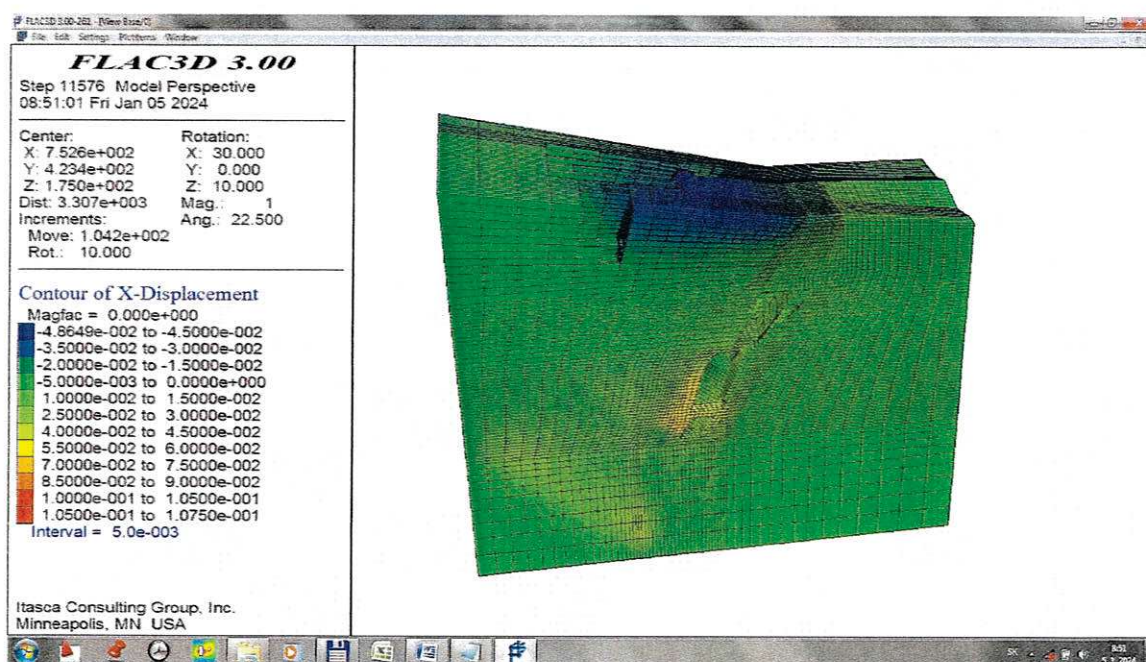
Obr. 26: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 225$ m

Hĺbkový dosah (cca 30 m pod úrovňou najspodnejšieho horizontu) pôsobenia podzemnej vody bol stanovený odhadom. Inštalácia spodnej úrovne pôsobenia pórových tlakov na spodku modelu, čo je cca 300 m pod najspodnejším obzorom je málo pravdepodobná (obr. 23).

Vertikálne deformácie povrchu terénu s maximom cca 19 cm sa sústreďujú na ľavej strane modelu vo vyššom nadloží ložiska v oblasti vápencov (obr. 24). Maxima horizontálnych deformácií v smere osi x sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 5 cm (obr. 25). Najmenšie bočné deformácie sú v pozdĺžnej osi ložiska v smere osi y a maximá dosahujú hodnoty cca 1 – 1,5 cm na povrchu terénu (obr. 26).

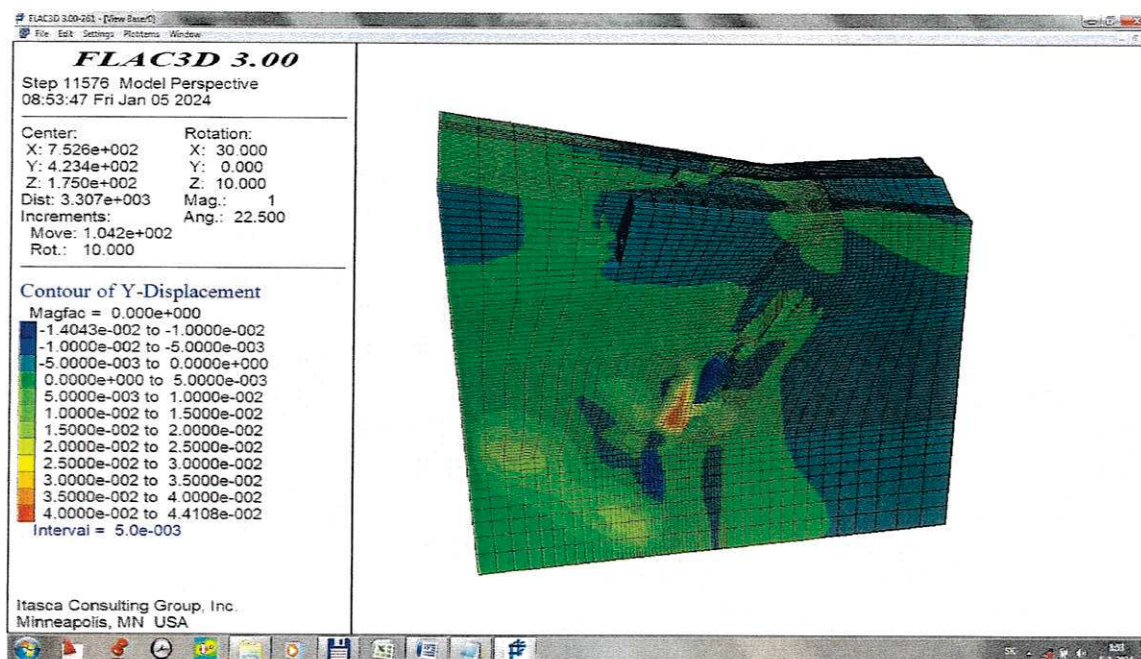


Obr. 27: Vertikálne deformácie v reze $y = 301 \text{ m}$



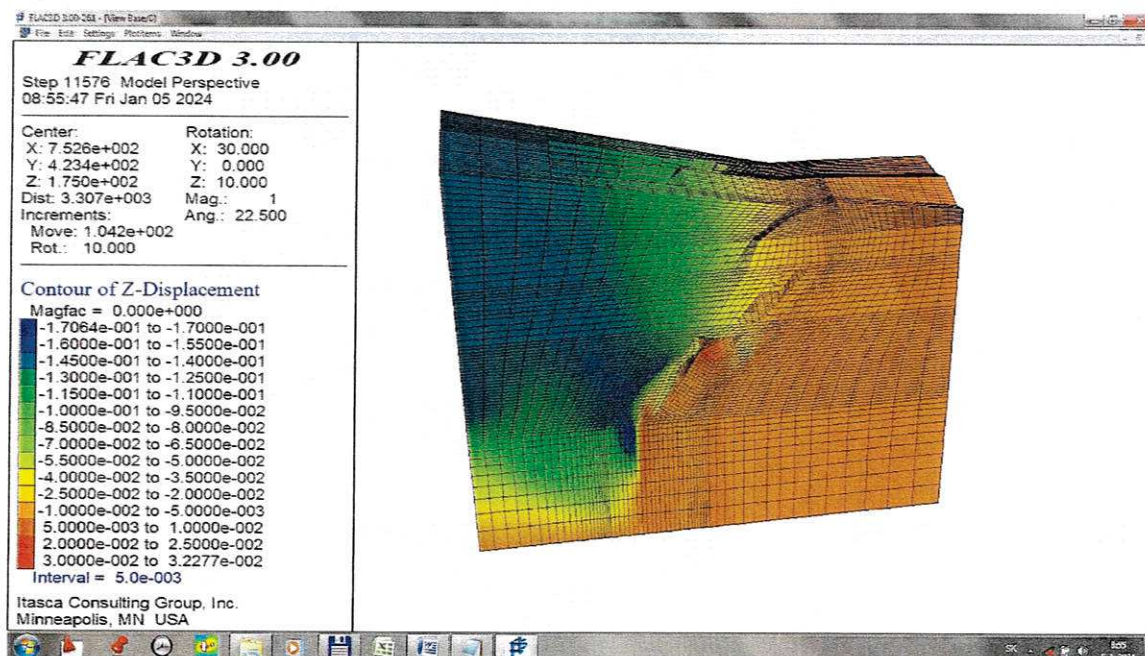
Obr. 28: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 301 \text{ m}$

Vertikálne deformácie povrchu terénu s maximom cca 15 cm sa sústreďujú na ľavej strane modelu vo vyššom nadloží ložiska v oblasti vápencov (obr. 27). Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblastí závalov a dosahujú veľkosť cca 5 cm (obr. 28). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 5 - 7 cm (obr. 28).



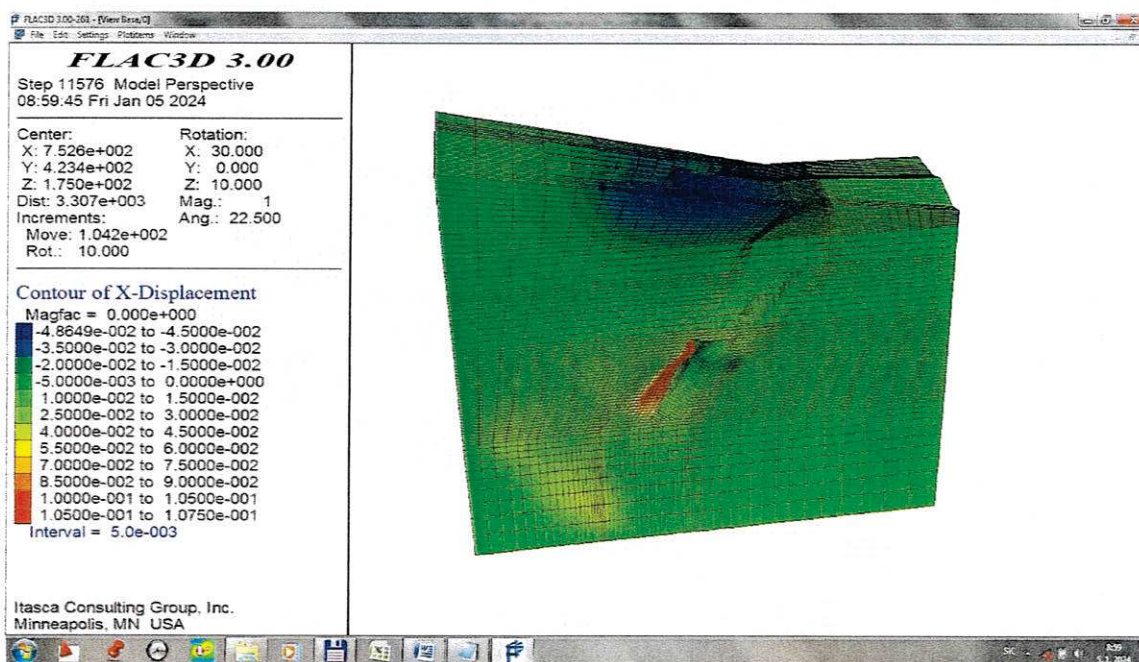
Obr. 29: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 301 m

Najmenšie bočné deformácie sú v pozdĺžnej osi ložiska v smere osi y a maximá v smere gravitácie dosahujú hodnoty cca 4 cm (obr. 29). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 cm, v oblasti spodných horizontov smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 4 cm (obr. 29).



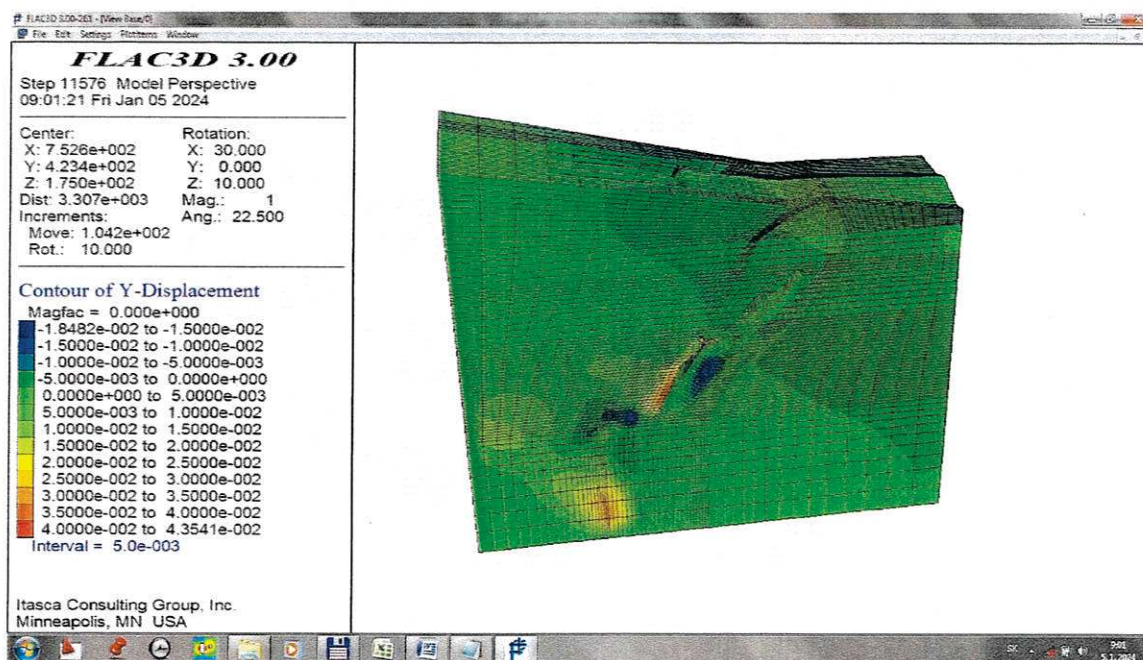
Obr. 30: Vertikálne deformácie v reze y = 377 m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze y = 377 m sa koncentrujú hlavne na povrchu modelu v oblasti vyššieho nadložia s hodnotami cca 15 cm. V nadloží nad polohami bridlíc dosahujú maximá zvislých deformácií hodnoty cca 17 cm (obr. 30).



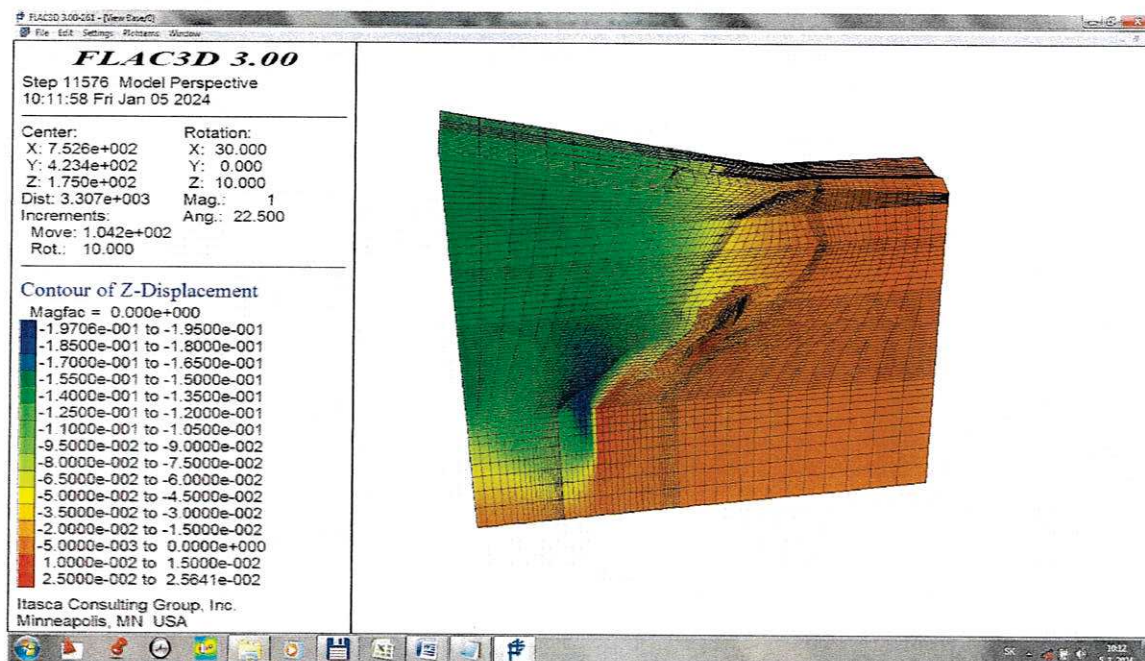
Obr. 31: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 377$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 5 cm (obr. 31). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 10 cm (obr. 31).



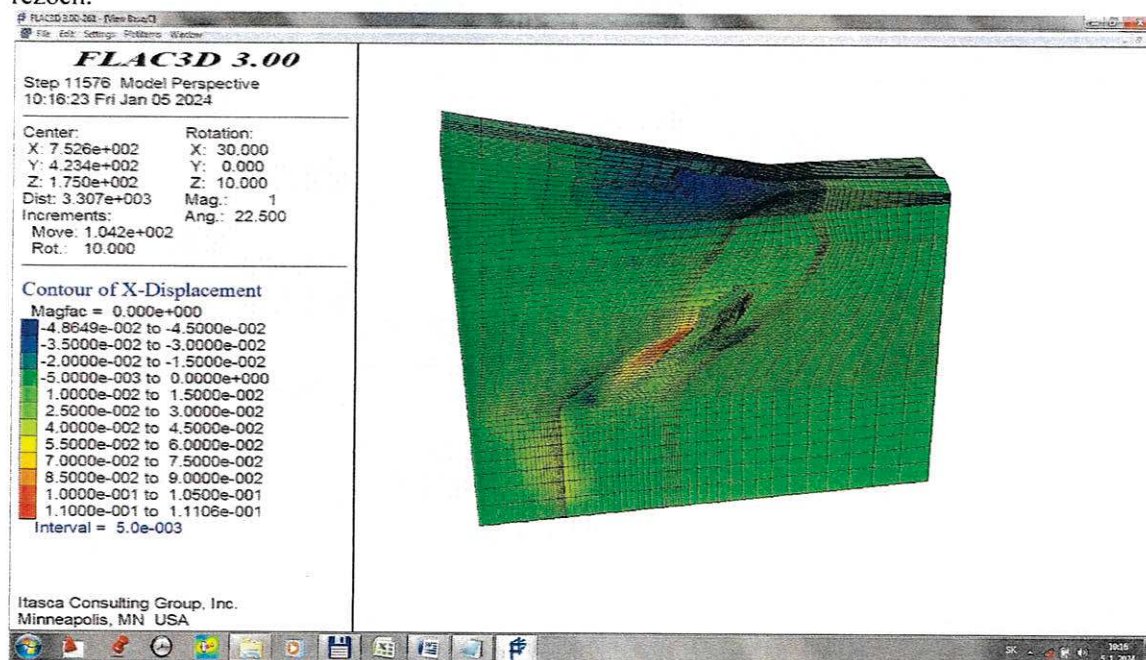
Obr. 32: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 377$ m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 4 cm proti smeru gravitácie (obr. 32). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 cm, v oblasti spodných horizontov smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 4 cm (obr. 32).



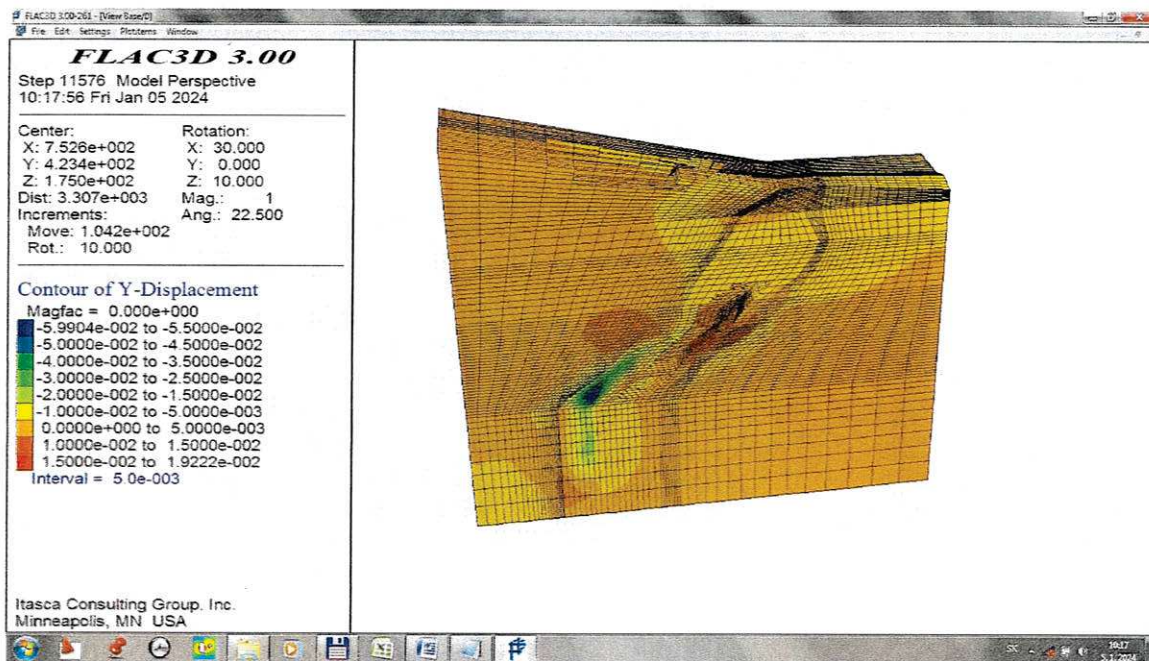
Obr. 33: Vertikálne deformácie v reze $y = 475$ m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze $y = 475$ m sa koncentrujú v nadloží spodných horizontov na úrovni cca 20 cm. Na povrchu modelu v oblasti vyššieho nadložia sa hodnoty deformácií terénu pohybujú na úrovni cca 14 - 16 cm (obr. 33) podobne ako v predchádzajúcich rezochoch.



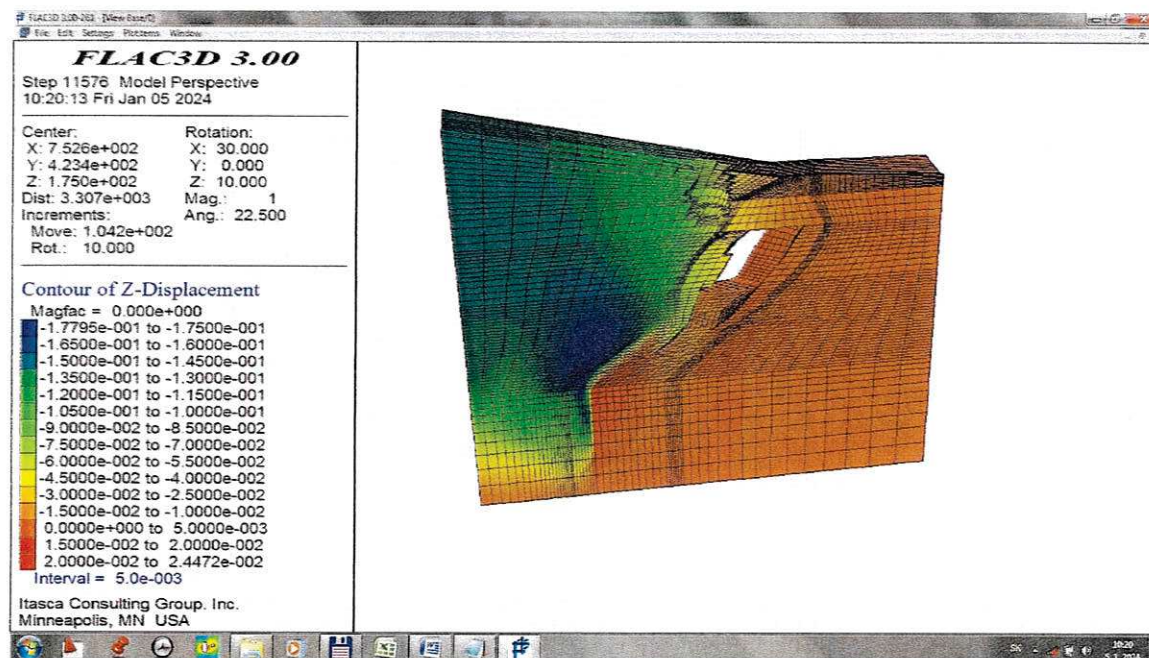
Obr. 34: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 475$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 475$ m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 5 cm (obr. 34). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 11 cm (obr. 34).



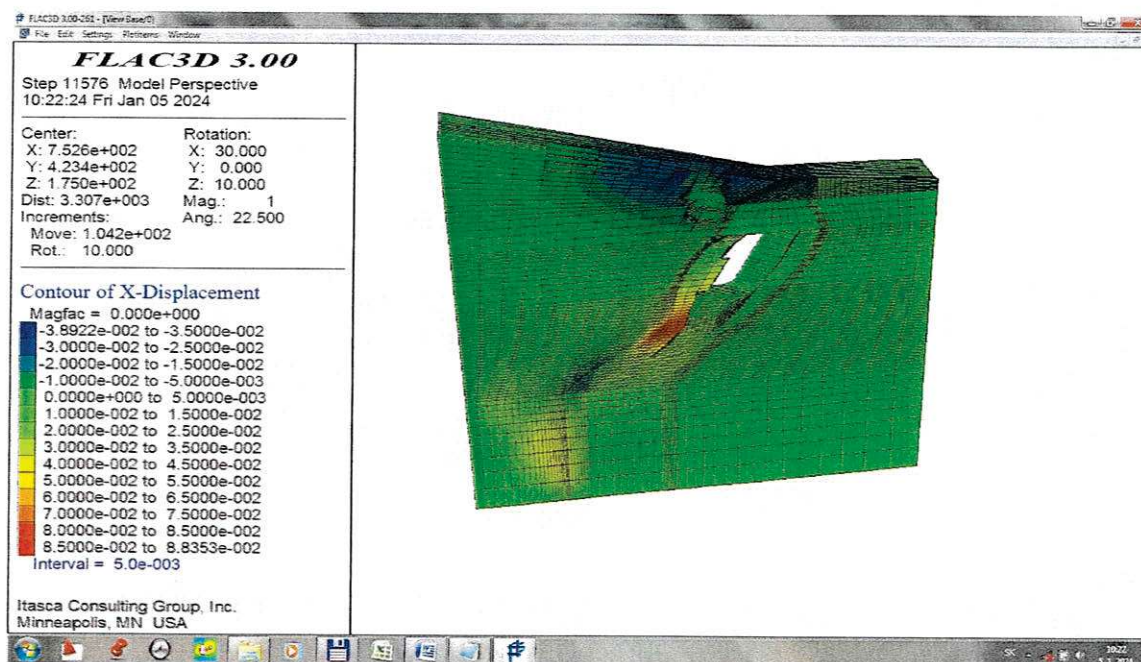
Obr. 35: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 475 m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 2 cm v smere gravitácie na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 35). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 - 2 cm, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 3 - 4 cm (obr. 35). Táto anomália (pod spodnými horizontmi) je zapríčinená pravdepodobne konfiguráciou siete.



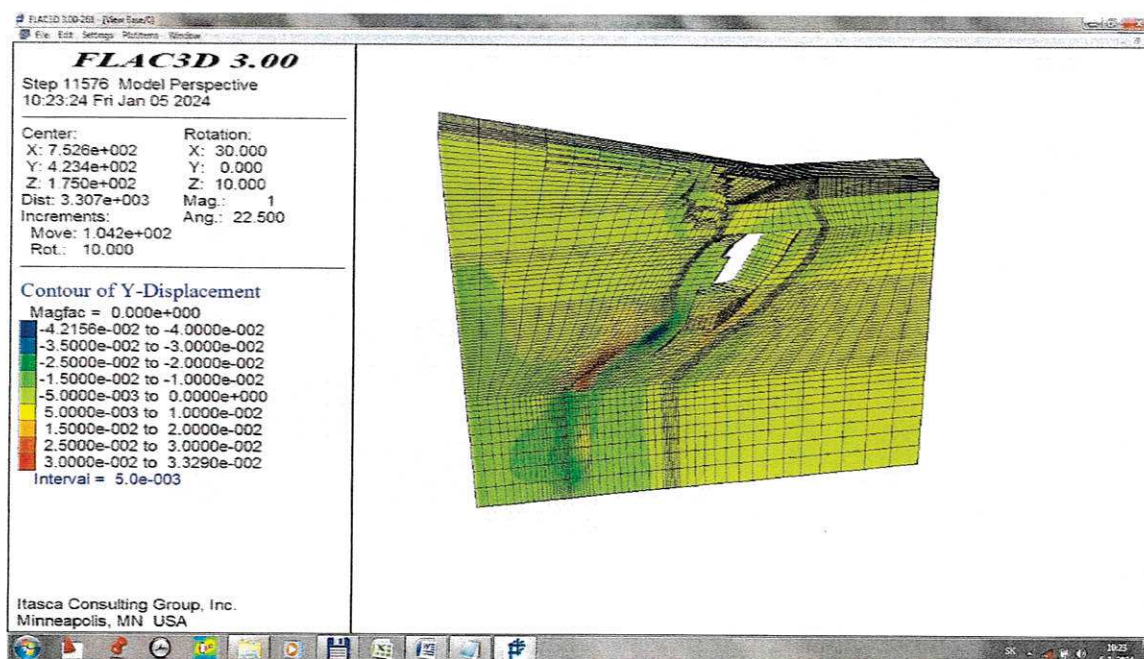
Obr. 36: Vertikálne deformácie v reze y = 554 m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze y = 554 m sa koncentrujú hlavne na povrchu modelu v oblasti vyššieho nadložia s hodnotami cca 15 cm (obr. 36) podobne ako v predchádzajúcich rezoch.



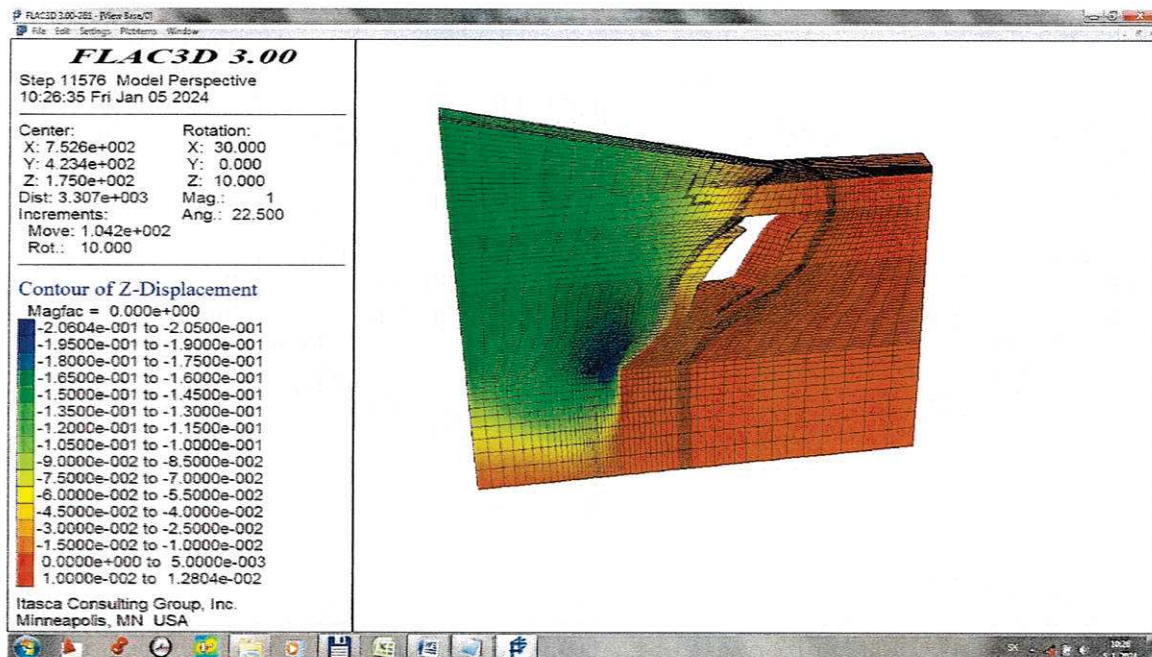
Obr. 37. Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 554$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 554$ m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblastí závalov a dosahujú veľkosť cca 4 cm (obr. 37). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 9 cm (obr. 37).



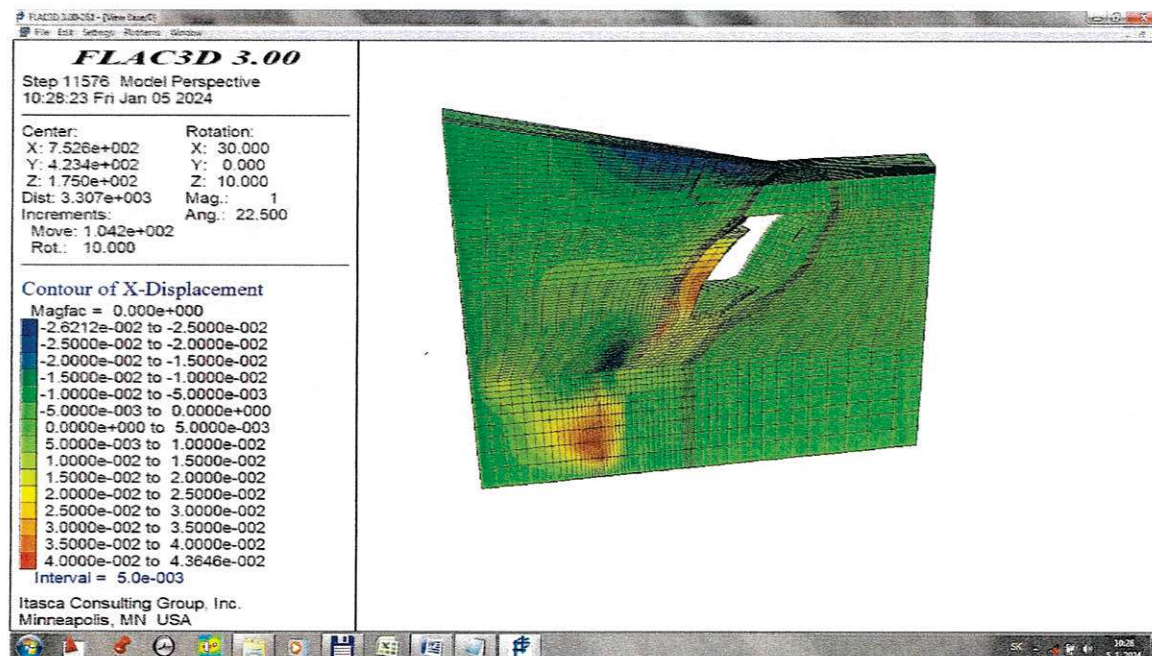
Obr. 38: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 554$ m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 4 cm v smere gravitácie na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 38). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 - 2 cm, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 2 cm (obr. 38). Táto anomália (pod spodnými horizontmi) je zapríčinená pravdepodobne konfiguráciou siete.



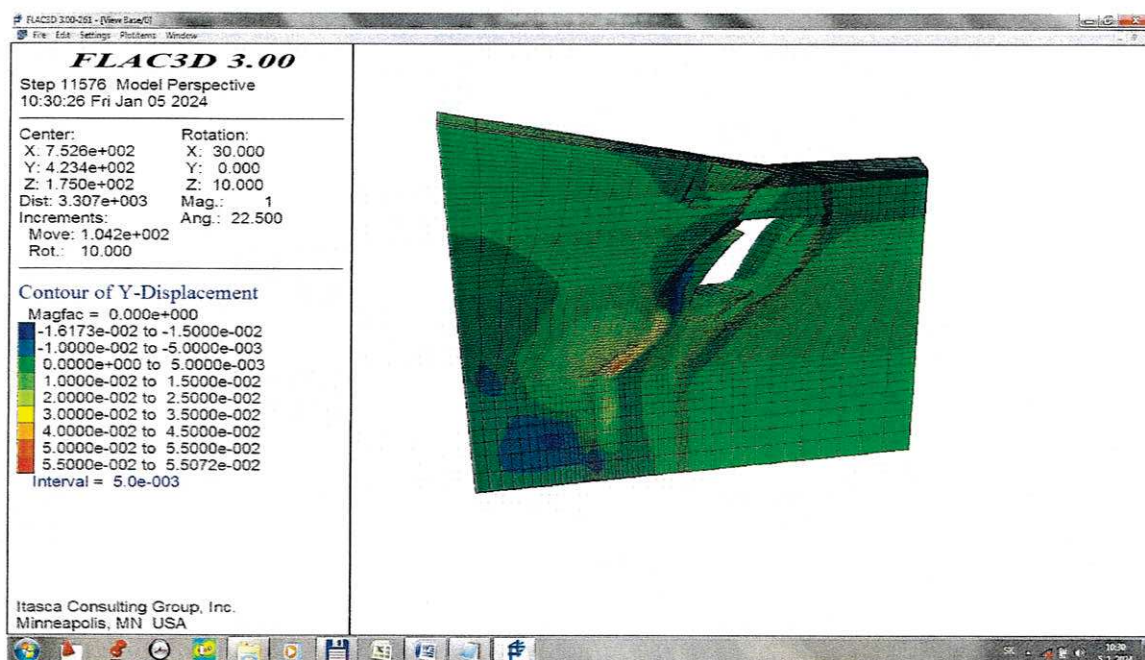
Obr. 39: Vertikálne deformácie v reze $y = 620$ m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze $y = 620$ m sa koncentrujú hlavne na povrchu modelu resp. terénu v oblasti vyššieho nadložia s hodnotami cca 11 - 12 cm (obr. 39) podobne ako v predchádzajúcich rezoch.



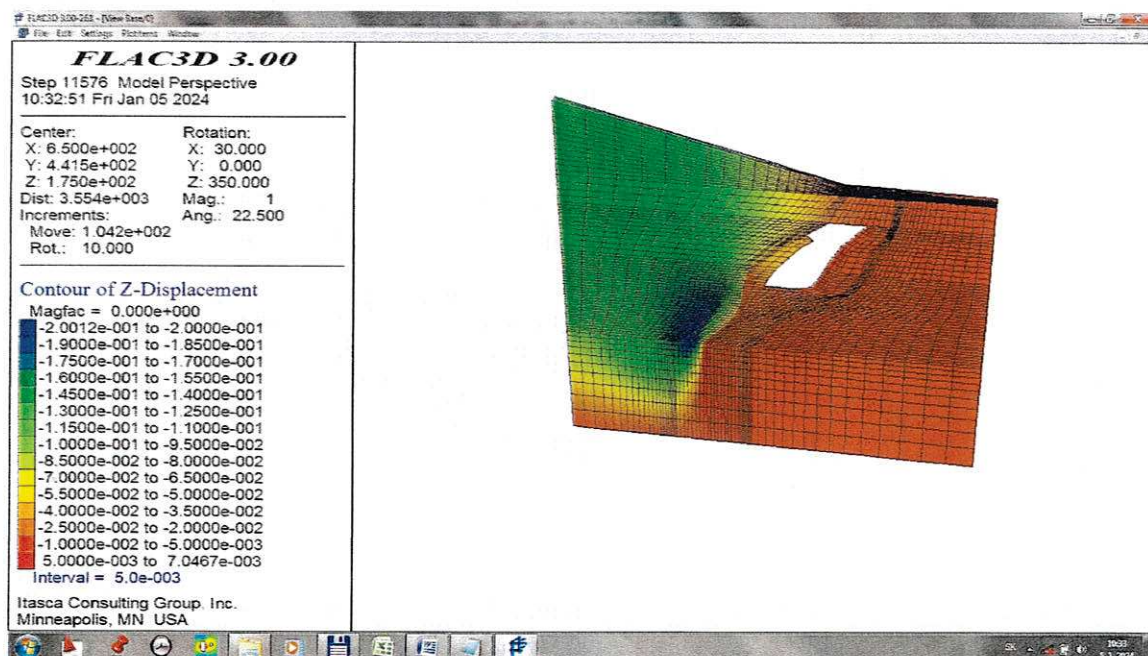
Obr. 40: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 620$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 620$ m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 2 cm (obr. 40). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 4 cm (obr. 40).



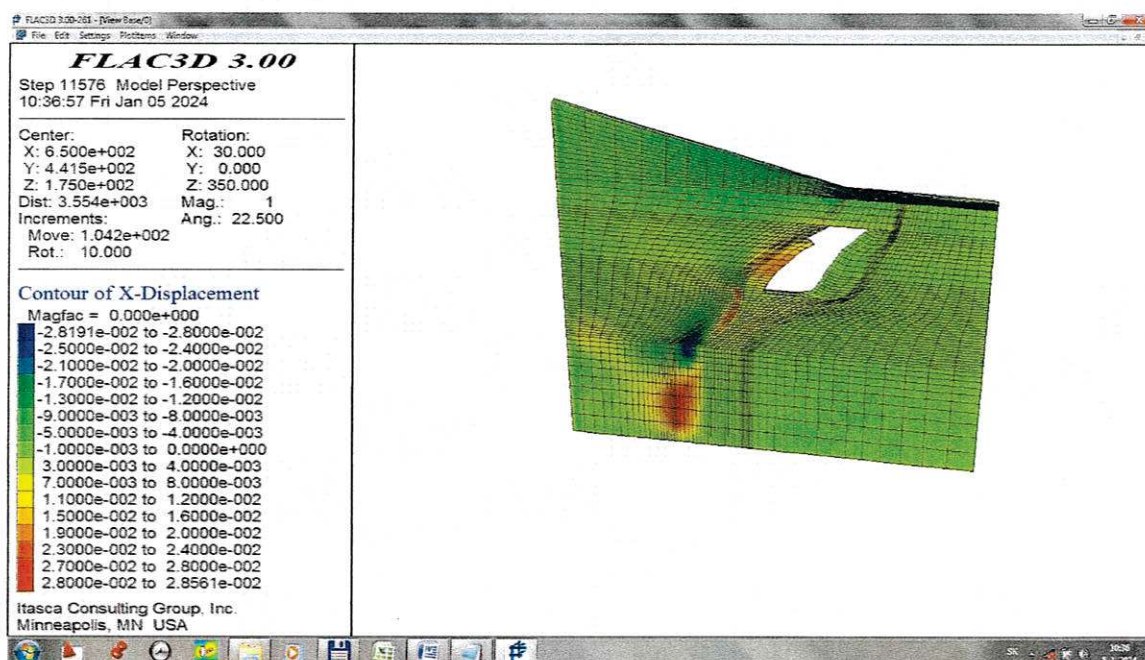
Obr. 41: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 620 m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 2 cm v smere gravitácie na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 41). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 - 2 cm, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 5 cm (obr. 41). Táto anomália (pod spodnými horizontmi) je zapríčinená pravdepodobne konfiguráciou siete.



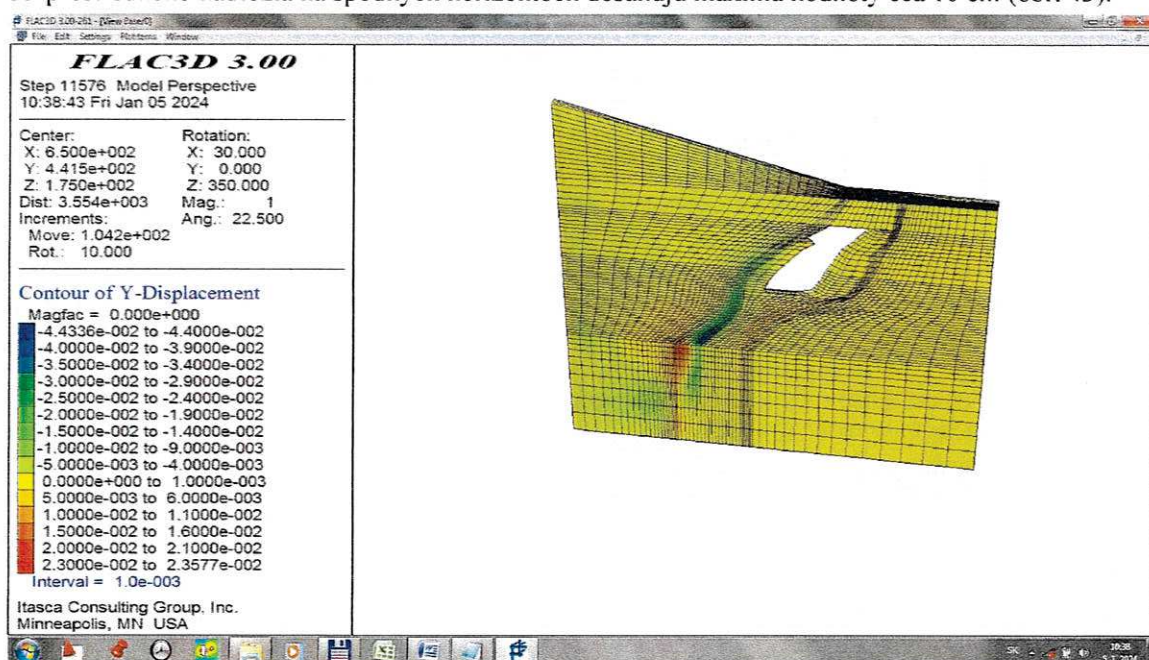
Obr. 42: Vertikálne deformácie v reze y = 682 m

Hodnoty vertikálnych deformácií v reze y = 682 m sa koncentrujú na povrchu modelu resp. terénu o veľkosti cca 10 - 15 cm, v oblasti vyššieho nadložia s hodnotami cca 4 - 6 cm (obr. 42) podobne ako v predchádzajúcich rezoch.



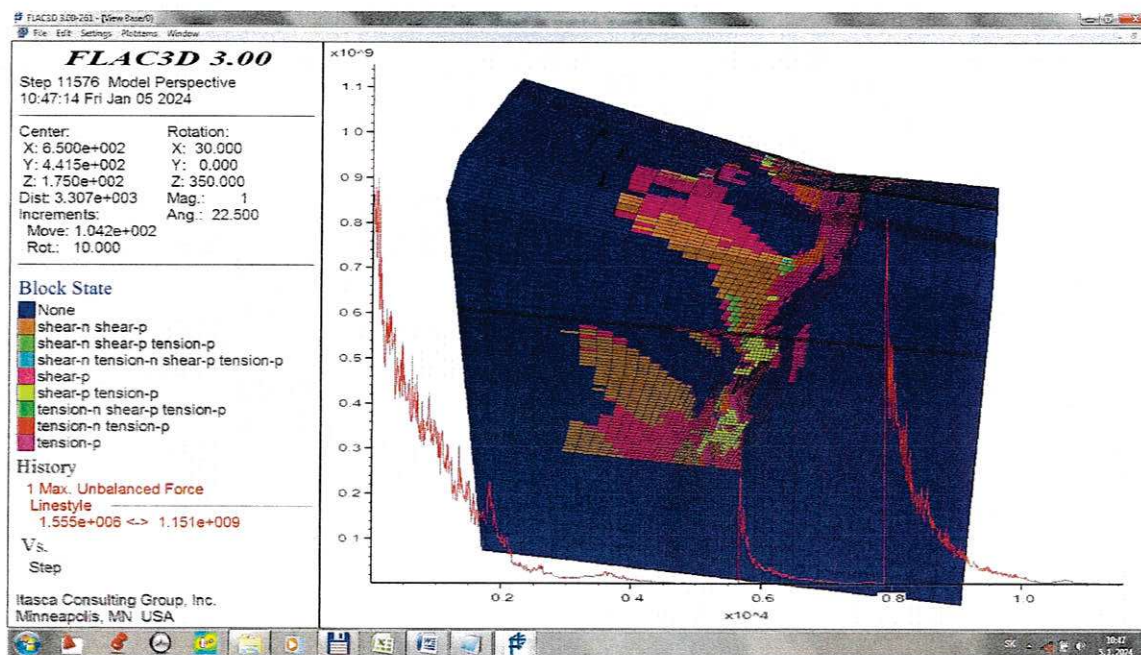
Obr. 43: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 682$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 682$ m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 1 - 2 cm (obr. 43). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 10 cm (obr. 43).



Obr. 44: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 682$ m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 4 cm v smere gravitácie na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 44). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 cm proti smeru gravitácie, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 4 cm (obr. 44). Táto anomália (pod spodnými horizontmi) je zapríčinená pravdepodobne konfiguráciou siete.



Obr. 45 : Stav stability modelu

Stabilita modelu je v prostredí Flac3D dokumentovaná dvomi spôsobmi – históriou nevybalansovanej sily (Unbalanced Force) a stavom stability jednotlivých zón modelu (Block State). Stabilita modelu s priebehom nevybalansovanej sily je prezentovaná pre komplexný model (obr. 45).

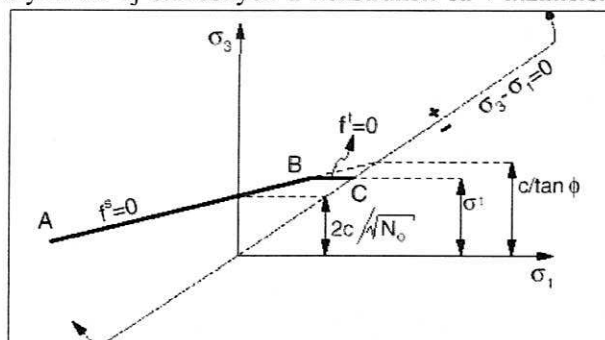
Nevybalansovaná sila v prvom úseku z prvotnej nerovnováhy sa dostáva do stabilného stavu (konverguje k nule). V tejto etape riešenia je dosiahnutý rovnovážny stav pre suchý stav s vytvorením vydobytých priestorov. V druhom úseku riešenia sa model dostáva do čiastkovej nerovnováhy vplyvom inštalácie pórových tlakov na úrovni 172 m n. m., ktorá sa postupne preklolí do rovnováhy – riešenie konverguje k nule. V tretej etape riešenia sa model dostáva do nerovnováhy vplyvom zníženia vlastností hornín nasiaknutých vodou s následnou konvergenciou k nule, t.j. systém sa aj po tomto kroku stabilizuje a je v konečnej rovnováhe, výpočet je ukončený v stabilnom stave (obr. 45).

Stav stability zachytáva v jednotlivých zónach modelu spôsoby ich možného porušovania resp. nestability. Fialové farby zón (tmavší a svetlejší odtieň) signalizujú predispozíciu zón len na šmykové (shear – p) alebo ťahové (tension – p) porušenie alebo ich kombináciu (svetlozelená farba – shear – p tension – p). Tieto predisponované zóny sú z hľadiska počtu zastúpene najviac.

Zóny s príponou n (napr. shear – n tension – n) sú miesta v modeli, v ktorých už dochádza k porušovaniu šmykom, ťahom alebo ich kombináciou. Počet týchto zón je veľmi nízky, čo nespôsobuje totálnu stratu stability modelu, ale môžeme hovoriť o parciálnej stabilite modelu, ako reakcii na zatopenie a úpravu parametrov hornín pod hladinou banskej vody (obr. 45).

Zóny s rôznym typom nestabilit sa kumulujú hlavne do oblasti ložiskovej výplne a do jej nadložia v podzemí aj na povrchu modelu.

Posúdenie geotechnických stavieb banských ale aj stavebných a konštrukcií sa v inžinierskej praxi často realizuje pomocou výpočtu stupňa stability (FoS – Factor of Safety). Program Flac3D ako je uvedené aj vyššie nemá implementovanú funkciu, ktorou by bolo možné takéto riešenie zrealizovať. Pomocou programovacieho jazyka Fish bola takáto funkcia vytvorená, ako kritérium medznej pevnosti bola použitá Mohr_Coulombova podmienka medzného stavu (obr. 46).



Obr. 46: Mohr – Coulombovo kritérium porušenia

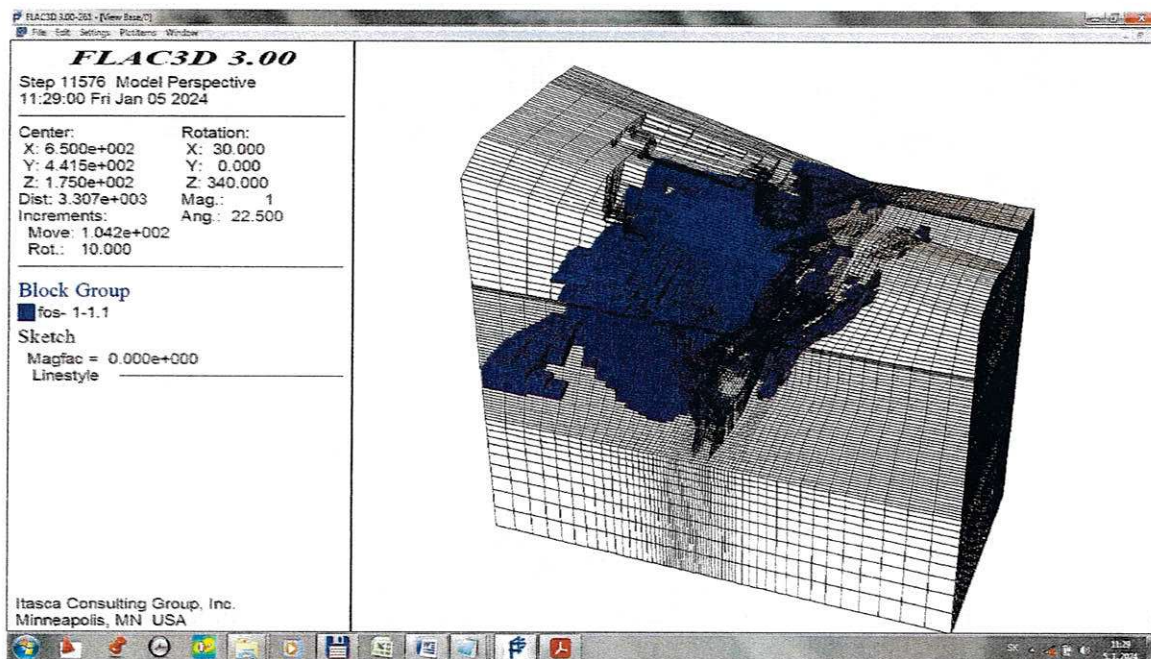
Podľa tohto kritéria k porušeniu môže dôjsť buď šmykom ($f^S = 0$) alebo ťahom ($f^T = 0$), kde :

σ_1, σ_3 - sú hlavné napätia, c - kohézia, ϕ - uhol vnútorného trenia, σ^t - ťahová pevnosť.

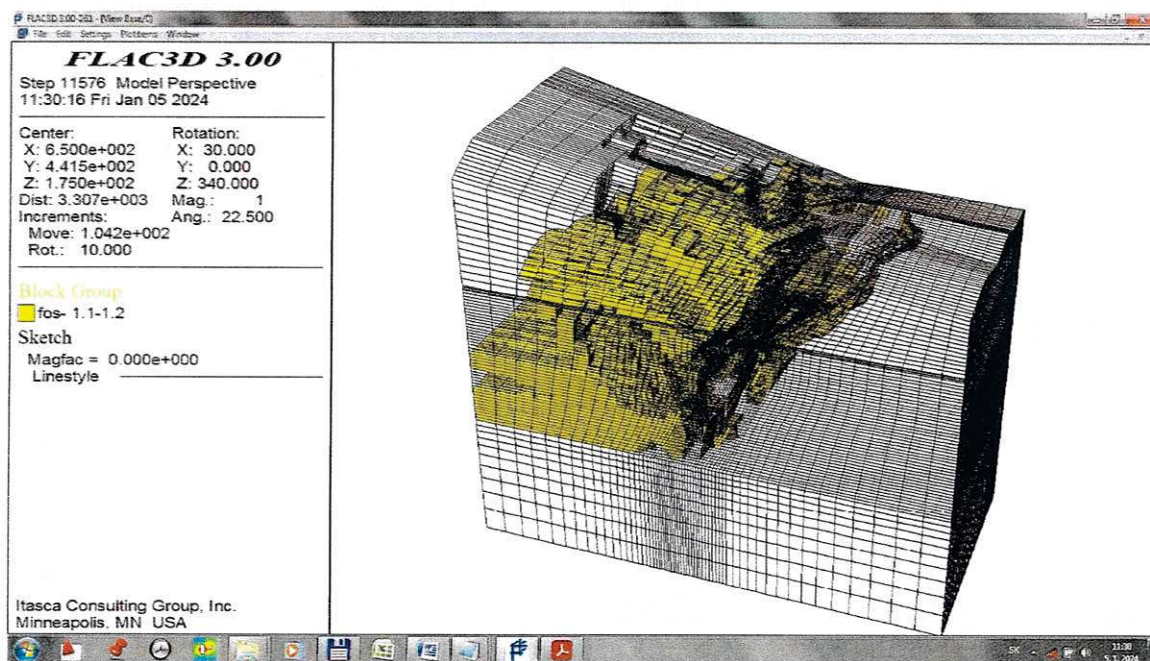
Pre výpočet stupňa stability (číslo pevnosť/napätie) bola použitá rovnica:

$$\sigma_1 = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi) \sigma_3 - 2c ((1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi))^{1/2} \quad (15)$$

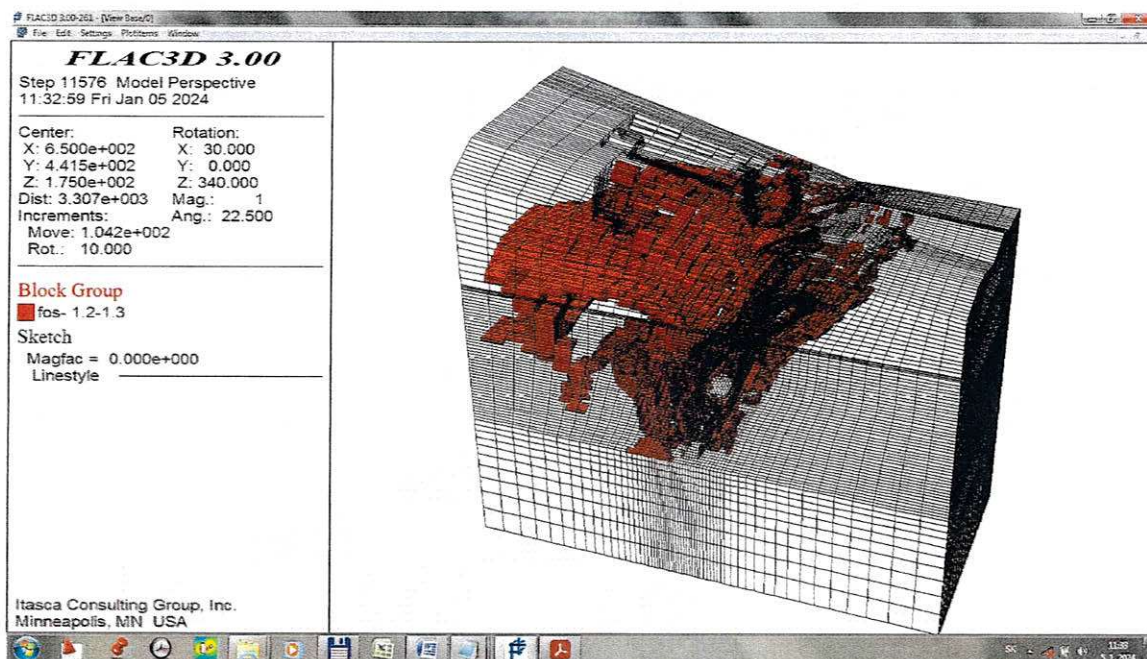
Hodnoty $FoS \leq 1$ signalizujú stav porušovania resp. nestabilný stav, hodnoty $FoS \geq 1$ znamenajú stabilný stav. Pri posudzovaní stability riešenej úlohy bola pozornosť sústredená na FoS jednotlivých zón v zvolených intervaloch.



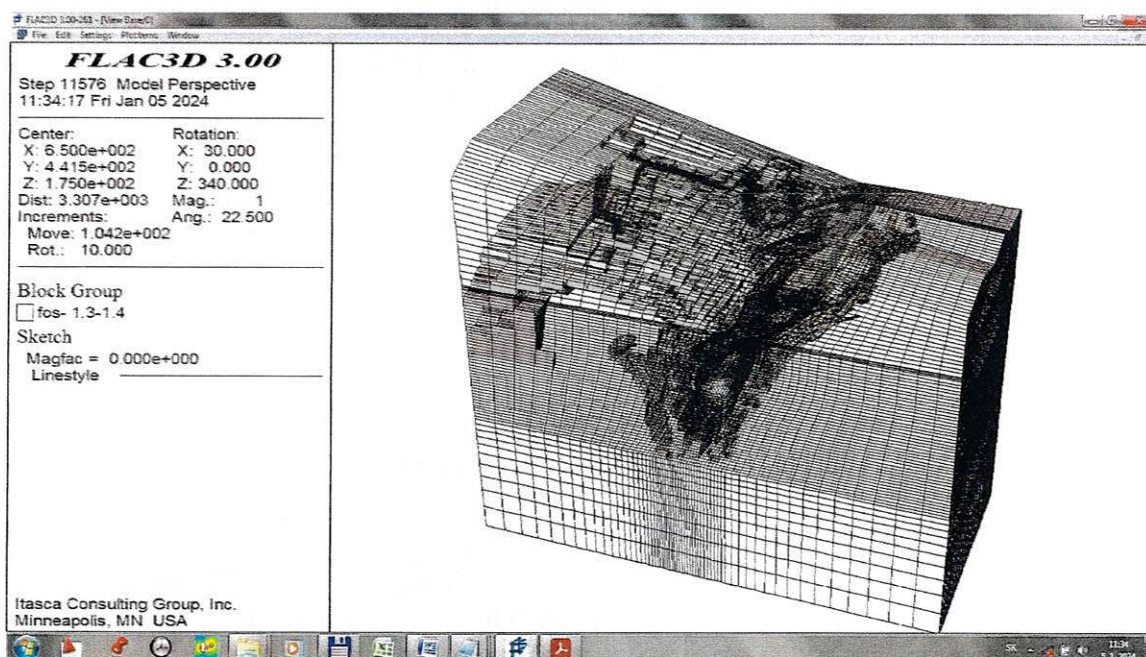
Obr. 47: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale <1 -1.1>



Obr. 48: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale <1.1 -1.2>



Obr. 49: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale <1,2 -1,3>



Obr. 50: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale <1,3 -1,4>

Na obr. 47 – 50 sú vykreslené jednotlivé zóny s príslušnými stupňami bezpečnosti FoS, ktoré boli vypočítané podľa Mohr_Coulombovej podmienky medzného vzťahu.

V modeli sa nevyskytujú zóny s FoS < 1. Zóny so stupňami bezpečnosti FoS v intervale <1-1,4> sa sústreďujú hlavne v oblasti ložiskovej výplne, kontaktov voľné priestory – nadložný pilier a v oblasti nadložia. Vyššie prezentované výstupy vo forme FoS sa vzťahujú na prípad nasadenia pórových tlakov a zníženia parametrov modelovaných typov hornín.

6.2.3 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastnosti hornín, uplift (zdvih) terénu

Podľa zahraničných skúsenosti z mokrej likvidácie čiernouhoľných ložísk napr. v Nemecku (Zhao, J. a kol., 2021), Poľsku (Dudek, M. a kol., 2020; Wesolowski, M., 2012), Belgicku (Vervoort, A. a kol., 2017), Veľkej Británie (Todd, F. a kol., 2019) dochádza vplyvom zatápania k rôznym deformačným prejavom na povrchu terénu. Spravidla v prvej fáze zatápania dochádza k poklesom povrchu terénu a v druhej fáze s odstupom viacerých rokov dochádza k zdvihu povrchu terénu.

Hodnoty poklesov a zdvihov terénu vplyvom zatápania podzemia sa pohybujú v rozmedzí niekoľkých centimetrov až cca 10 – 15 cm (uplift), (viď vyššie citované práce).

Iní autori na čiernouhoľných ložiskách uvádzajú resp. predikujú len vznik poklesov, ktoré vznikajú vplyvom zatopenia podzemia (Luo, Y., 2021; Sakhno, I. a kol. 2023).

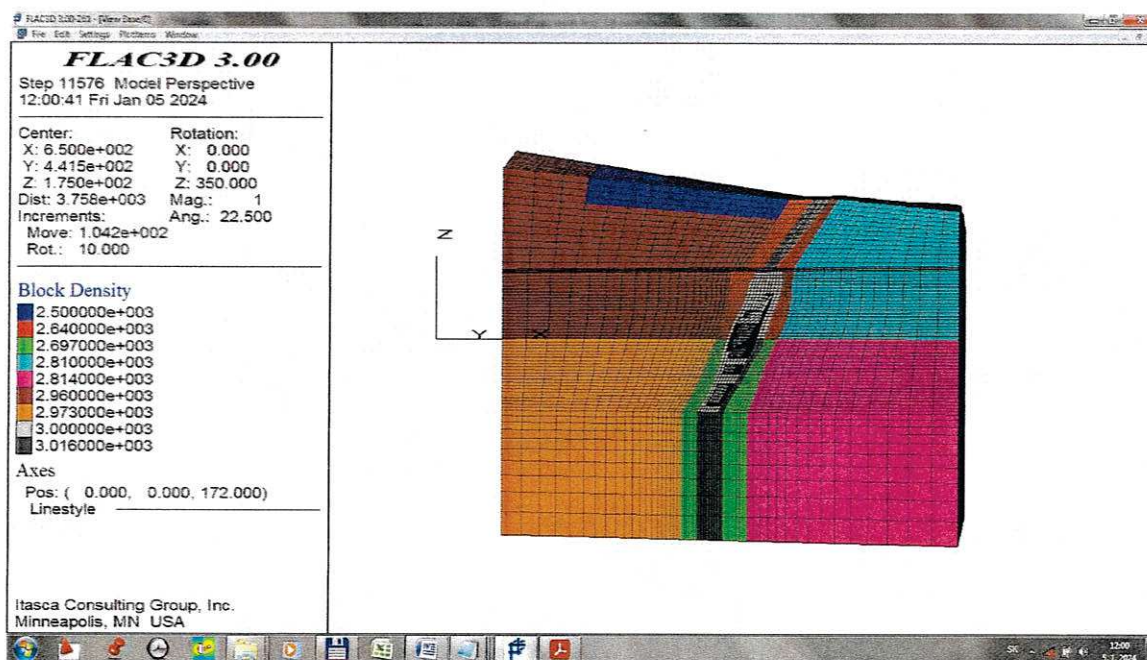
Luo, Y. pre podmienky Illinois Basin predikuje, s následným nameraním maximálnych hodnôt subsidencie terénu na úrovni cca 30 – 40 cm. Sukhno, I. a kol. predikujú numerickým modelovaním poklesy terénu pre čiernouhoľné podmienky po zatopení podzemia v oblasti ukrajinského Donbasu na úrovni cca 20 cm.

Zdvihy povrchu terénu sú vysvetľované pôsobením vztlaku vody pôsobiacej na podzemné štruktúry na základe Archimedovej teórie. Aplikácia tohto princípu simulačnou schémou na báze efektívnej hustoty je podrobnejšie popísaná v podkap. 4.3.2.

Niektorí autori (Vervoort, A. a kol. 2017) uvažujú aj o vplyve nabobtnania hornín s väčším obsahom ílových minerálov a ich podiele na zdvihu terénu, ktoré môžu byť súčasťou geologických profilov v nadloží aj podloží čiernouhoľných ložísk (Galvin, J., M., 2008).

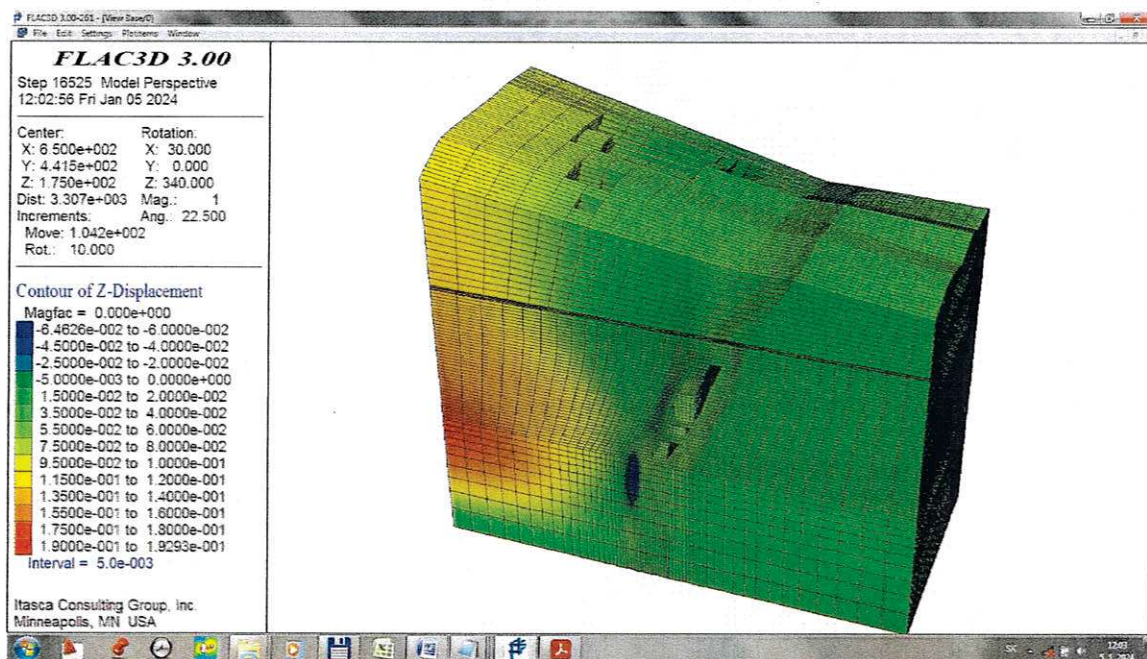
Aj keď geologicko-banské podmienky na ložisku Lubeník nie sú úplne zrovnateľné s podmienkami na čiernouhoľných ložiskách, bola teória efektívnej hustoty použitá ako jeden z variantov riešenia problematiky vplyvu zatopenia podzemia v DP Lubeník na posúdenie stability horninového masívu.

Efektívne hustoty boli použité po celej šírke a dĺžke modelu po úroveň pôsobenia pórových tlakov (obr. 51).

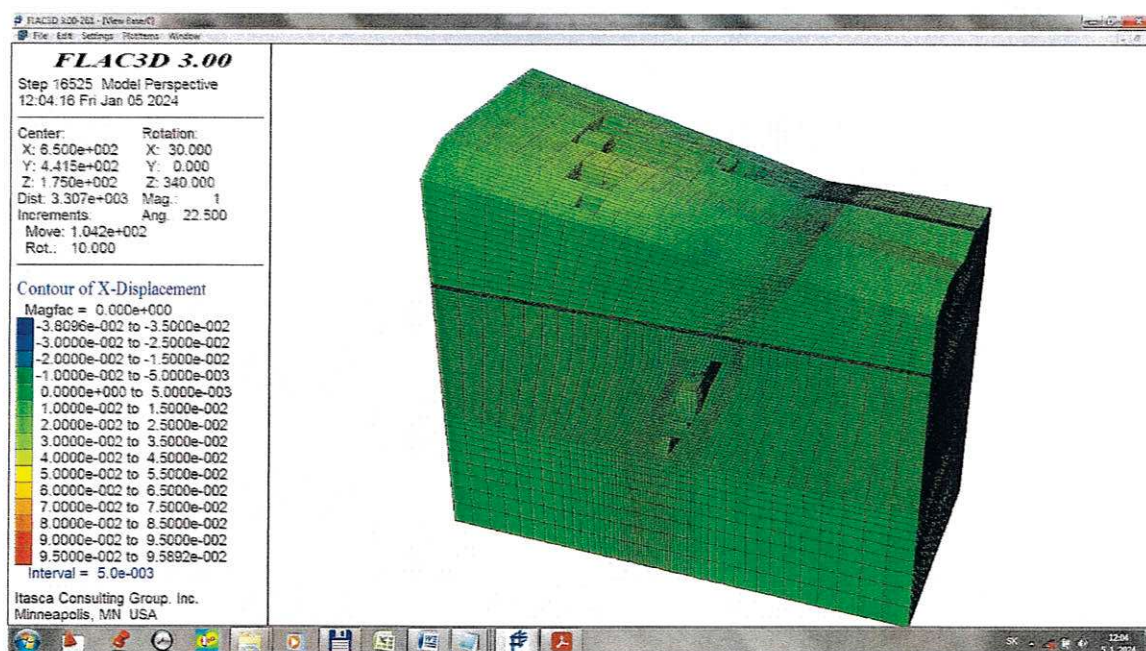


Obr. 51: Objemové hmotnosti hornín pod a nad hladinou podzemnej vody – efektívna hustota

V nasledujúcich grafických výstupoch budú prezentované niektoré deformačné výstupy a stav stability modelu v celkovom pohľade a v cca polovici y – rezu modelu.



Obr. 52: Vertikálne deformácie – komplexný model



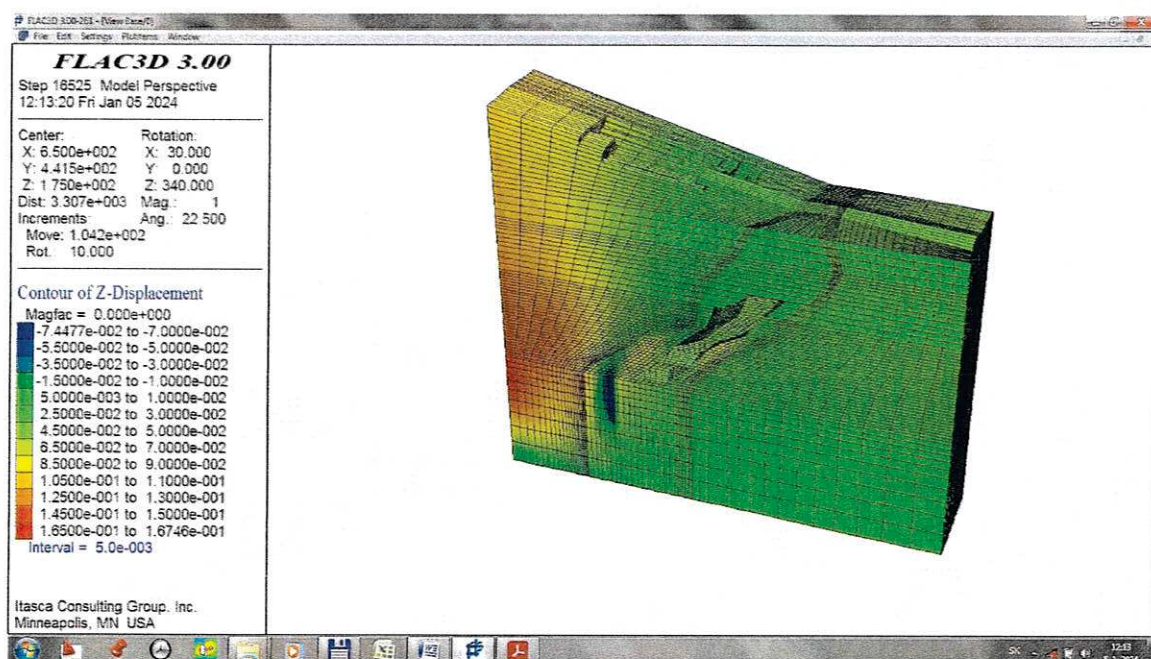
Obr. 53: Horizontálne deformácie v smere osi x

Vplyvom použitia simulačnej schémy na báze efektívnej hustoty sa maximálne hodnoty vertikálnych deformácií na povrchu terénu pohybujú na úrovni cca 10 cm (obr. 52). Deformácie v tomto prípade smerujú proti smeru gravitácie.

Horizontálne deformácie v smere osi x na povrchu terénu dosahujú maxim na úrovni cca 4 cm (obr. 53).



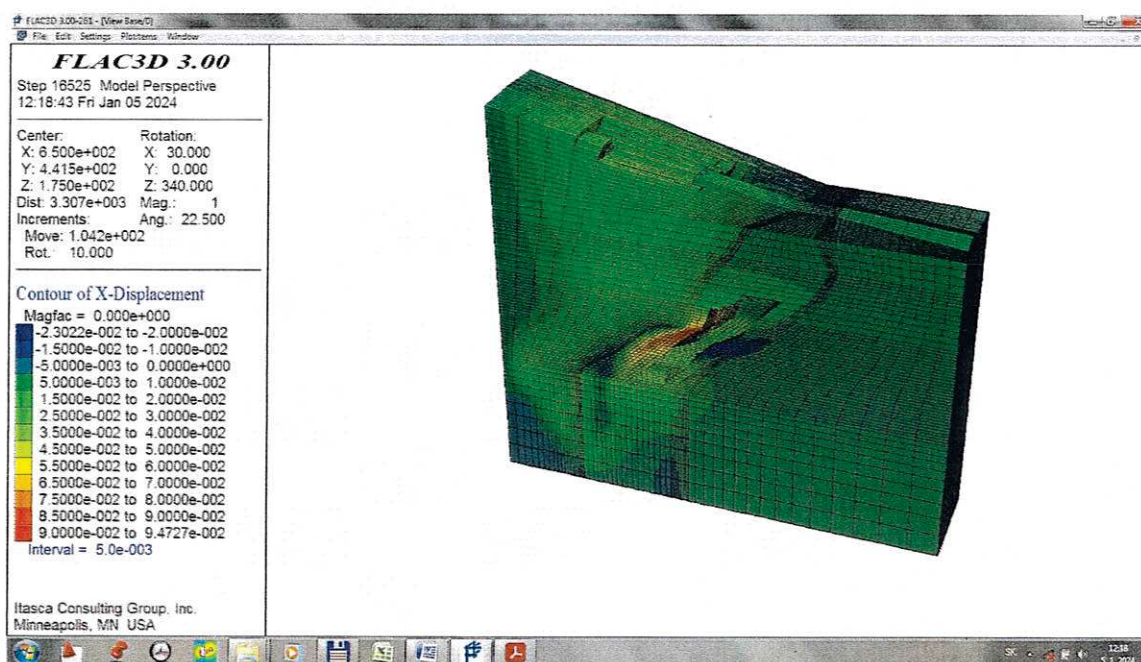
Obr. 54: Horizontálne deformácie v smere osi y



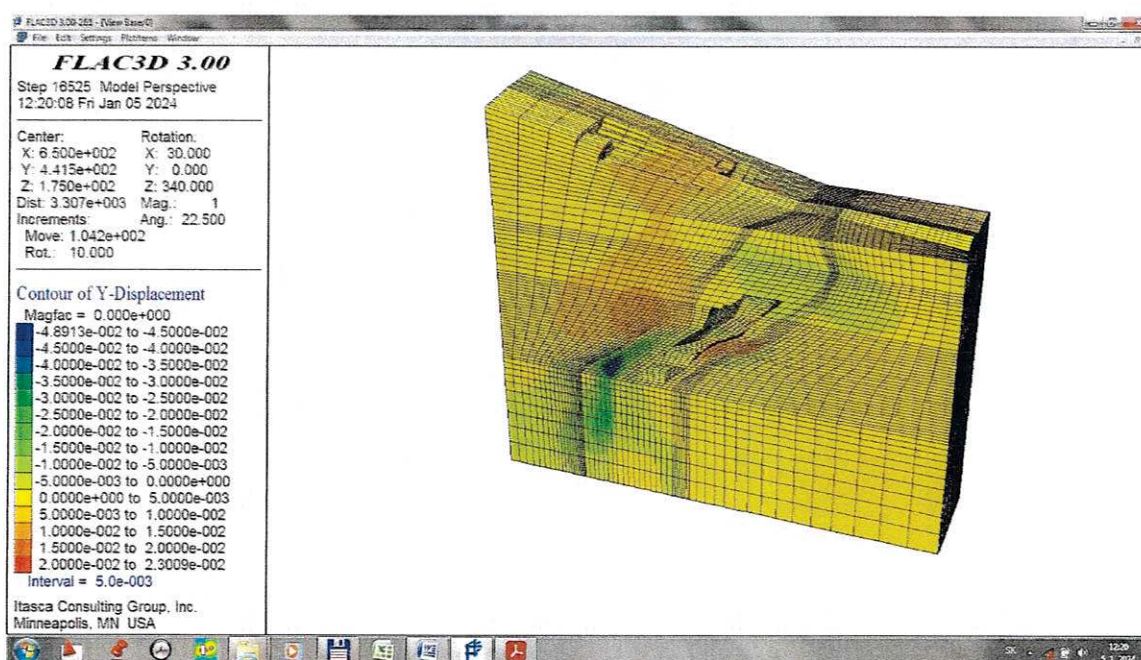
Obr. 55: Vertikálne deformácie v reze y = 475 m

Horizontálne deformácie v smere osi y dosahujú maximá na povrchu terénu na úrovni cca 2 cm (obr. 54). V porovnaní s variantom bez zdvíhu došlo k výraznejšiemu zníženiu pretvoreniu terénu o cca 15 cm (obr. 26).

Vertikálne deformácie terénu v reze y = 475 m dosahujú úrovne cca 10 – 12 cm. (obr. 55). Maximá v tomto reze sú v nadloží vápencových polôh.



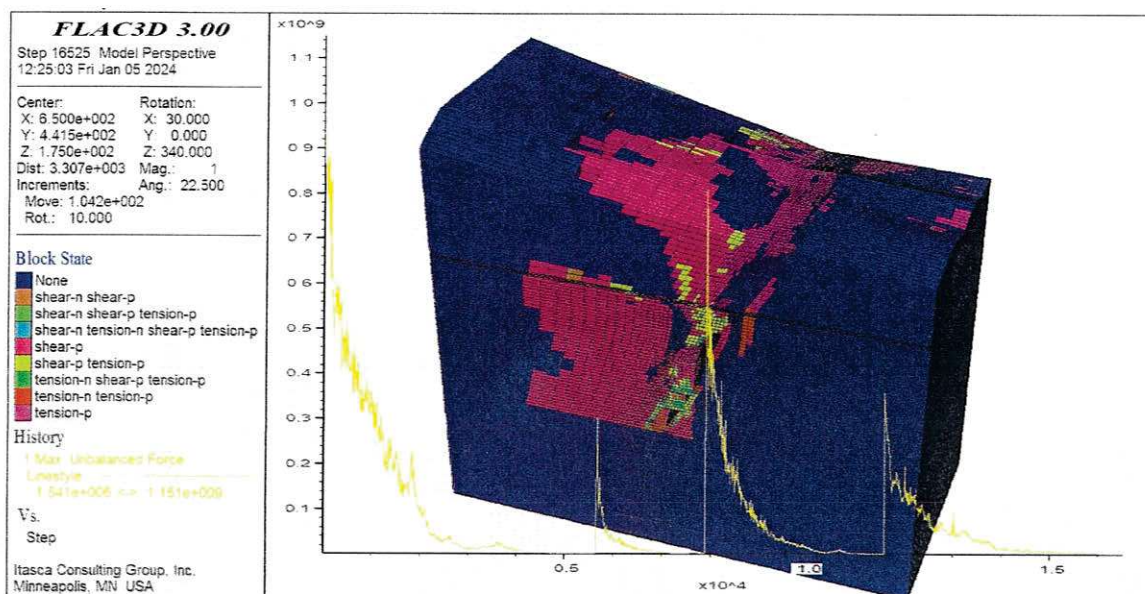
Obr. 56: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 475$ m



Obr. 57: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 475$ m

Horizontálne deformácie terénu v smere osi x v reze $y = 475$ m dosahujú maximálnej úrovne o veľkosti cca 1 cm. V nadloží ložiska sú maximá na úrovni cca 9 cm (obr. 56).

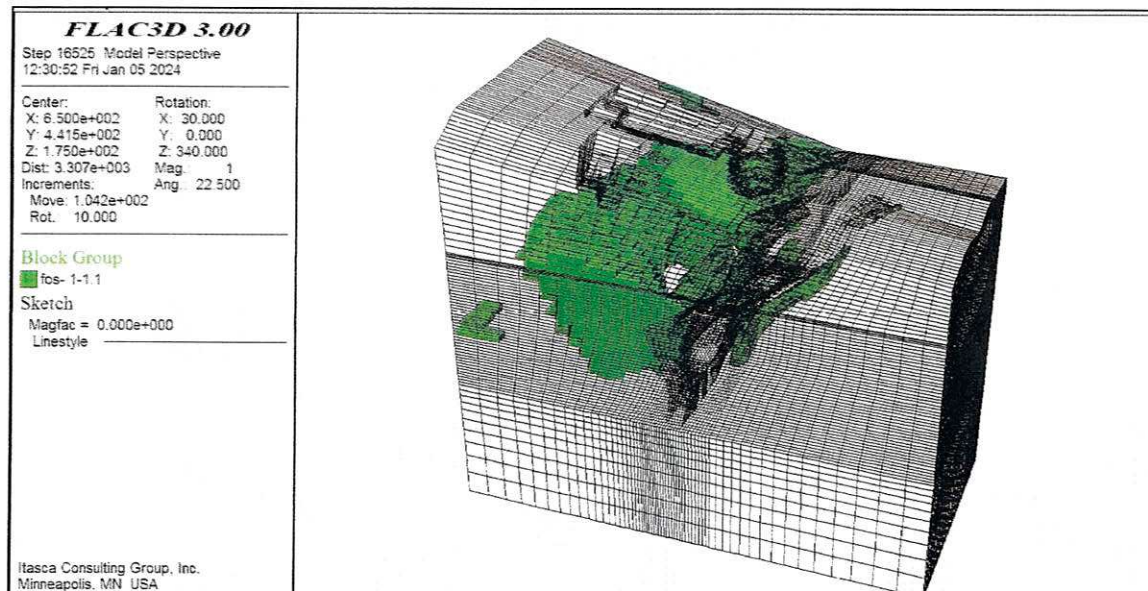
Horizontálne deformácie terénu v smere osi y v reze $y = 475$ m dosahujú maximá o veľkosti cca 1 – 2 cm (obr. 57). Vo variante bez zdvihu, sú terénne pretvorenia približne na rovnakej úrovni (obr. 35). V nadloží ložiska sú v tomto smere maximálne deformácie na úrovni cca 2 cm (obr. 35).



Obr. 58: Stav stability modelu a priebeh nevybalansovanej sily

Stabilita modelu pri variante so zdvihom terénu je dokumentovaná vyššie. V priebehu nevybalansovanej sily sú 4 vrcholy. Prvý vrchol (na začiatku súradnicovej osi) zodpovedá riešeniu počiatočnej nerovnováhy v suchom stave. Druhý peak signalizuje nerovnováhu pri inicializácii pórových tlakov, tretí vypovedá o nerovnováhe zapríčinennej znížením niektorých mechanických a pretvárných vlastností hornín úplne nasiaknutých vodou a posledný (štvrtý) vrchol zohľadňuje úpravu objemových hmotností hornín v schéme efektívnej hustoty pod hladinou banskej vody, čo sa prejaví v nerovnováhe výpočtového modelu, ktorá sa postupne dostáva do rovnovážneho - konvergujúceho stavu. Numerický model je po ukončení výpočtu v stabilnom stave (obr. 58).

Funkcia blok state signalizuje podobné podmienky v stave stability modelu ako vo variante bez zdvihu (obr. 45). V modeli so zdvihom došlo k miernemu nárastu zón s predispozíciou na šmykové alebo ťahové alebo kombinované porušenie v porovnaní s modelom bez zdvihu.

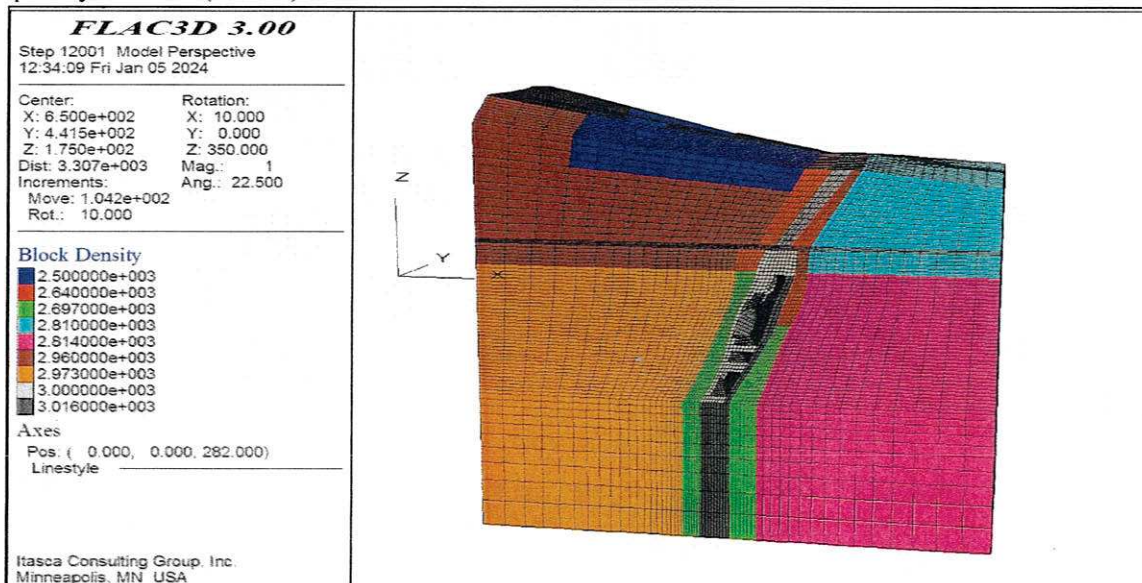


Obr. 59: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale $<1-1,1>$

Zóny so stupňami bezpečnosti $FoS < 1$ sa v modeli nevyskytujú. Z porovnania modelu bez zdvihu (obr. 47) a so zdvihom (obr. 59) vyplýva, že počet zón so stupňami bezpečnosti v intervale $<1-1,1>$ podľa Mohr-Coulombovej teórie je približne rovnaký ako pri variante so zdvihom.

6.3 Posúdenie stavu stability horninového masívu pre úroveň zatopenia po V. obzor

Podobne ako pri zatopení ložiska po úroveň VII. obzoru, tak aj vo variante zatopenie ložiska po V. obzor, došlo k úprave objemových hmotností hornín pod a nad hladinou implementovaných pórových tlakov (obr. 60).

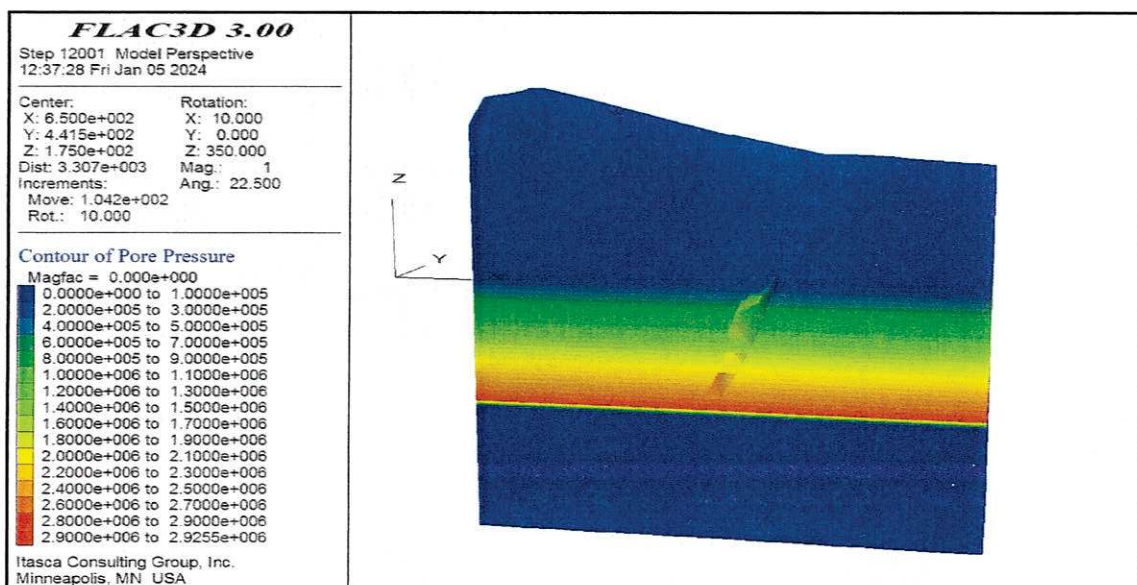


Obr. 60: Objemové hmotnosti hornín

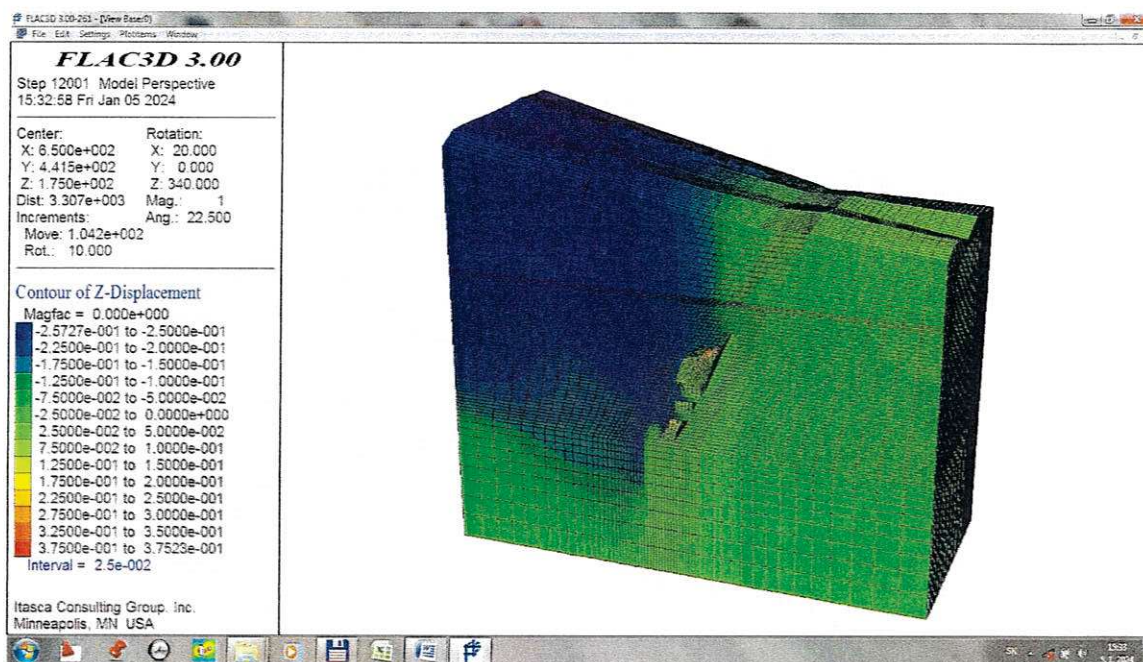
Objemové hmotnosti saturovaných hornín boli vypočítané podľa vzťahu $\gamma_{\text{sat}} = (1-n) \times \rho \times g + n \times \rho_w \times g$, kde n je pórovitosť, ρ – objemová hmotnosť hornín, ρ_w – objemová hmotnosť hornín a g – gravitačné zrýchlenie.

6.3.1 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastností hornín

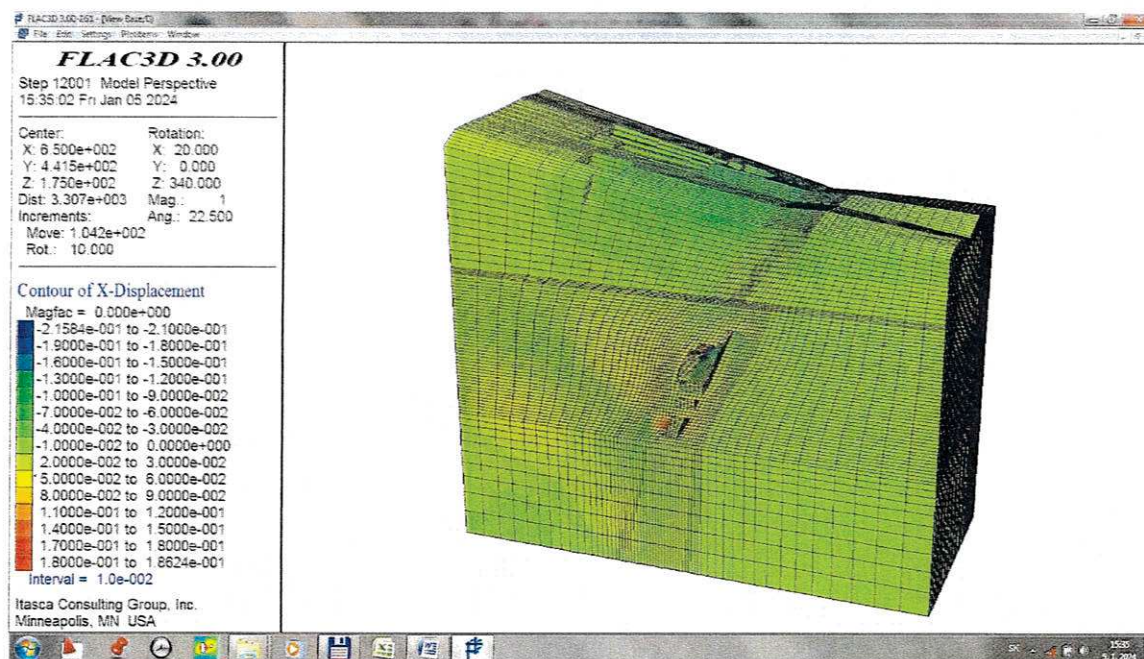
V tejto podkapitole po výpočte napäťovo-deformačného stavu komplexného modelu v suchom stave a znulovaní deformácií, rýchlosti a stavu stability boli inštalované pórové tlaky (pore pressure) resp. banská voda na úroveň V. obzoru – 282 m n. m. (obr. 61) a následne znížené vlastnosti pre stav úplného nasiaknutia hornín. Pore pressure (Pp) boli inicializované po celej šírke a dĺžke 3D modelu na požadovanú výšku. Spodná úroveň Pp bola zadefinovaná ako pri zatopení hor. VII.



Obr. 61: Inicializácia pórových tlakov po úroveň 282 m n. m.



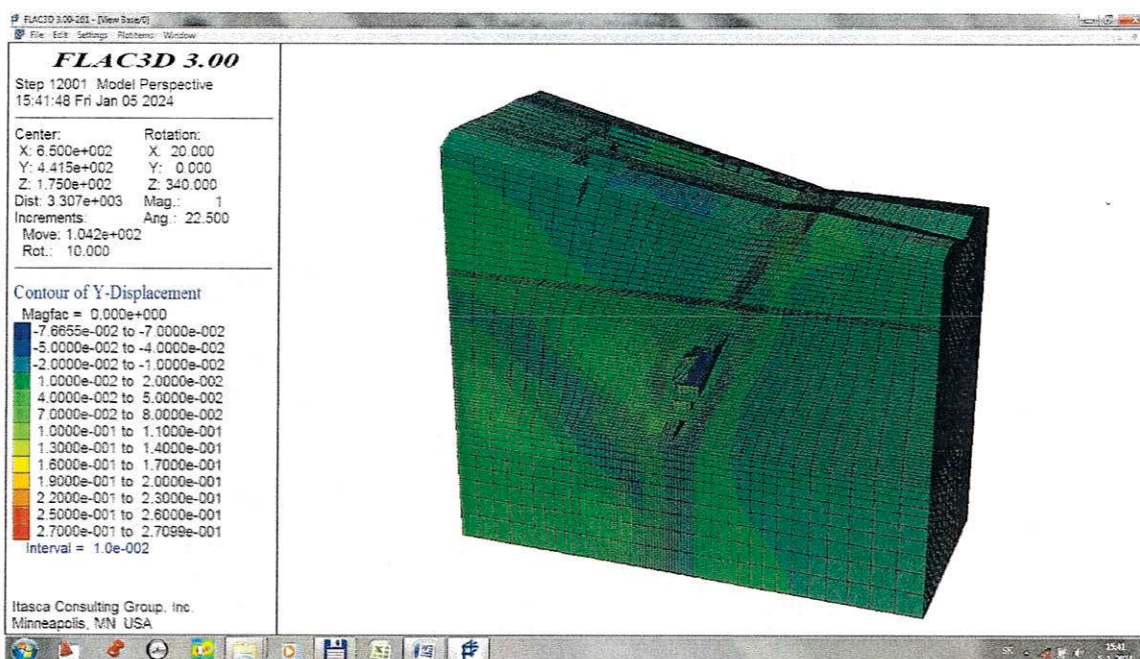
Obr. 62: Vertikálne deformácie v reze $y = 225 \text{ m}$



Obr. 63: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 225 \text{ m}$

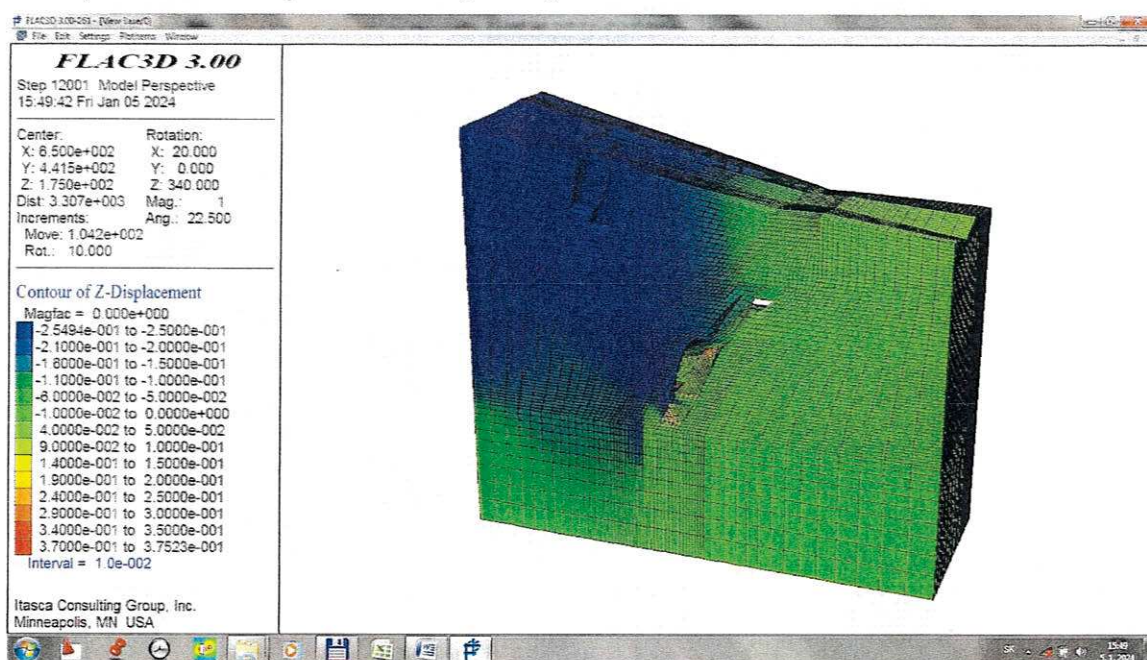
Vertikálne deformácie povrchu terénu s maximom cca 26 cm sa sústreďujú na ľavej strane modelu vo vyššom nadloží ložiska v oblasti vápencov (obr. 62).

Maxima horizontálnych deformácií v smere osi x sa koncentrujú aj do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 10 - 13 cm (obr. 63). V spodnej časti modelu smerom do nadložia sú maximálna hor. deformácií o veľkosti cca 18 cm (obr. 63).



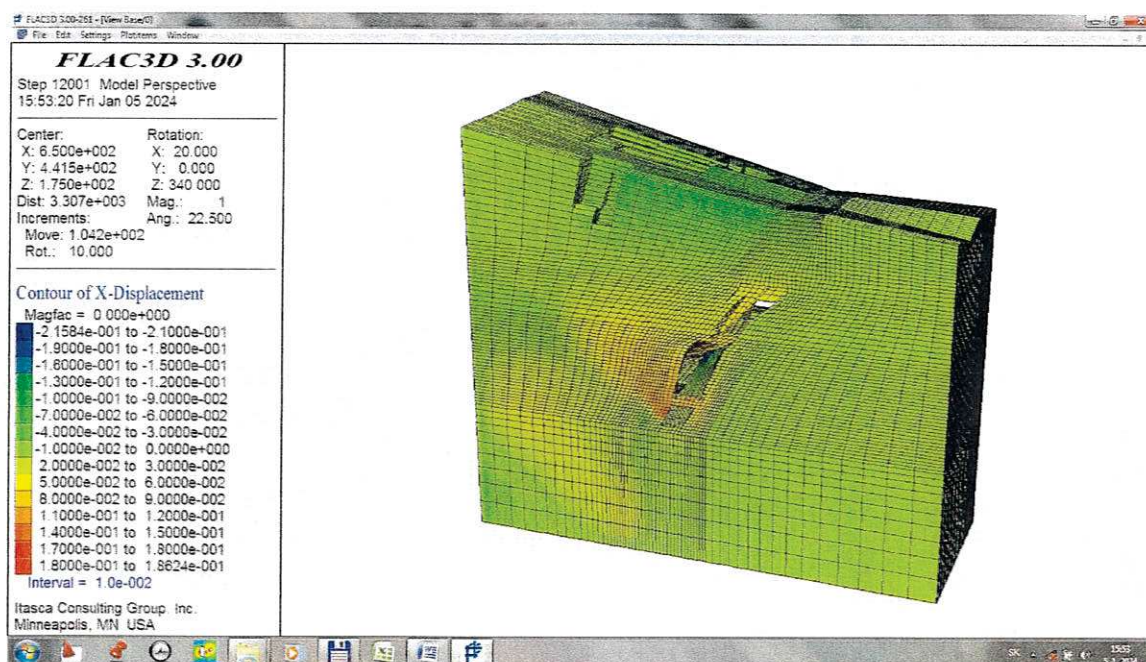
Obr. 64: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 225 m

Najmenšie bočné deformácie sú v pozdĺžnej osi ložiska v smere osi y a maximá dosahujú hodnoty cca 2 – 5 cm na povrchu terénu (obr. 64).



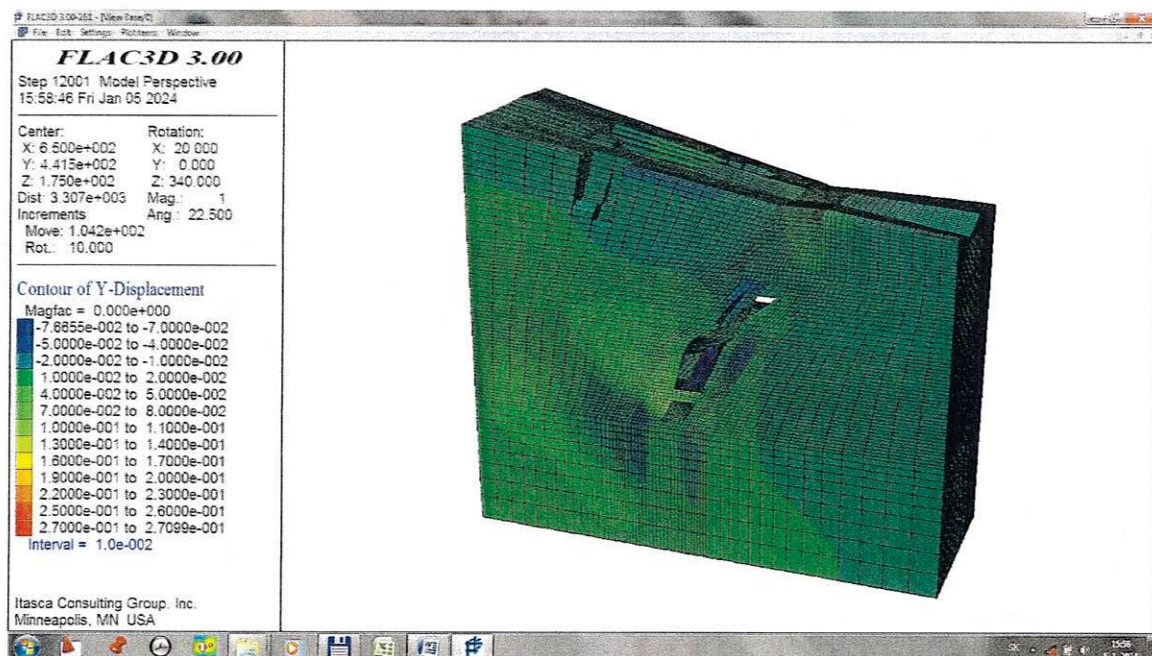
Obr. 65: Vertikálne deformácie v reze y = 301 m

Vertikálne deformácie povrchu terénu s maximom cca 25 cm sa sústreďujú na ľavej strane modelu vo vyššom nadloží ložiska v oblasti polohy vápencov (obr. 65).



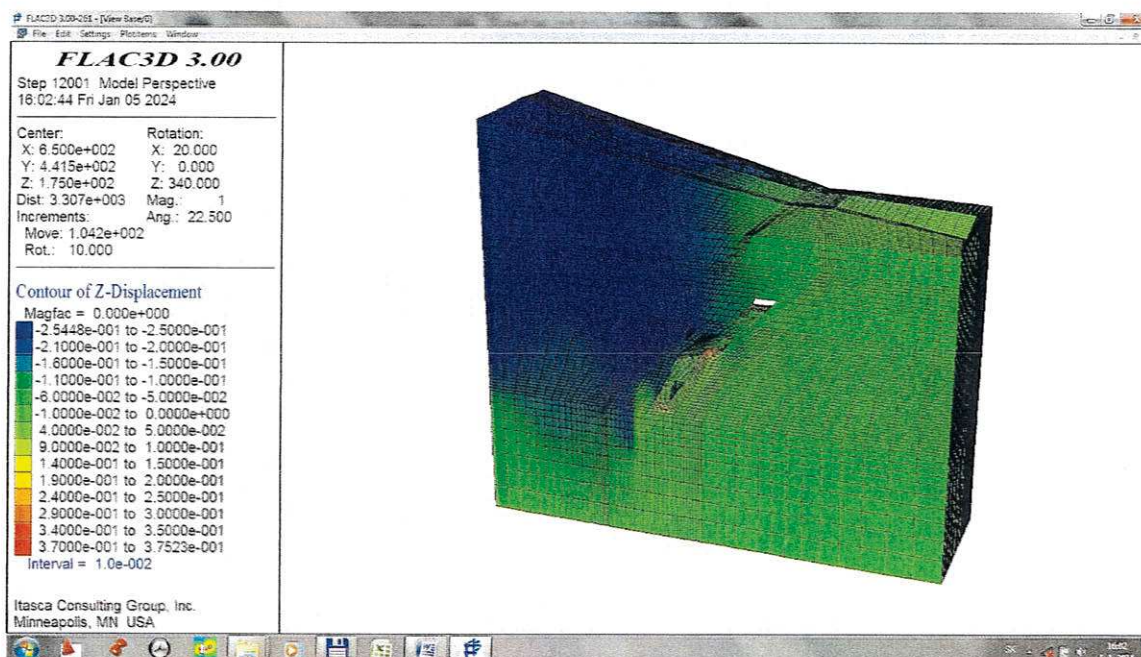
Obr. 66: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 301$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x na povrchu terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 10 - 13 cm (obr. 66). V spodnej časti ložiska v nadloží sa nachádzajú maximá posunutí o veľkosti cca 18 cm (obr. 66).



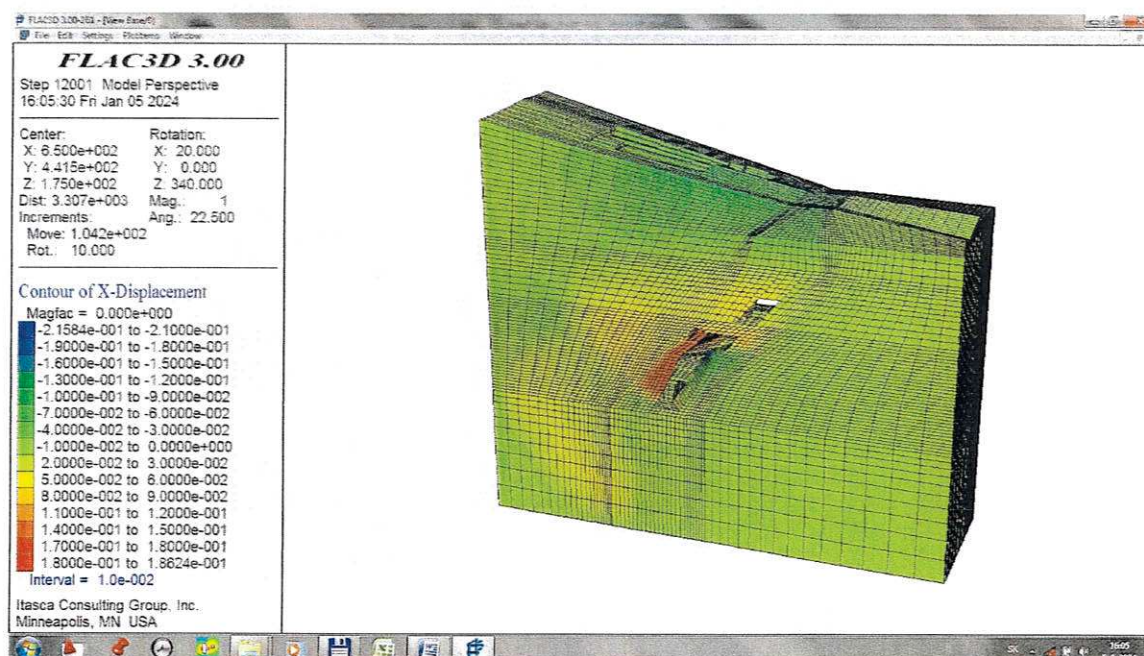
Obr. 67: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 301$ m

Najmenšie bočné deformácie sú v pozdĺžnej osi ložiska v smere osi y a maximá dosahujú hodnoty cca 2 – 5 cm na povrchu terénu (obr. 67). V spodnej časti ložiska smerom do nadložia dosahujú maximá veľkosť cca 10 cm (obr. 67).



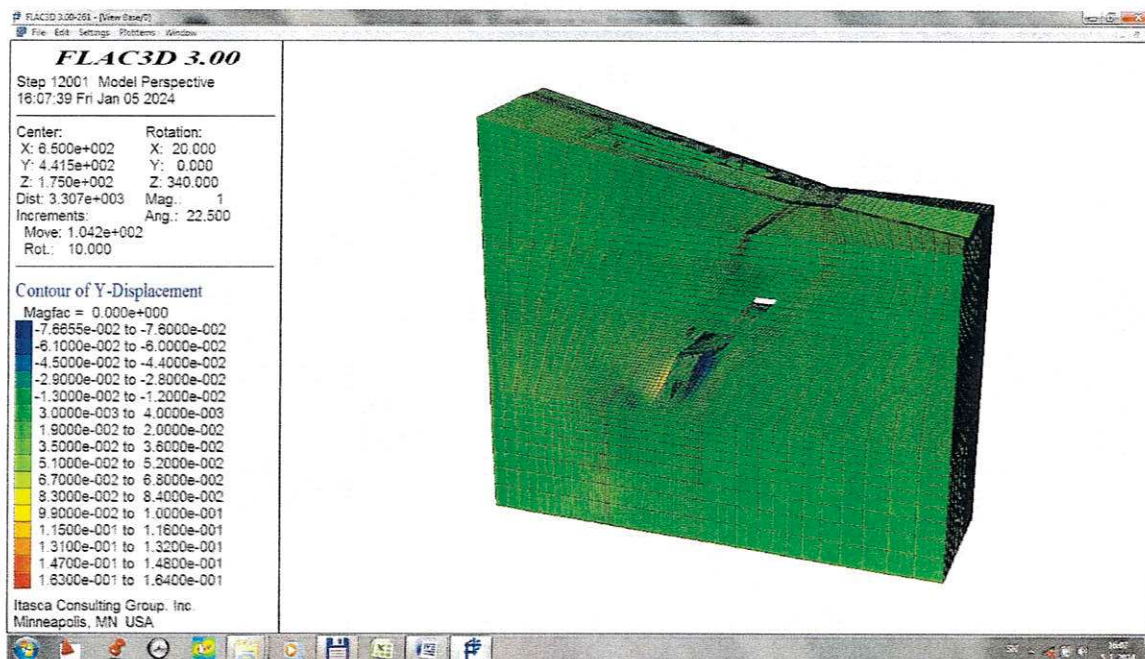
Obr. 68: Vertikálne deformácie v reze $y = 377$ m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze $y = 377$ m sa koncentrujú hlavne na povrchu modelu v oblasti vyššieho nadložia s hodnotami cca 25 cm. V nadloží nad polohami bridlíc dosahujú maximá zvislých deformácií hodnoty cca 20 cm (obr. 68).



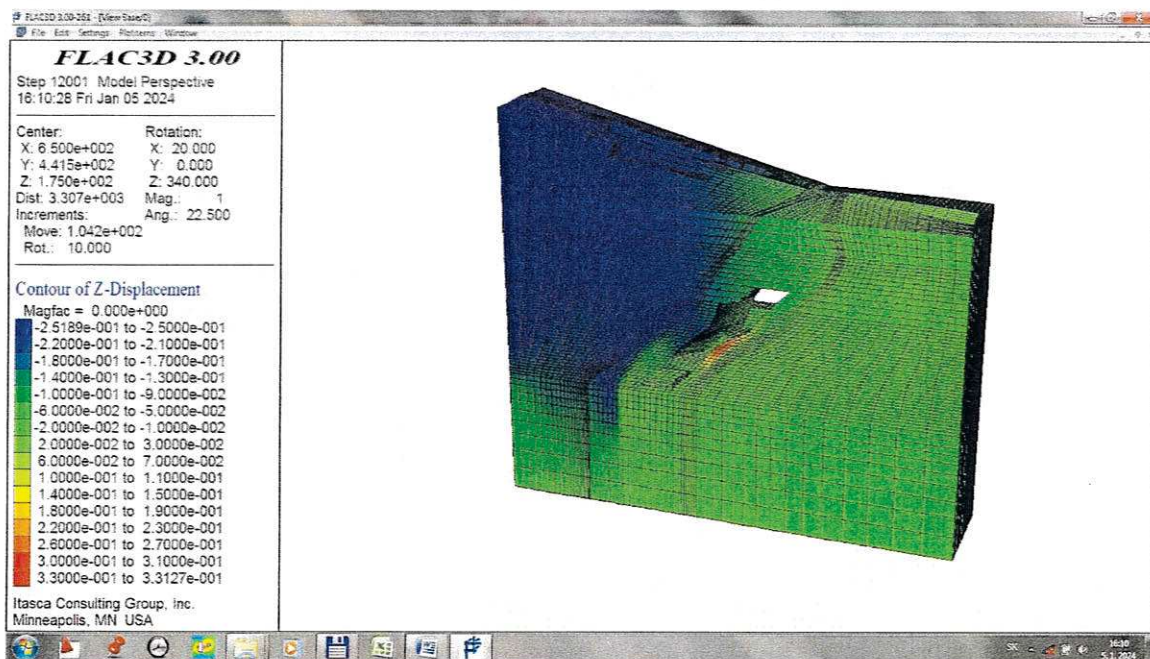
Obr. 69: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 377$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 10 - 13 cm (obr. 69). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 18 cm (obr. 69).



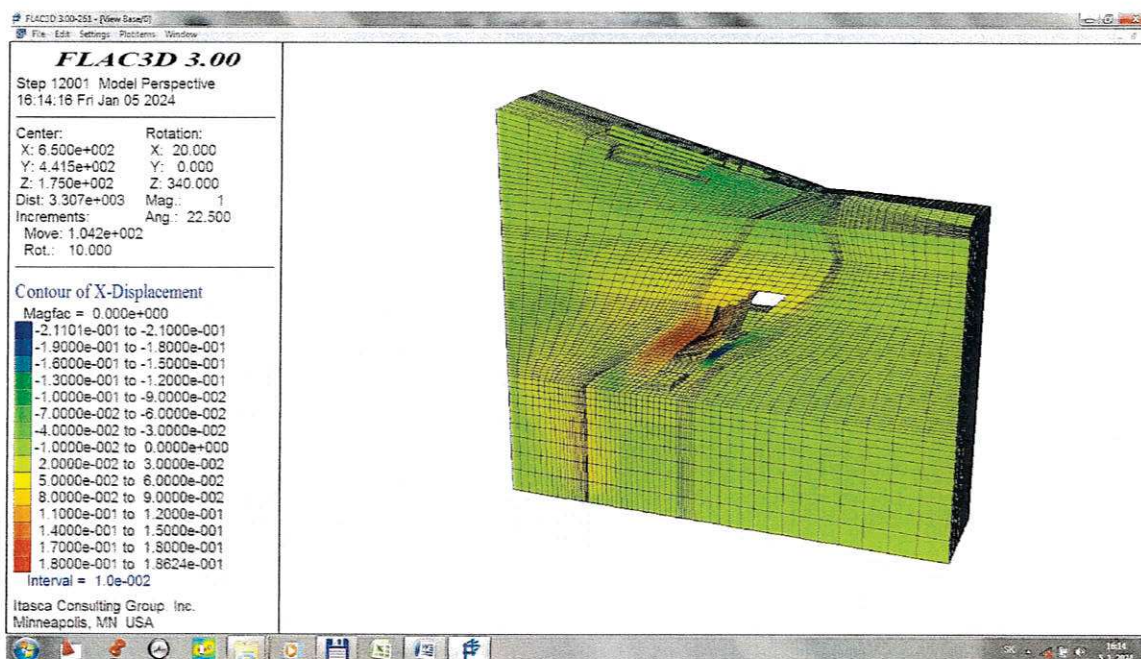
Obr. 70: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 377 m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 1 - 3 cm (obr. 70). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 cm, v oblasti spodných horizontov smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 7 - 10 cm (obr. 70).



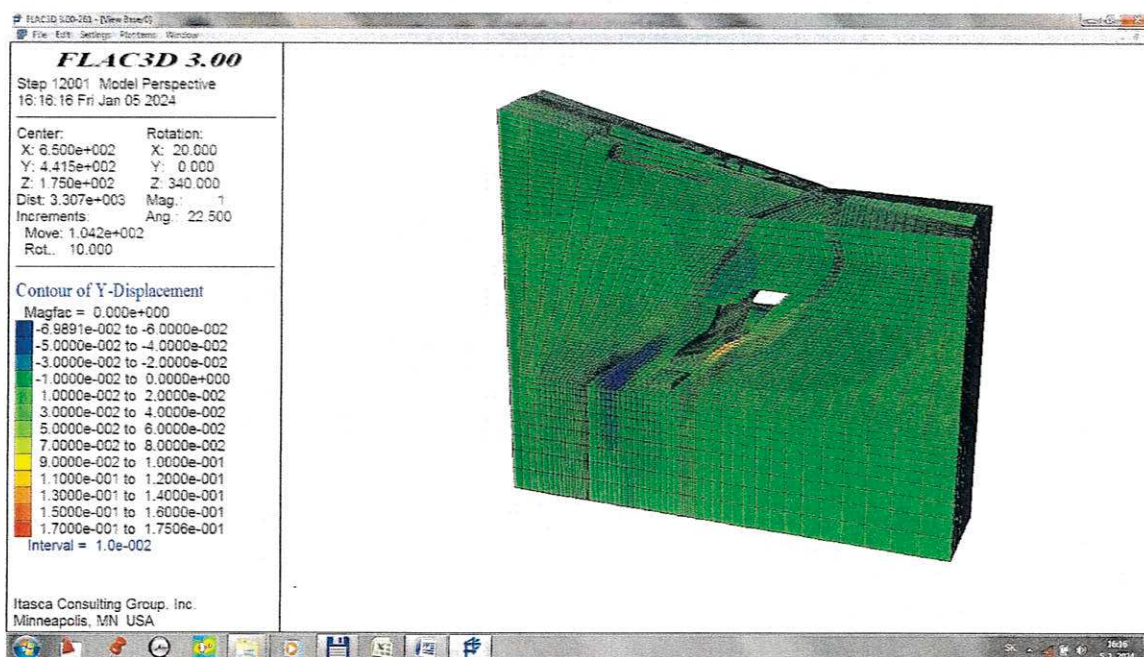
Obr. 71: Vertikálne deformácie v reze y = 475 m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze y = 475 m sa koncentrujú v podloží ložiska a dosahujú hodnoty cca 33 cm. Na povrchu modelu v oblasti vyššieho nadložia sa hodnoty deformácií terénu pohybujú na úrovni cca 22 - 25 cm (obr. 71) podobne ako v predchádzajúcich rezoch.



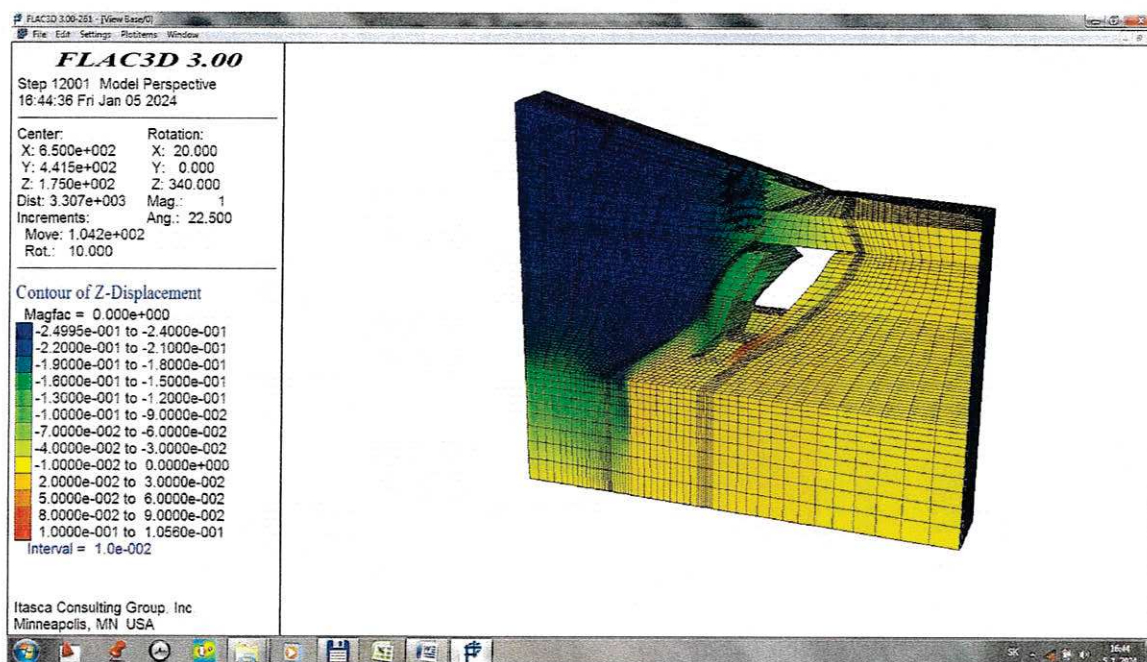
Obr. 72: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze y = 475 m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze y = 475 m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 10 - 13cm (obr. 72). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 18 cm (obr. 72).



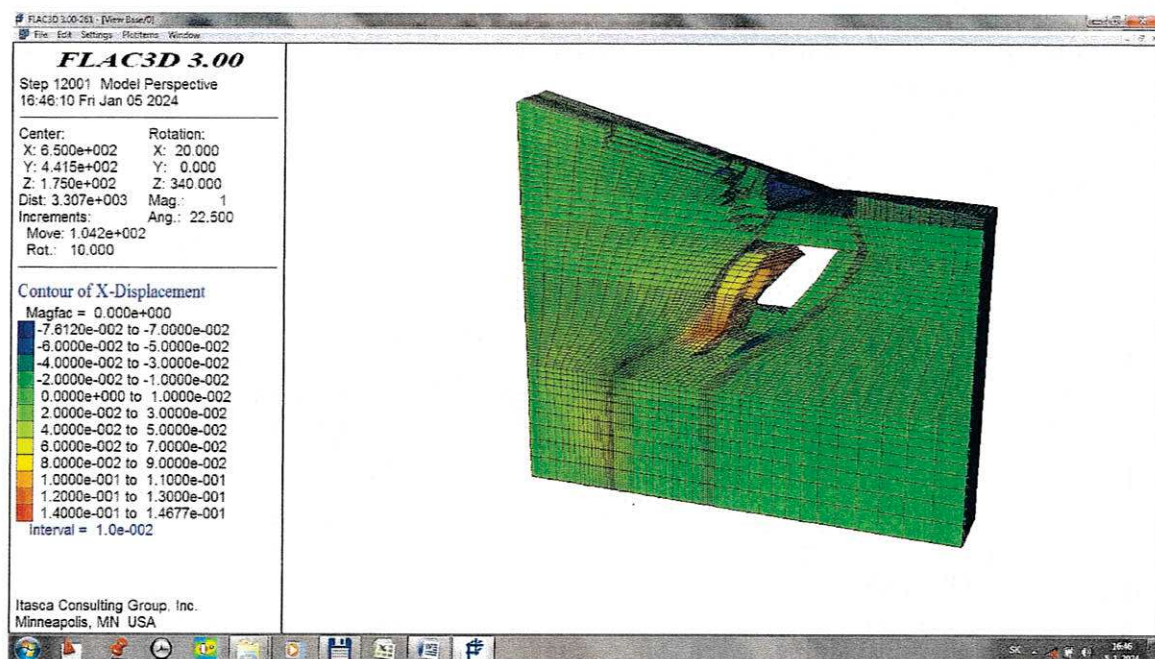
Obr. 73: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 475 m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 7 cm na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 73). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 - 2 cm, v oblasti podložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 10 - 13 cm (obr. 73).



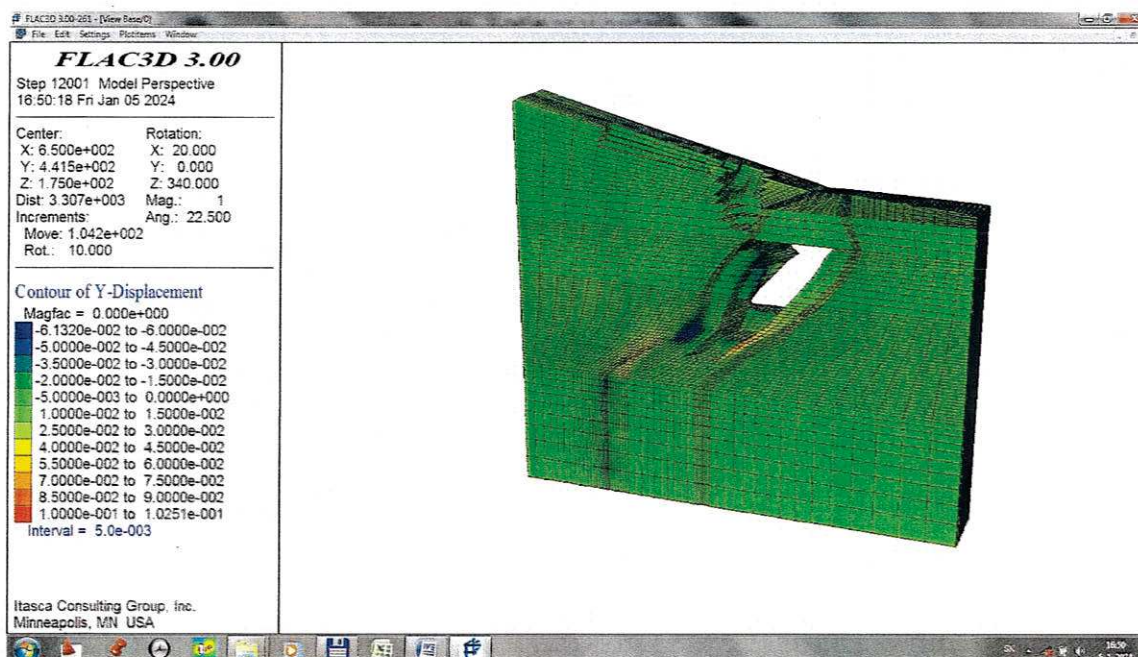
Obr. 74: Vertikálne deformácie v reze $y = 554$ m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze $y = 554$ m sa koncentrujú hlavne na povrchu modelu v oblasti vyššieho nadložia s hodnotami cca 25 cm (obr. 74) podobne ako v predchádzajúcich rezoch.



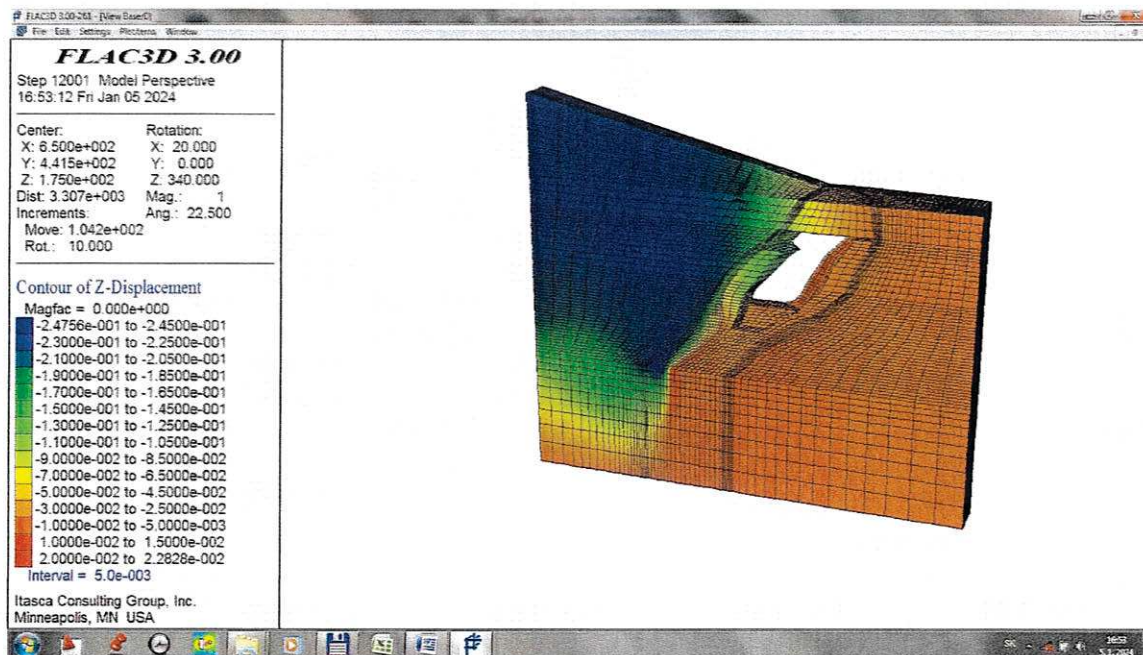
Obr. 75: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 554$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 554$ m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 8 cm (obr. 75). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 14 cm (obr. 75).



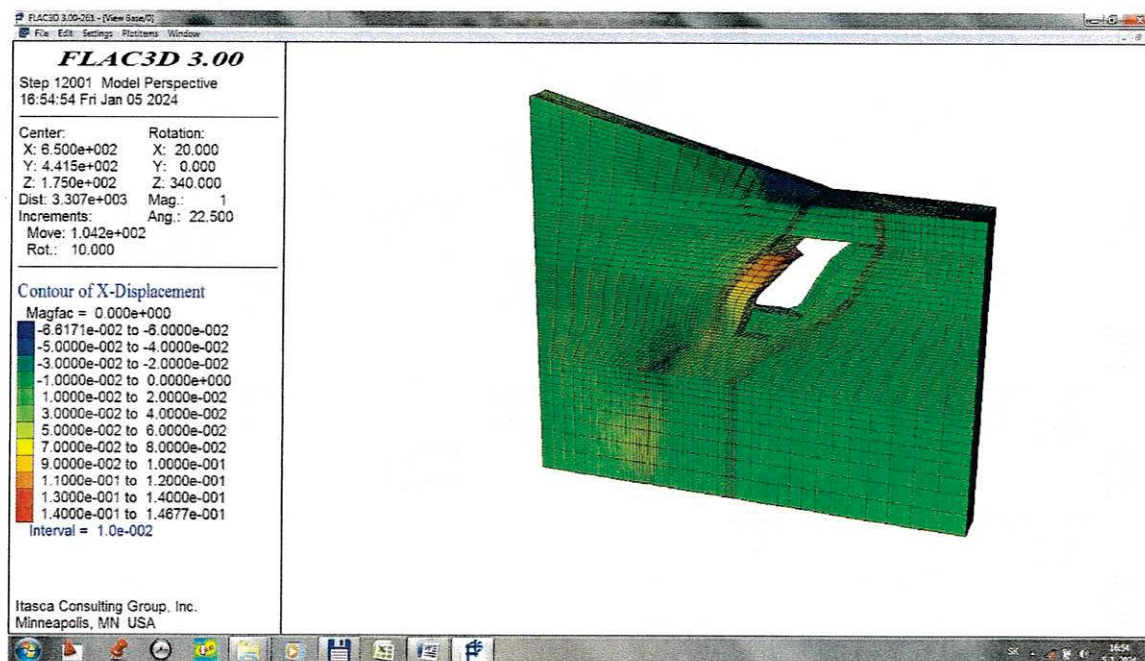
Obr. 76: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze y = 554 m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 6 cm na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 76). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 - 2 cm, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do podložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 10 cm (obr. 76).



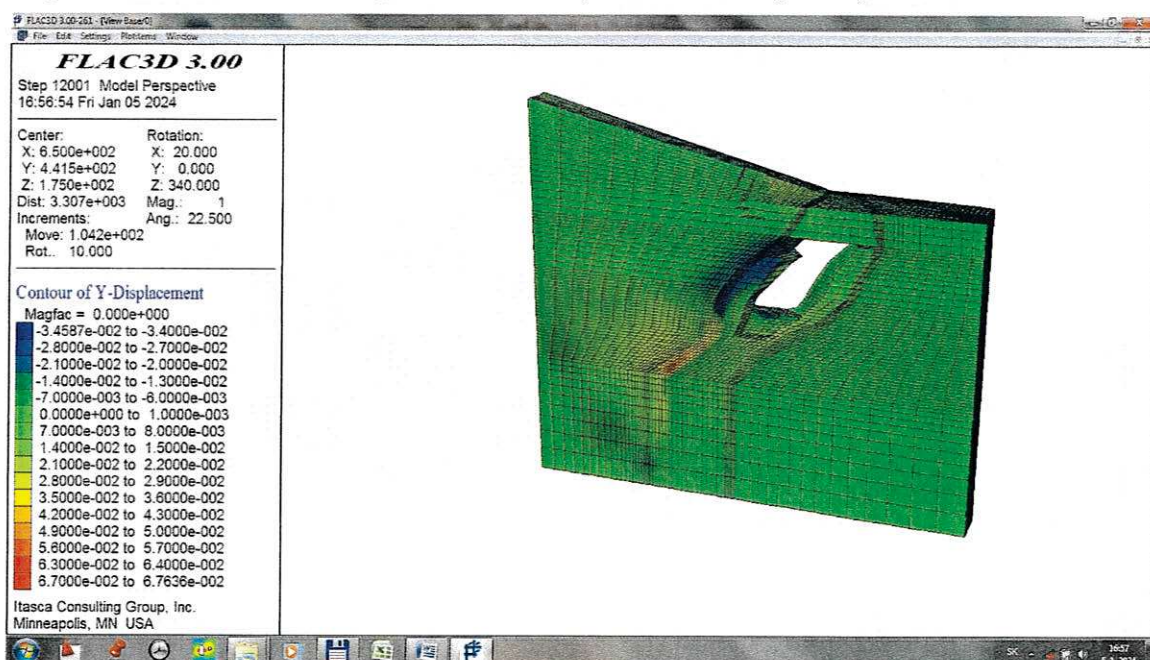
Obr. 77: Vertikálne deformácie v reze y = 620 m

Maximálne hodnoty vertikálnych deformácií v reze y = 620 m sa koncentrujú hlavne na povrchu modelu resp. terénu v oblasti vyššieho nadložía s hodnotami cca 23 - 25 cm (obr. 77) podobne ako v predchádzajúcich rezoch.



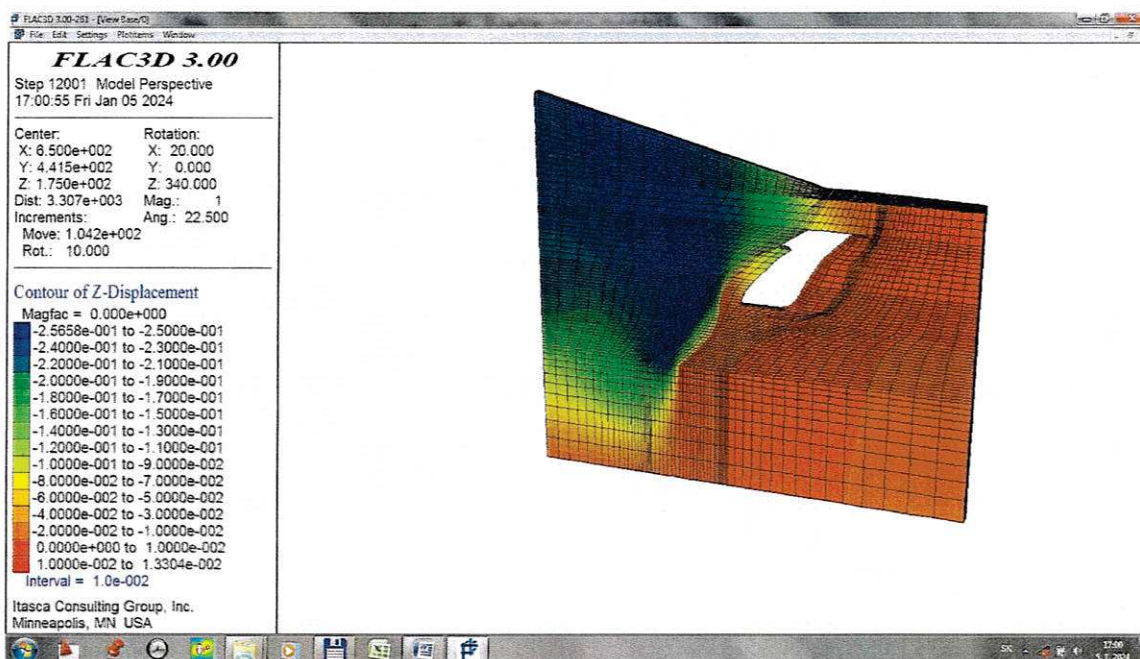
Obr. 78: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 620$ m

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 620$ m na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 7 cm (obr. 78). V oblasti bezprostredného nadložia dosahujú maximá hodnoty cca 10 - 15 cm (obr. 78).



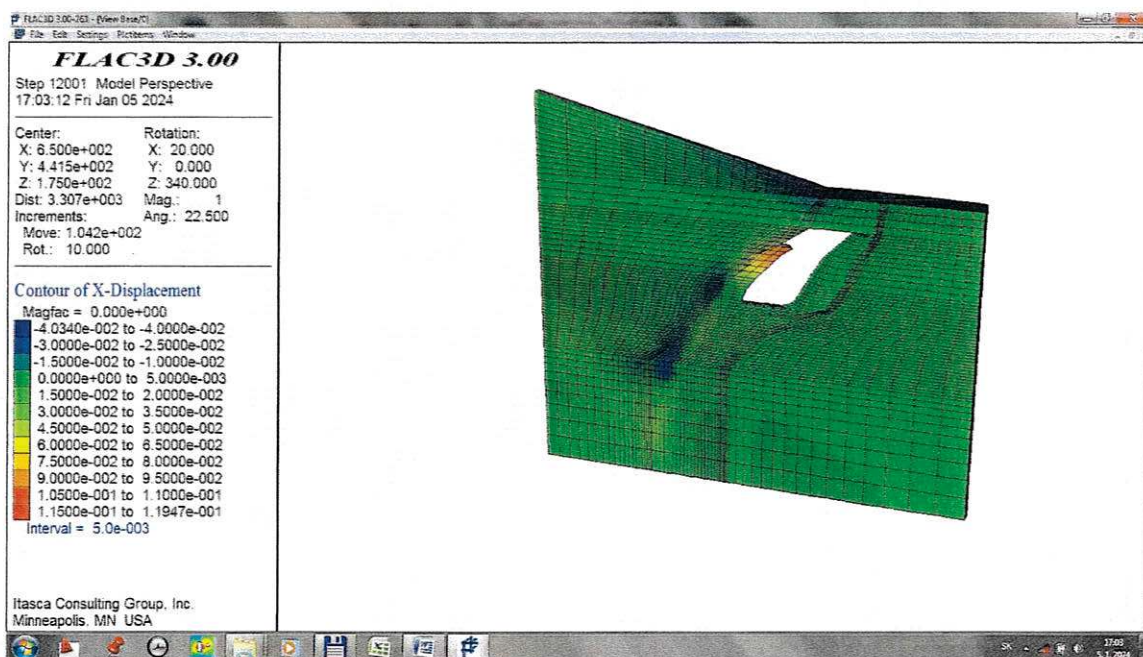
Obr. 79: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 620$ m

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 3 cm na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 79). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 cm, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 7 cm (obr. 79).



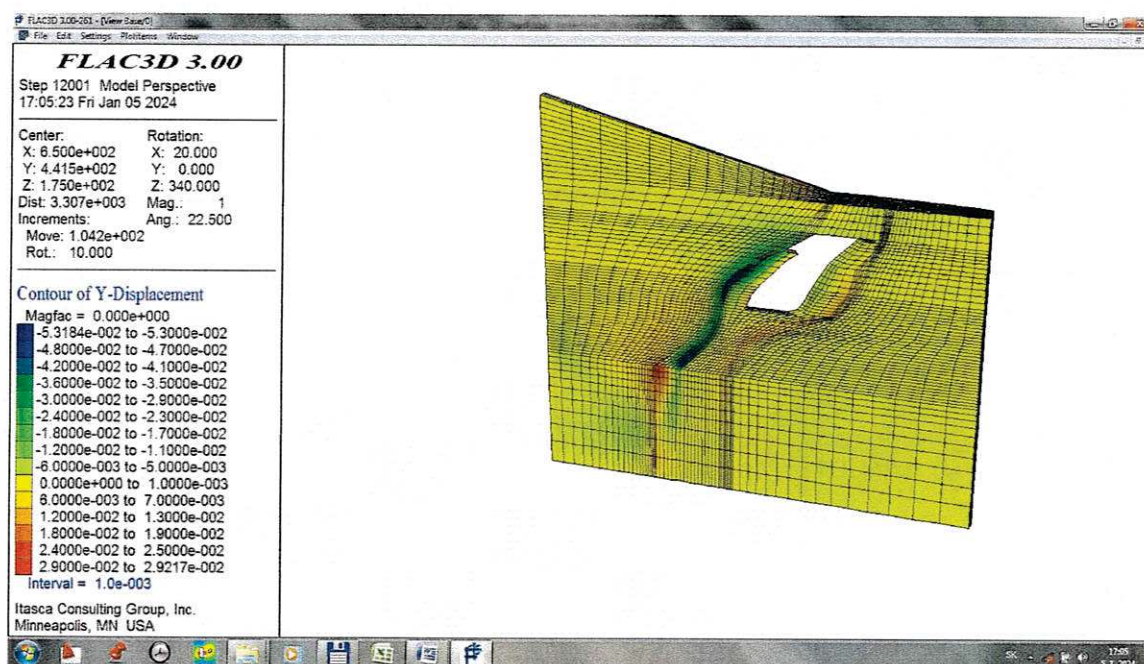
Obr. 80: Vertikálne deformácie v reze $y = 682 \text{ m}$

Hodnoty vertikálnych deformácií v reze $y = 682 \text{ m}$ sa koncentrujú na povrchu modelu resp. terénu o veľkosti cca 23 – 26 cm v oblasti vyššieho nadložia podobne ako v predchádzajúcich rezoch (obr. 80).



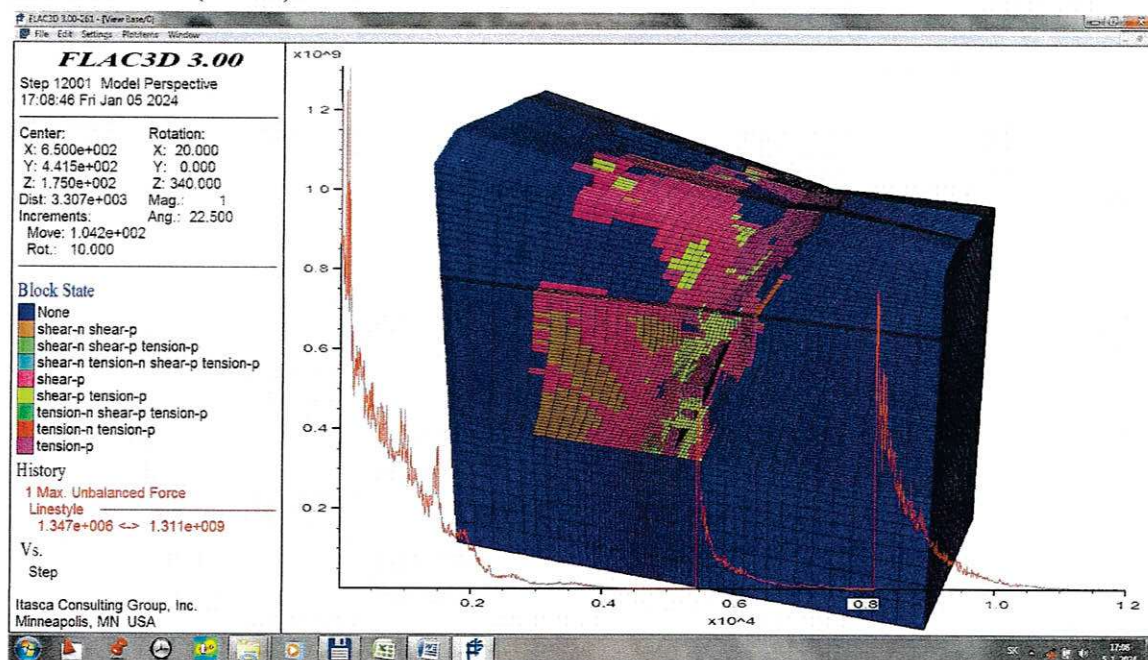
Obr. 81: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 682 \text{ m}$

Maximá horizontálnych deformácií v smere osi x v reze $y = 682 \text{ m}$ na povrchu modelu resp. terénu sa koncentrujú do oblasti závalov a dosahujú veľkosť cca 3 - 4 cm (obr. 81). V oblasti bezprostredného nadložia na spodných horizontoch dosahujú maximá hodnoty cca 10 cm (obr. 81).



Obr. 82: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 682 \text{ m}$

Najmenšie bočné deformácie v smere osi y sú v pozdĺžnej osi ložiska a maximá dosahujú hodnoty cca 5 cm na spodných horizontoch v nadloží ložiska (obr. 82). Na povrchu modelu dosahujú úrovne cca 1 cm, v oblasti pod spodnými horizontmi smerom do nadložia sú maximálne hodnoty na úrovni cca 3 cm (obr. 82).



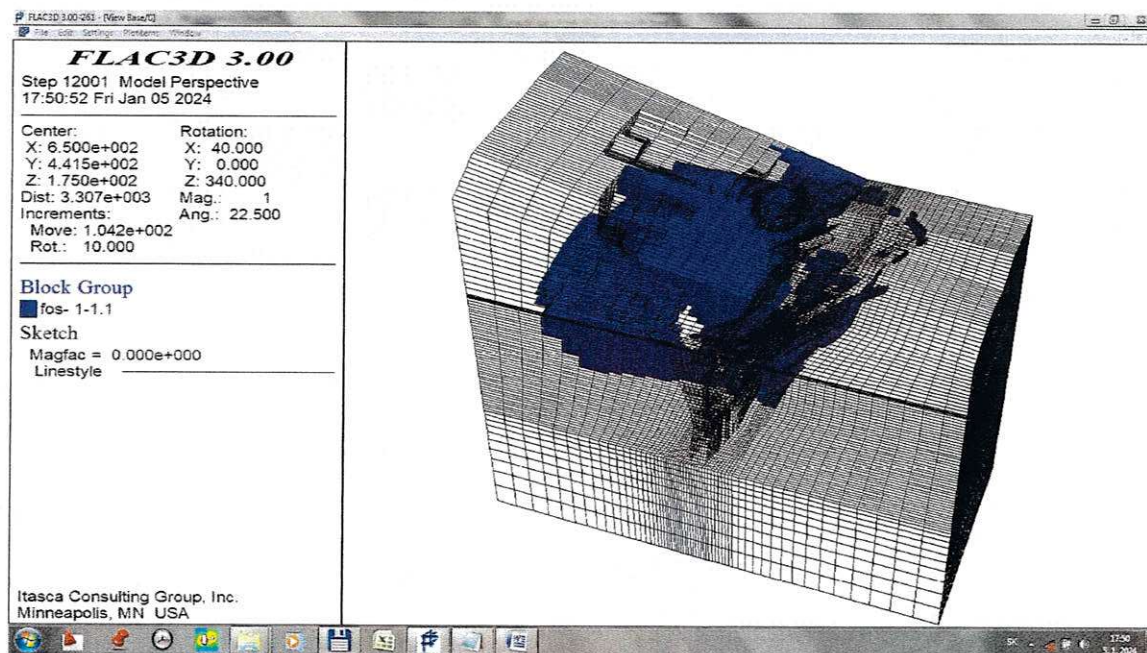
Obr. 83 : Stav stability modelu

Nevybalansovaná sila v prvom úseku z prvotnej nerovnováhy sa dostáva do stabilného stavu (konverguje k nule). V tejto etape riešenia je dosiahnutý rovnovážny stav pre suchý stav s vytvorením vydobytých priestorov. V druhom úseku riešenia sa model dostáva do čiastkovej nerovnováhy vplyvom inštalácie pórových tlakov na úrovni 282 m n. m., ktorá sa postupne preklolí do rovnováhy – riešenie konverguje k nule. V tretej etape riešenia sa model dostáva do nerovnováhy vplyvom zníženia

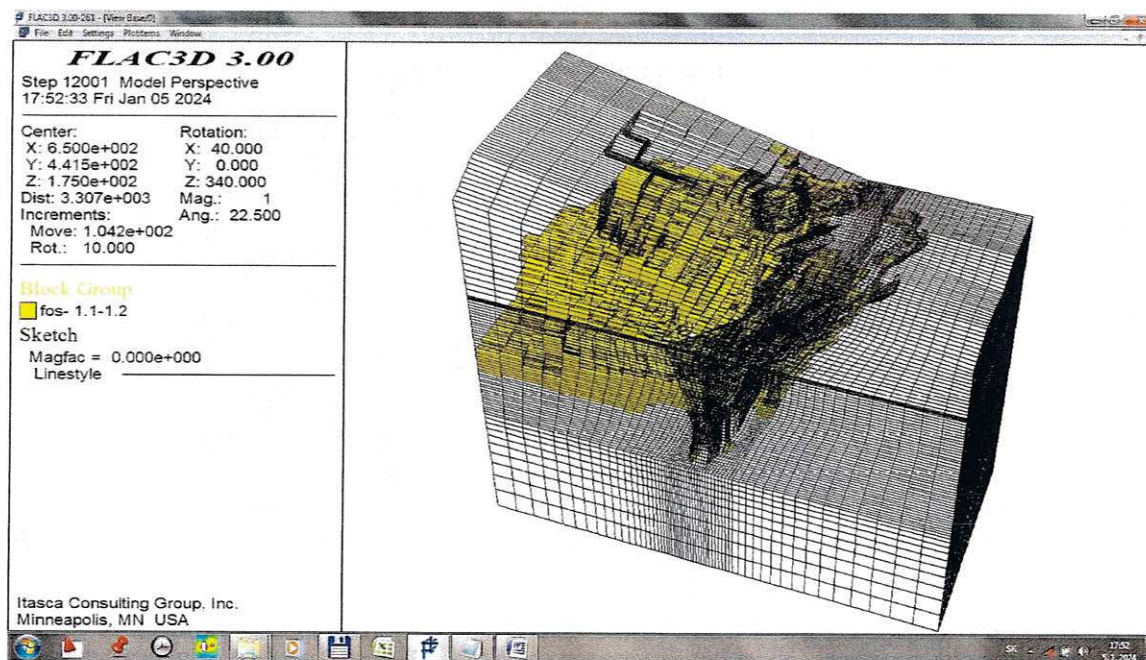
vlastností hornín nasiaknutých vodou s následnou konvergenciou k nule, t.j. systém sa aj po tomto kroku stabilizuje a je v konečnej rovnováhe, výpočet je ukončený v stabilnom stave (obr. 83).

Počet zón s porušovaním v šmyku, ťahu alebo v ich kombinácii (zóny s koncovkou *n*) je veľmi nízky, čo nespôsobuje totálnu stratu stability modelu, ale môžeme hovoriť o parciálnej stabilite modelu, ako reakcii na zatopenie a úpravu parametrov hornín pod hladinou banskej vody (obr. 83).

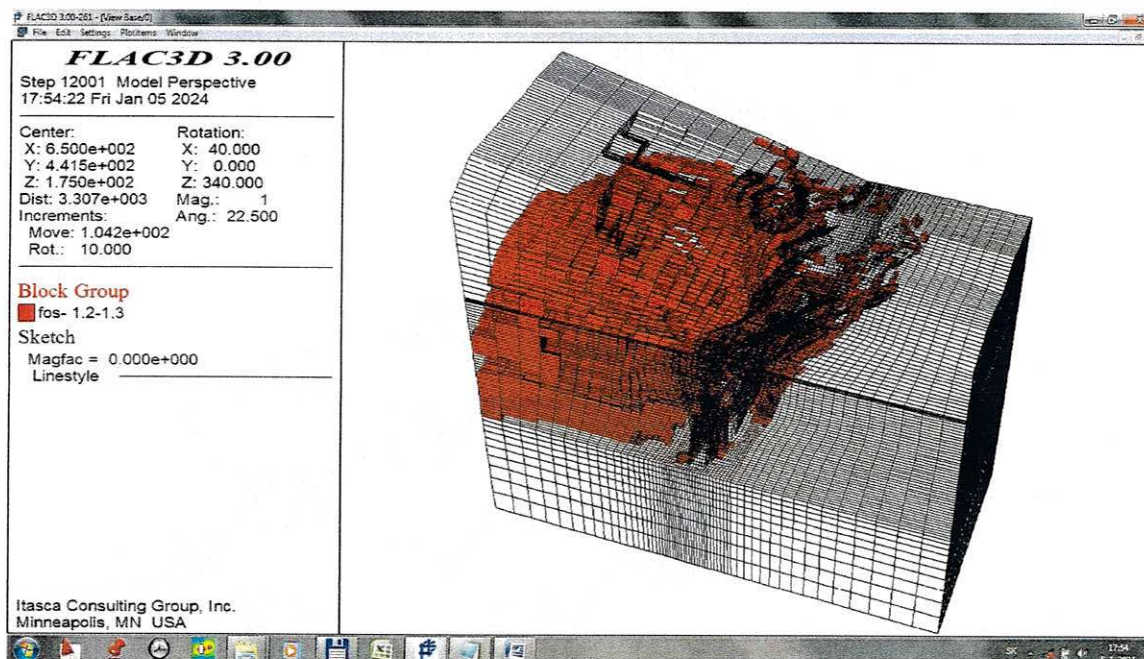
Zóny s rôznym typom nestabilit sa kumulujú hlavne do oblasti ložiskovej výplne a do jej nadložia v podzemí aj na povrchu modelu.



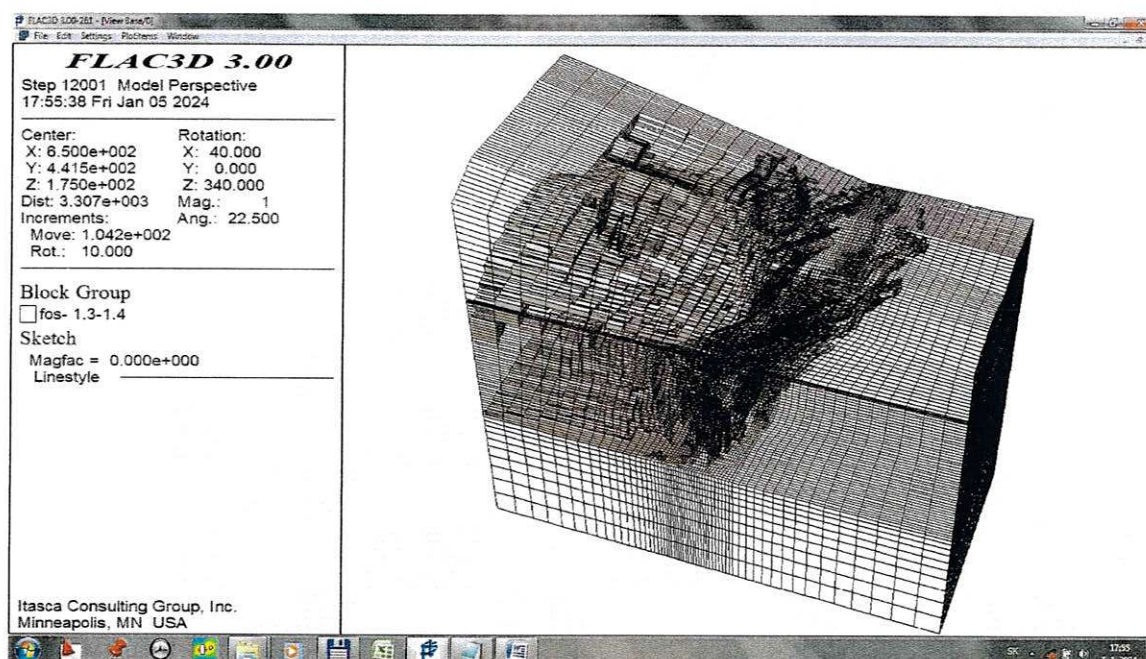
Obr. 84: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale $<1-1,1>$



Obr. 85: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale $<1,1-1,2>$



Obr. 86: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale <1,2-1,3>



Obr. 87: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale <1,3-1,4>

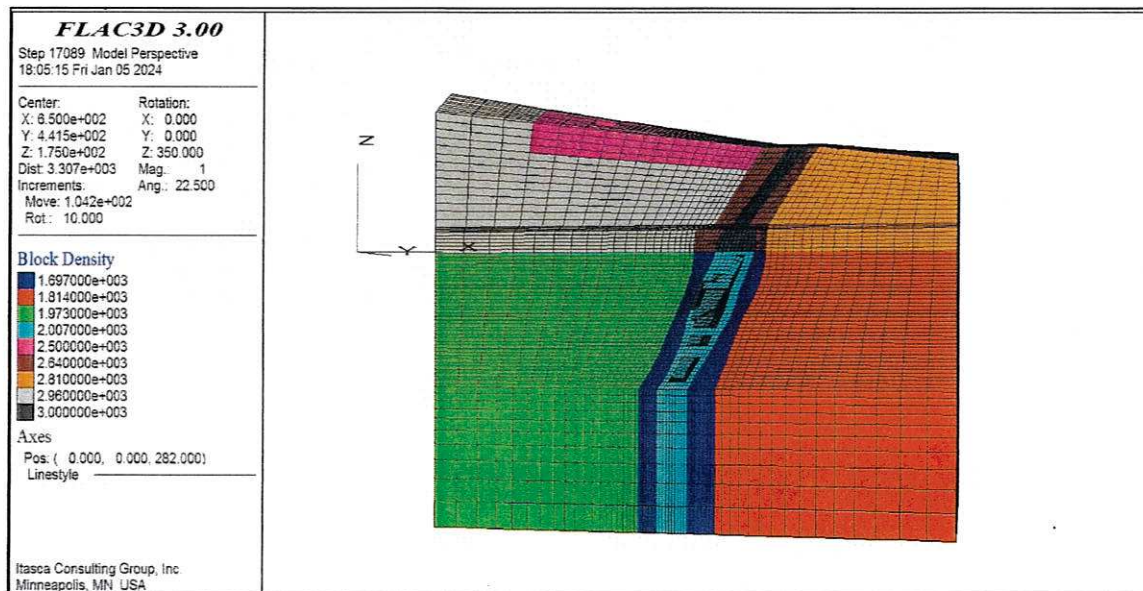
Na obr. 84 – 87 sú vykreslené jednotlivé zóny s príslušnými stupňami bezpečnosti FoS, ktoré boli vypočítané podľa Mohr-Coulombovej podmienky medzného vzťahu.

V modeli sa nevyskytujú zóny s FoS < 1. Zóny so stupňami bezpečnosti FoS v intervale <1-1,4> sa sústreďujú hlavne v oblasti ložiskovej výplne, kontaktov voľné priestory – nadložný pilier a v oblasti nadložia. Vyššie prezentované výstupy vo forme FoS sa vzťahujú na prípad nasadenia pórových tlakov a zníženia parametrov modelovaných typov hornín.

6.3.2 Inicializácia pórových tlakov, znížené vlastnosti hornín, uplift (zdvih) terénu

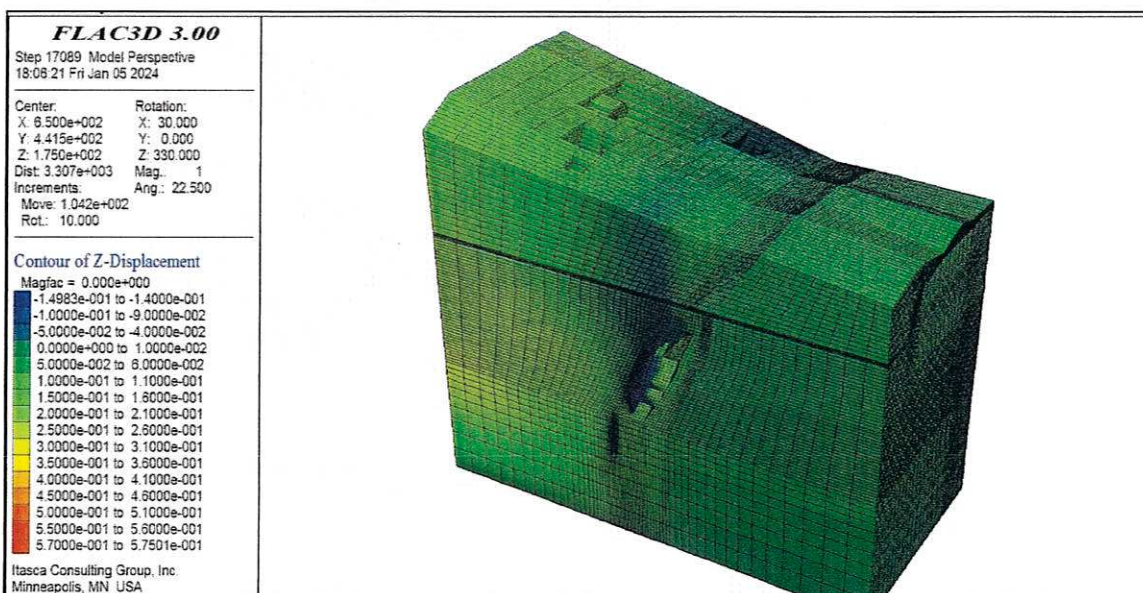
Podobne ako pre variant zatopenia ložiska po úroveň 172 m n. m. bol zrealizovaný výpočet zdvihu povrchu terénu aj pre úroveň zatopenia ložiská Lubeník 282 m n. m.

Efektívne hustoty boli použité po celej šírke a dĺžke modelu po úroveň pôsobenia pórových tlakov (obr. 88).



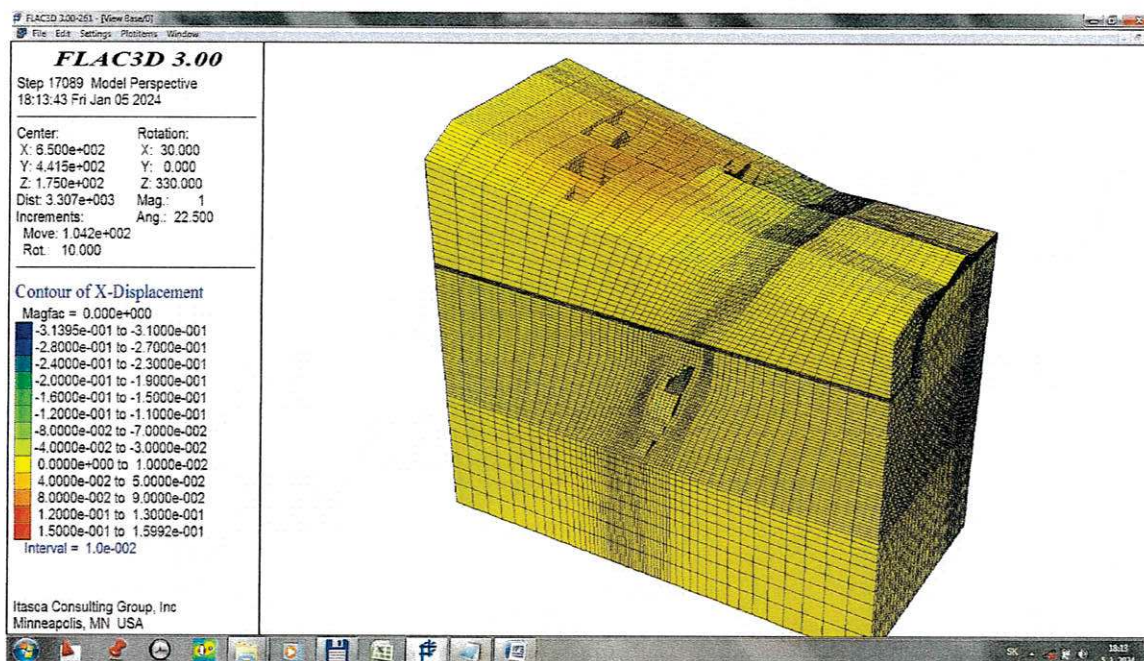
Obr. 88: Objemové hmotnosti hornín pod a nad hladinou podzemnej vody – efektívna hustota

V nasledujúci grafických výstupoch budú prezentované niektoré deformačné výstupy a stav stability modelu v celkovom pohľade a v cca polovici y – rezu modelu.



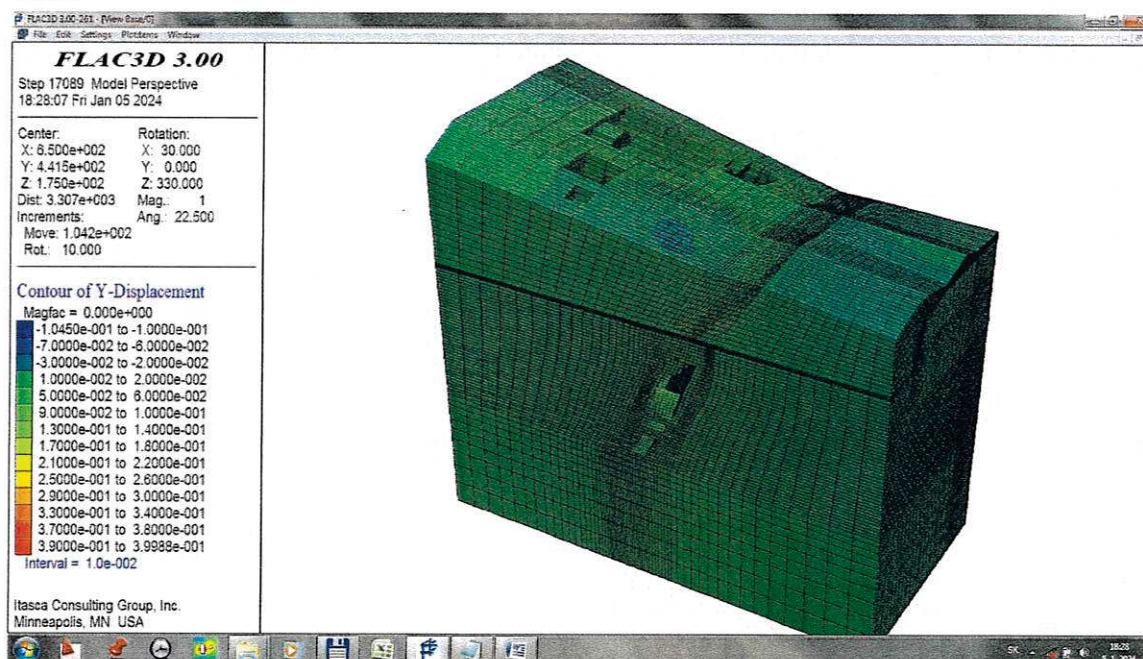
Obr. 89: Vertikálne deformácie – komplexný model

Vplyvom použitia simulačnej schémy na báze efektívnej hustoty sa maximálne hodnoty vertikálnych deformácií na povrchu terénu pohybujú na úrovni cca 15 cm (obr. 89). Deformácie v tomto prípade smerujú v smere gravitácie. V porovnaní s variantom bez uvažovania zdvihu (obr. 62), kde sú maximá na úrovni cca 25 cm, došlo k zníženiu vertikálnych deformácií o cca 10 cm.



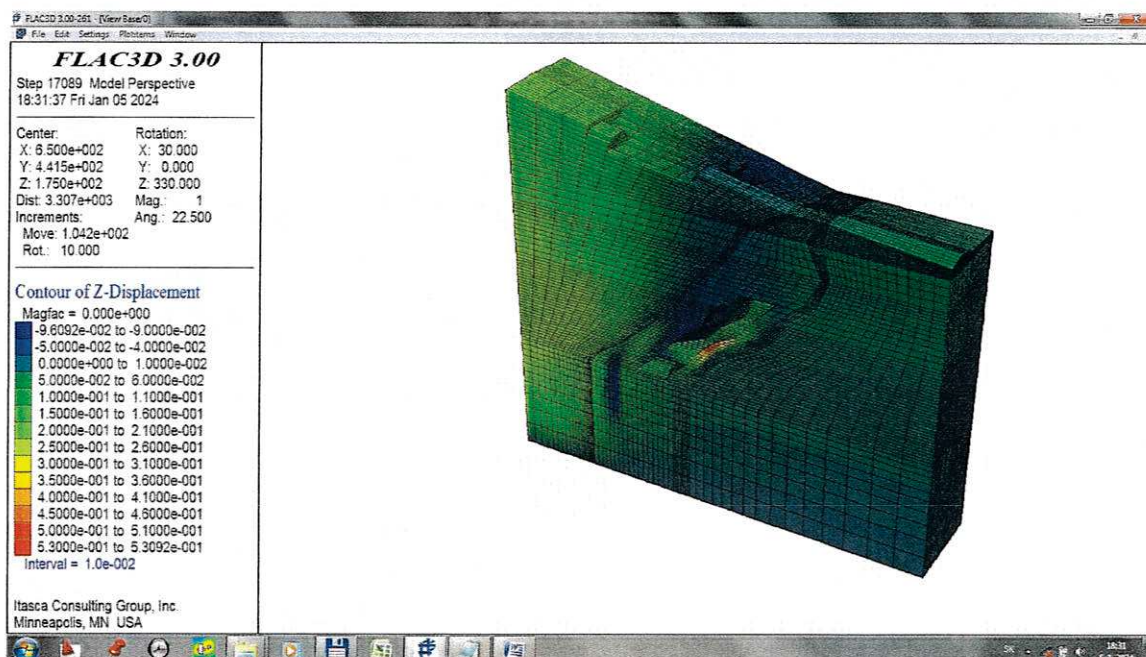
Obr. 90: Horizontálne deformácie v smere osi x

Horizontálne deformácie v smere osi x na povrchu terénu dosahujú maxim na úrovni cca 5 - 9 cm (obr. 90). V porovnaní s variantom bez upliftu (obr. 63), došlo k zníženiu poklesu terénu o cca 5 – 6 cm.



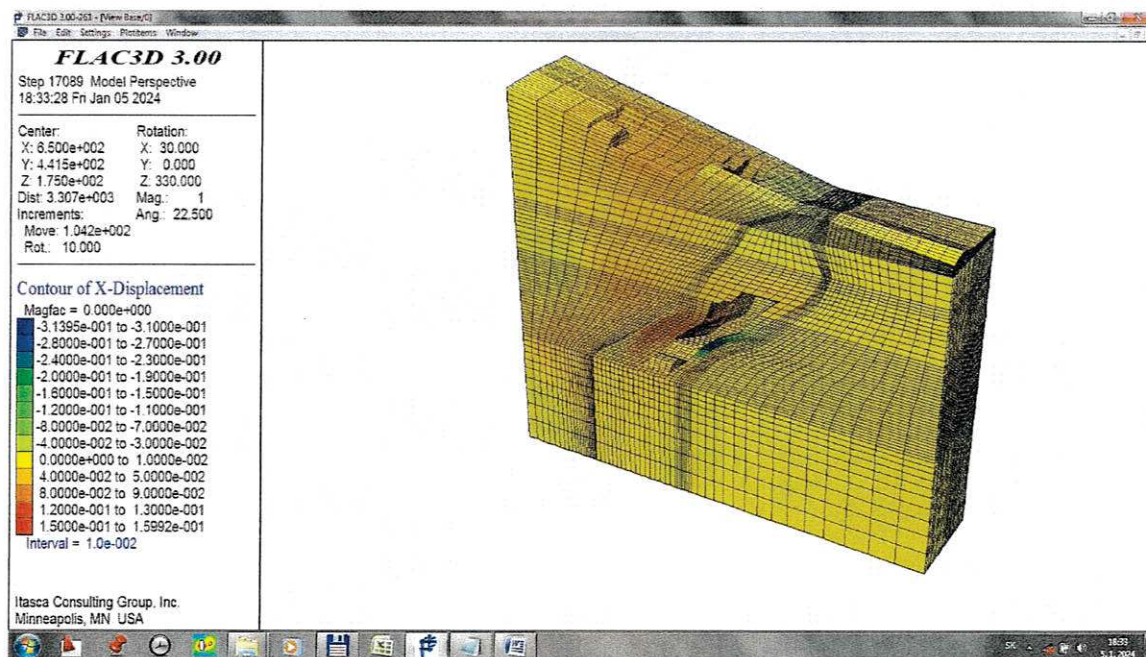
Obr. 91: Horizontálne deformácie v smere osi y

Horizontálne deformácie v smere osi y dosahujú maximá na povrchu terénu na úrovni cca 3-5 cm (obr. 91). V porovnaní s variantom bez zdvihu došlo k zníženiu pretvoreni terénu o cca 1 cm (obr. 64).



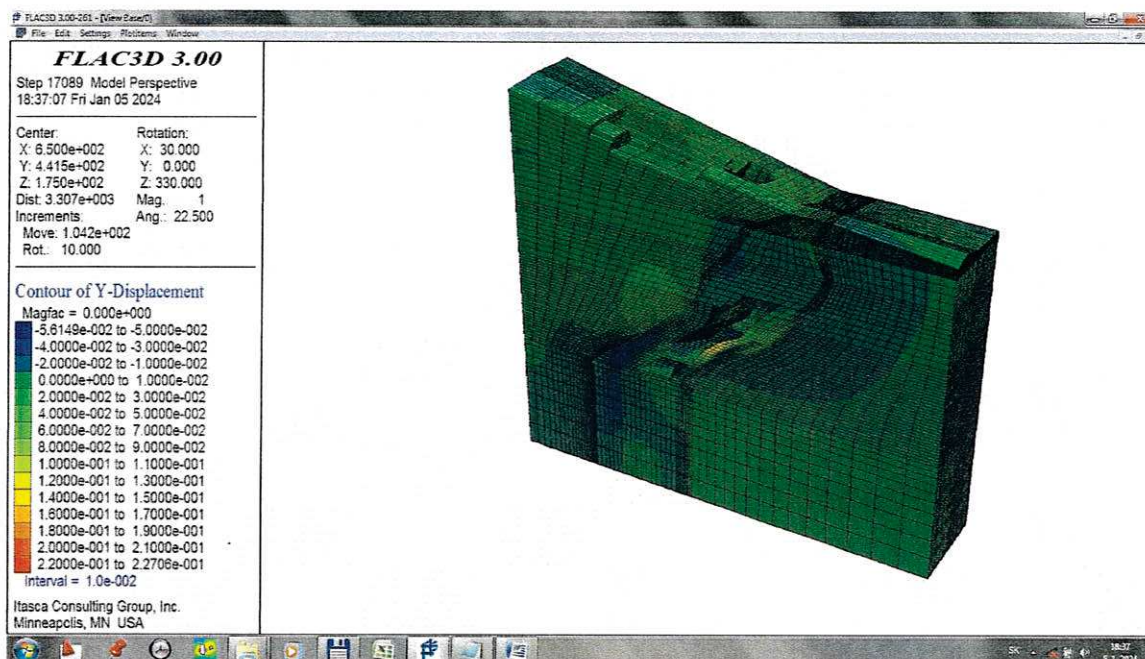
Obr. 92: Vertikálne deformácie v reze $y = 475$ m

Vertikálne deformácie terénu v reze $y = 475$ m dosahujú úrovne cca 5 – 10 cm. (obr. 92). Maximá v tomto reze sú v nadloží vápencových polôh.



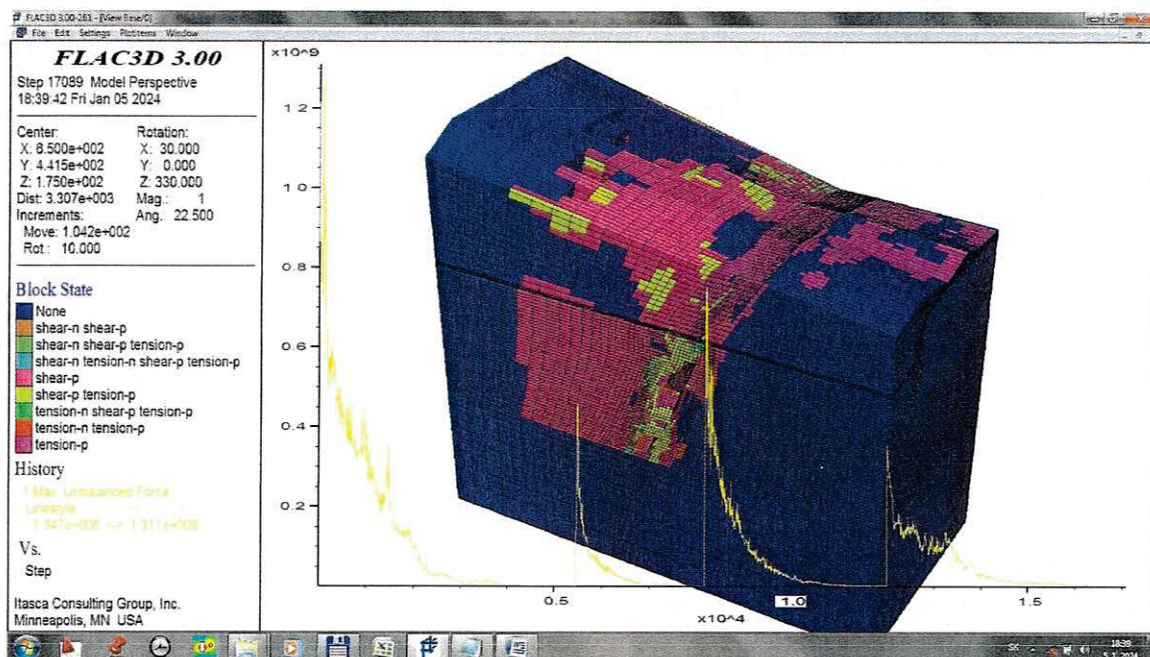
Obr. 93: Horizontálne deformácie v smere osi x v reze $y = 475$ m

Horizontálne deformácie terénu v smere osi x v reze $y = 475$ m dosahujú maximálnej úrovne o veľkosti cca 4-5 cm. V nadloží ložiska sú maximá na úrovni cca 12 - 16 cm, v podloží sú maximá na úrovni cca 27 – 31 cm (obr. 93).



Obr. 94: Horizontálne deformácie v smere osi y v reze $y = 475$ m

Horizontálne deformácie terénu v smere osi y v reze $y = 475$ m dosahujú maximá o veľkosti cca 2–4 cm (obr. 94). V nadloží ložiska sú v tomto smere maximálne deformácie na úrovni cca 6 cm (obr. 94).

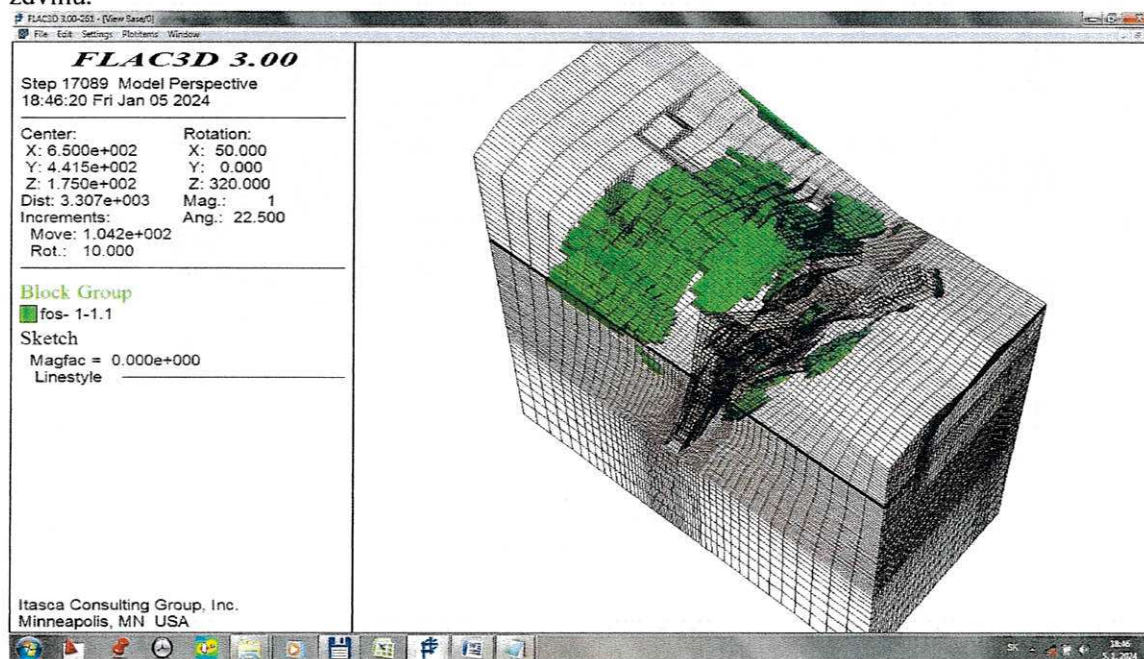


Obr. 95: Stav stability modelu a priebeh nevybalansovanej sily

Stabilita modelu pri variante so zdvihom terénu je dokumentovaná vyššie. V priebehu nevybalansovanej sily sú 4 vrcholy. Prvý vrchol (na začiatku súradnicovej osi) zodpovedá riešeniu počiatkovej nerovnováhy v suchom stave. Druhý peak signalizuje nerovnováhu pri inicializácii pórových tlakov, tretí vypovedá o nerovnováhe zapríčinenej znížením niektorých mechanických a pretvárných vlastností hornín úplne nasiaknutých vodou a posledný (štvrtý) vrchol zohľadňuje úpravu objemových hmotností hornín v schéme efektívnej hustoty pod hladinou banskej vody, čo sa prejaví

v nerovnováhe výpočtového modelu, ktorá sa postupne dostáva do rovnovážneho - konvergujúceho stavu. Numerický model je po ukončení výpočtu v stabilnom stave (obr. 95).

Funkcia blok state signalizuje podobné podmienky v stave stability modelu ako vo variante bez zdvihu (obr. 83), s tým rozdielom, že časť zón s predispozíciou na šmykové a ťahové porušenie sa nachádza aj v podloží ložiska na povrchu terénu. V modeli so zdvihom došlo k miernemu nárastu zón s predispozíciou na šmykové alebo ťahové alebo kombinované porušenie v porovnaní s modelom bez zdvihu.



Obr. 96: Zóny so stupňami bezpečnosti v intervale $<1-1,1>$

Zóny so stupňami bezpečnosti $FoS < 1$ sa v modeli nevyskytujú. Z porovnania modelu bez zdvihu (obr. 84) a so zdvihom (obr. 96) vyplýva, že počet zón so stupňami bezpečnosti v intervale $<1-1,1>$ podľa Mohr-Coulombovej teórie je nižší ako pri variante bez zdvihu.

6.4 Posúdenie stability ťažnej jamy č. 3, jej okolia a stanovenie bezpečnostného pásma jamy č. 3

Ťažná a fáracia jama č.3 bola vyhlbená približne v polovici 70. rokov 20. storočia. Geologický profil jamy požadovaný zhotoviteľom nebol objednávateľom bohužiaľ poskytnutý. V SMZ Lubeník, a.s. k predmetnej jame nie sú k dispozícii žiadne geologické a technické podklady. Projektant likvidácie hlavných banských diel v DP Lubeník (Tratec, s.r.o. Prešov) si vyžiadala z banského archívu v Banskej Štiavnici materiály k danej problematike, ktoré následne poskytol zhotoviteľovi. Materiály z banského archívu sa týkajú len ťažných jám č. 1 a 2.

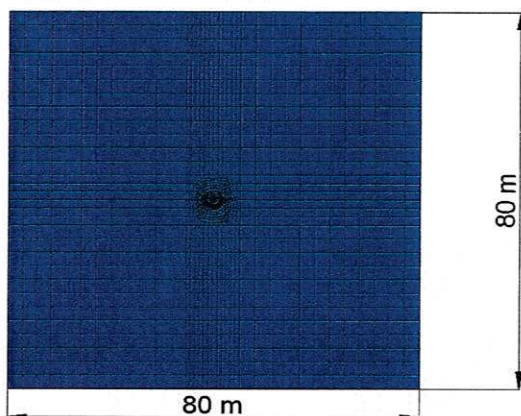
Pri konštruovaní modelu ťažnej jamy č.3 a jej okolia sa vychádzalo hlavne z týchto údajov poskytnutých Ing. Vargom (Tratec, s.r.o.) zaslaných e – mailom zo dňa 19.7.2023:

- jamový terč,
- jama má kruhový tvar, svetlého priemeru ϕ 6 000 mm,
- ohlbeň jamy + 330 m n. m.,
- VII. obzor + 170 m n. m.,
- VIII. obzor + 120 m n. m.,
- IX. obzor + 70 m n. m.,
- dno jamy + 59 m n. m..

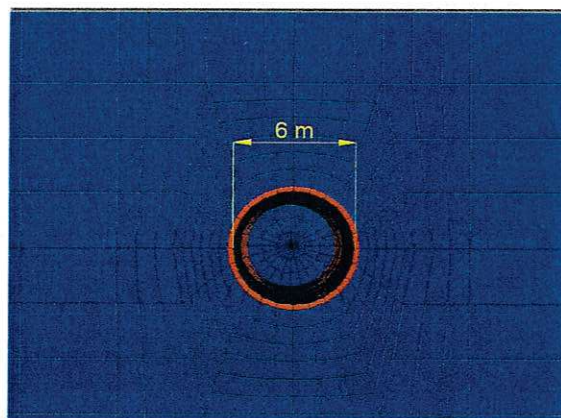
Výstuž jamy pozostáva zo železobetónových jamových panelov typu BZV-16-600, hrúbky 20 – 25 cm. Priestor za panelmi je vyplnený spúšťanou betónovou základkou v hrúbke 10 cm. Firma Tratec taktiež poskytla fotodokumentáciu subhorizontálneho vrtu (obr. 6), ktorý bol vŕtaný za účelom overenia geologických podmienok v profile budúcej odvodňovacej štólne, ktorá má byť vyrazená na úrovni V. obzoru. Vrtom bola overená poloha sericiticko – chloritických fylitov s rôznou rozpukanosťou, s malou až veľmi veľkou hustotou subvertikálnych diskontinuit (odhadnuté z fotodokumentácie).

6.4.1 Definovanie matematického modelu jamy č. 3, okrajové podmienky

Na základe vyššie uvedených parametrov jamy č. 3, bol následne postavený plne symetrický numerický výpočtový model jamy a jej okolia. Model má pôdorysný rozmer 80 x 80 m s výškou 340 m (obr. 97).



Obr. 97: Pôdorys modelu



Obr. 98: Prierez jamy

Jama má v modeli kruhový prierez, s priemerom 6 m, ktorý je zabezpečený výstužou na báze betónu s hrúbkou 0,25 m (obr. 98).

Výstuž zaisťuje zvislé časti jamy, oblasť nárazísk aj prekopy resp. vozíkové obehý, ktoré na nich nadväzujú. Pevnostné a deformačné vlastnosti modelovanej výstuže vychádzali z pevnostnej triedy betónu B 25 resp. C 25 (L. Jun a kol., 2020).

Jama je vo vrchnej časti vystužená tvarovkovou výstužou (obr. 99), na ktorú nadväzuje panelová výstuž (obr.100). Náraziská sú zabezpečené monolitickou betónovou výstužou.

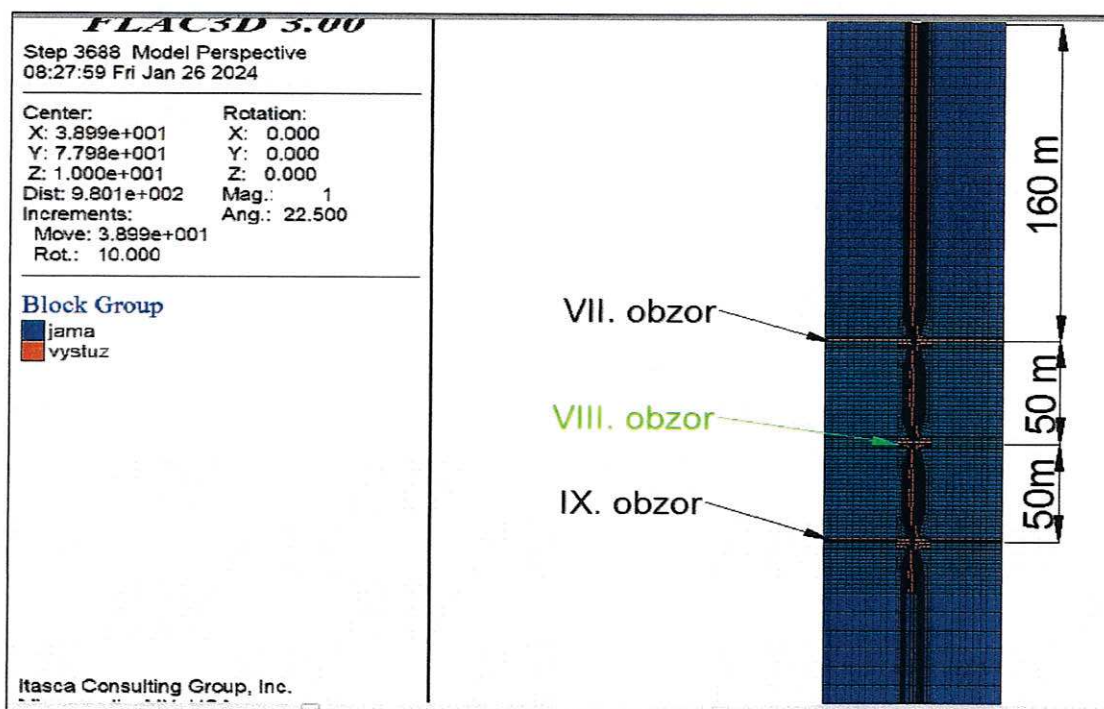


Obr. 99: Tvarovková výstuž s kanálom pre ohrev vetrov



Obr. 100: Panelová výstuž

Medzi jednotlivými obzormi jamy č.3 je osová vzdialenosť 50 m, výška od VII. obzoru po povrch terénu je 160 m (obr. 101).



Obr. 101: Vertikálny rez jamou

VIII. horizont nie je rozfáraný. Z jamy sú vyrazené zarážky o dĺžke cca 2 m na obidve strany jamy. Konce zarážok sú zaistené betónovými pažnicami opretými o oceľové nosníky (obr. 102).

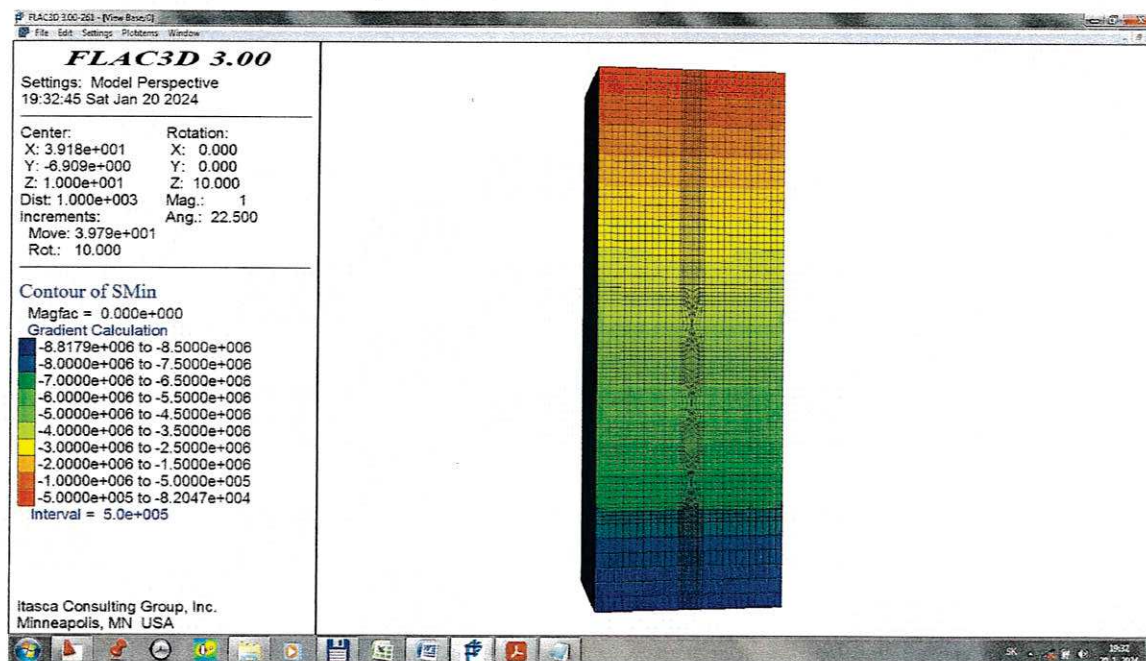
Jama je aj na tomto obzore vyhlbená v polohách fylitov resp. bridlíc až arkóz s rôznym stupňom zvrásnenia bez známkov zvodnenia.

Tomuto stavu bol prispôsobený aj výpočtový numerický model. Zo VII. a IX. obzoru sú vyrazené chodby (obehy vozíkov a dopravné prekopy), na VIII. obzore sú odmodelované len zarážky (obr. 101).



Obr. 102: VIII. horizont

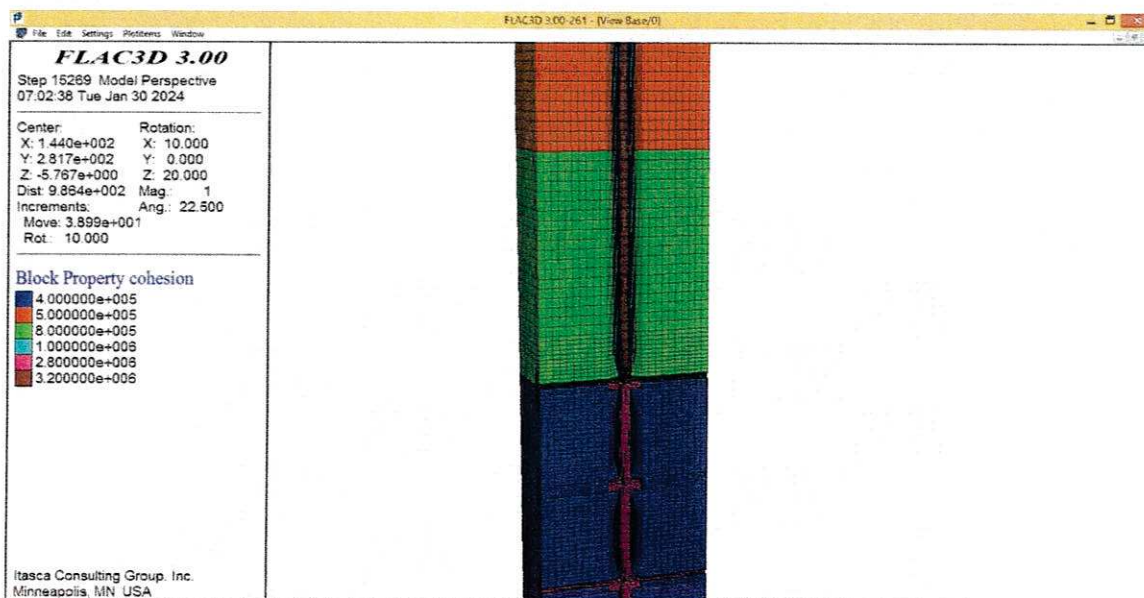
Deformačné okrajové podmienky boli postavené na báze tuhej vane, t.j. na spodku modelu je zabránené posunom vo všetkých troch smeroch, po jeho obvode je obmedzený posun v horizontálnej rovine, vo vertikálnom smere sú posunutia povolené.



Obr. 103: Primárny napätový stav

Vo výpočte je použitý gravitačný model, s lineárnym nárastom maximálnych hlavných napätí S_{min} z približne nulovej hodnoty, ktoré pôsobia na jeho povrchu, na maximum cca 8,8 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 103).

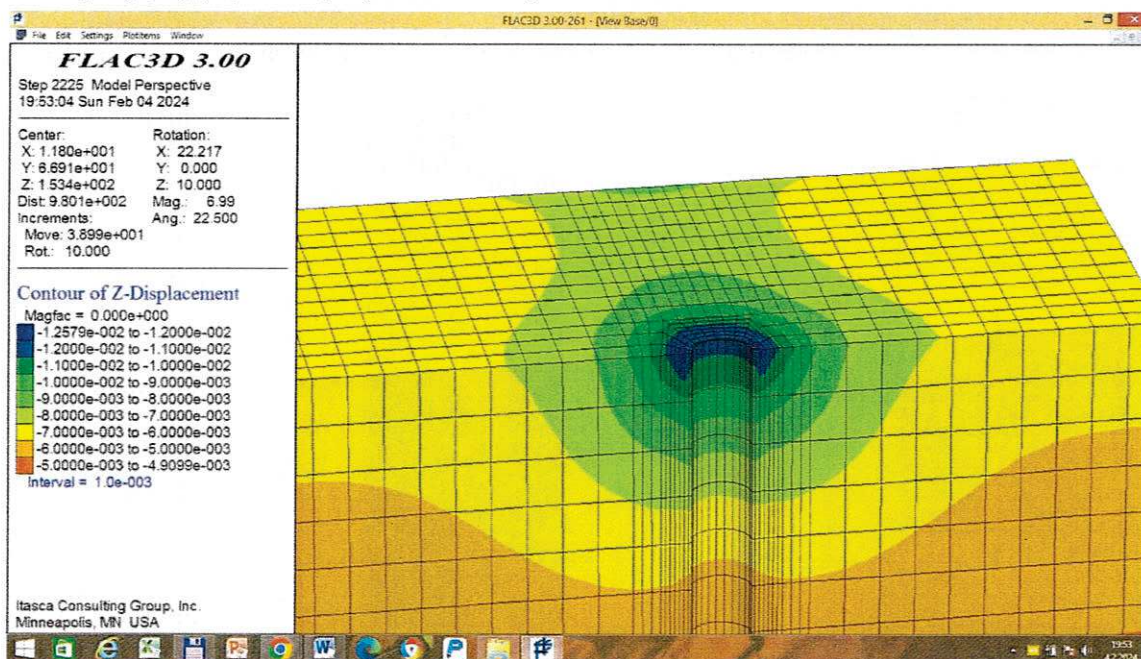
Horizontálne napätia boli stanovené z priebehu vertikálnych napätí, ktoré boli vynásobené koeficientom bočného tlaku.



Obr. 104: Vlastnosti modelovaných horninových typov (súdržnosť)

Fylity vo vrchnej časti jamy majú znížené mechanicko-deformačné vlastnosti (červená farba) voči fylitom v strednej a spodnej časti prierezu jamy. Pod hladinou zatopenia sú vlastnosti taktiež znížené (modrá farba - obr. 104).

Hlavné pretvárne vlastnosti sericiticko-chloritických fylitov boli zvolené tak, aby sa deformácie okolia jamy po jej vyhlbení pohybovali v reálnych hodnotách.



Obr. 105. Deformácie v okolí jamy v zvislom smere – suchý stav

Podľa výpočtového modelu dosahujú vertikálne deformácie v okolí jamy pre tzv. suchý stav (stav po vyhlbení jamy bez účinkov zatopenia podzemia) hodnoty cca 1,3 cm (obr. 105), čo môžu byť reálne veľkosti pretvorenia okolia jamy po jej vyhlbení.

6.4.2 Vlastnosti zásypu jamy

Projektant likvidácie hlavných banských diel v DP Lubeník (Tratec) uvažuje so zásypom jamy nespevneným materiálom z hald s fragmentáciou 0 – 70 mm (e mail od firmy Tratec zo dňa 13.12.2023).

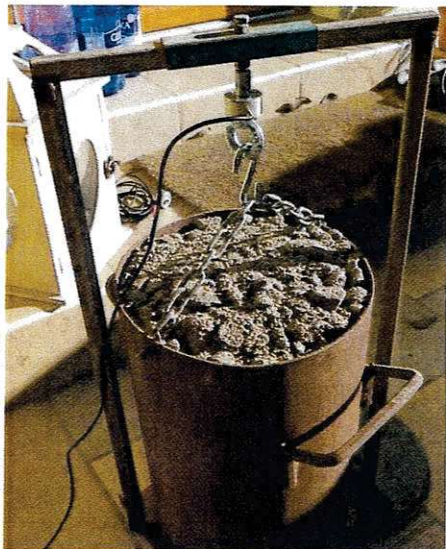
V rámci fárania zhotoviteľa v DP Lubeník dňa 25.1.2024 boli z haldy nebilančného materiálu nachádzajúcej sa pri vstupe do areálu bane odobraté vzorky rúbaniny (obr. 106), z ktorých sa stanovili parametre zásypu (sypná hmotnosť, uhol vnútorného trenia), potrebné pre výpočet horizontálneho zaťaženia vystuženej jamy, nahrádzajúceho stabilizačný účinok zásypu jamy.



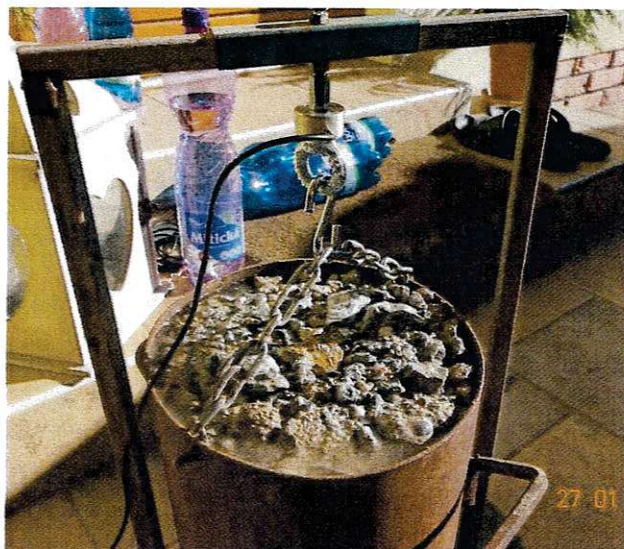
Obr. 106: Miesto odberu vzorky z haldy s fragmentáciou 0 – 70 mm

Sypná hmotnosť, pórovitosť

Na stanovenie sypnej hmotnosti bola použitá merná nádoba o objeme $0,0113 \text{ m}^3$. Po jej naplnení rúbaninou bola zvážená hmotnosť nádoby so zásypom (obr. 107) a následne vypočítaná sypná hmotnosť.



Obr. 107: Merná nádoba s materiálom



Obr. 108: Merná nádoba s materiálom zaliatym vodou

Sypná hmotnosť rúbaniny ρ_s frakcie 0 – 70 mm bola $\rho_s = 1929 \text{ kg.m}^{-3}$. Táto hodnota bola následne používaná v nadväzujúcich výpočtoch.

Skúšaný materiál bol plne saturovaný vodou, preto bola na výpočet pórovitosti použitá kvapalina. Po stanovení sypnej hmotnosti bola do nádoby naliata voda o sledovanom množstve, ktorá vyplnila všetky voľné póry a medzery v skúšobnej vzorke (obr. 108). Zo známeho objemu naliatej kvapaliny po horný okraj skúšobnej nádoby a známeho objemu skúšobnej nádoby bola vypočítaná resp. odhadnutá pórovitosť $n = 33,6 \%$.

Pre výpočet objemovej hmotnosti zásypu pod hladinou podzemnej vody γ' bol použitý vzťah

$$\gamma' = (1 - n) * (\gamma_m - \gamma_w) \quad (16)$$

pričom n – pórovitosť,

γ_m – merná tiaž horniny zásypu (viď tab. 2, $\gamma_m = 3050 \text{ kg.m}^{-3} * 9,81 \text{ m.s}^{-2} = 29,92 \text{ kN.m}^{-3}$),

γ_w – objemová tiaž vody

$$\gamma' = (1 - 0,036) * (29,92 - 9,81) = 13,35 \text{ kN.m}^{-3}$$

Uhol vnútorného trenia

Pri stanovení uhla vnútorného trenia nesúdržných materiálov ϕ sa vychádza z princípu, že svah v nesúdržných materiáloch je stabilný, ak je sklon svahu menší než uhol vnútorného trenia alebo sa mu rovná.

Po naplnení mernej nádoby zásypovým materiálom, bol rovnomerným vertikálnym pohybom prevrátenej mernej nádoby vytvorený sypný kužeľ (obr. 109), z ktorého geometrických rozmerov (výška a priemer podstavy kužeľa) bol stanovený sypný uhol, ktorý je rovný uhlu vnútorného trenia ϕ .



Obr. 109: Sypný kužeľ

Z prevedenej skúšky bol stanovený uhol vnútorného trenia nesúdržného zásypového materiálu vo forme nebilančnej rúbaniny frakcie 0 – 70 mm $\varphi = 41^\circ$, ktorý bol použitý v nadväzujúcich výpočtoch.

6.4.3 Vplyv zásypu nespevneného nesúdržného materiálu na stabilitu vystuženej jamy

Nevystužený a nespevnený materiál vytvára v likvidovanej jame stav vnútorného horizontálneho zaťaženia vystuženej jamy, ktorého veľkosť sa môže počítať podľa rôznych autorov (Marstons, Terzaghi, Auebertin a pod.) Pri týchto analytických riešeniach sa uvažuje s klenbovým účinkom sypného materiálu na steny sila (Terzaghi) resp. dobývok – vplyv základky na steny dobývok s pravouhlým pôdorysom (Marstons, Aubertin).

Výpočet horizontálneho zaťaženia jamy od nespevneného zásypu bol vykonaný podľa (Chai, Sh., 2020) a (Pirapakaran, K., 2008), ktoré upravujú základne analytické vzťahy od autorov uvedených v predchádzajúcom odseku.

Vzťahy boli upravené na kruhový pôdorys zasypávanej jamy a vypočítané horizontálne napätia od zásypu jamy boli zohľadnené pri pôsobení horizontálnych napätí na výstuž jamy. Pri výpočte horizontálnych napätí σ_H je v prvom kroku potrebné vypočítať vertikálne napätia σ_V pôsobiace v zásype v danej hĺbke a následne ich vynásobiť koeficientom bočného tlaku zemín resp. zásypu, čím vypočítame potrebné horizontálne napätia. Využíva sa klasický vzťah z mechaniky hornín resp. zemín v tvare

$$\sigma_H = \sigma_V * K \quad (17)$$

pričom K – koeficient bočného tlaku hornín resp. zemín.

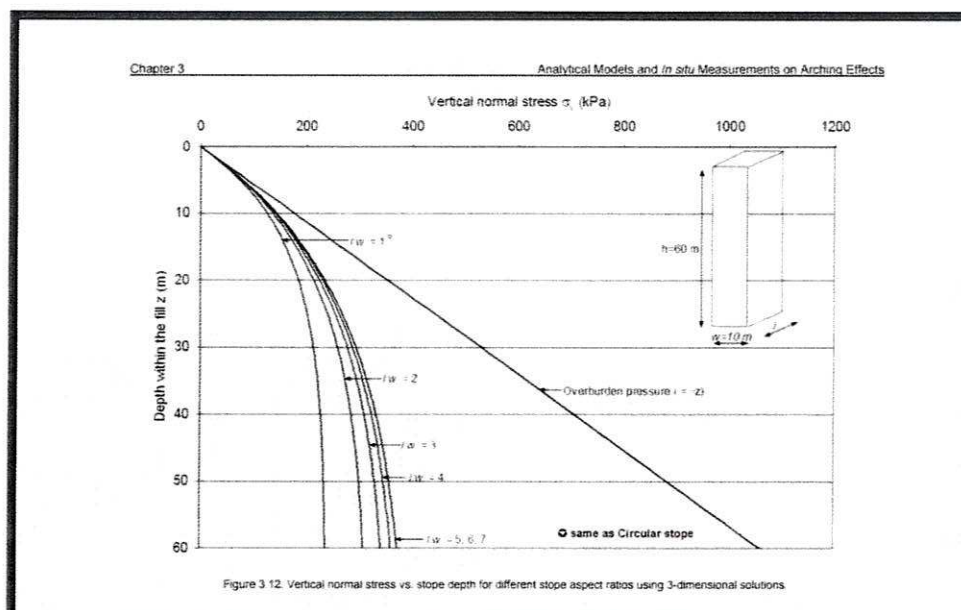
Koeficient bočného tlaku K má tri základné tvary $K = K_O$, resp. $K = K_A$, resp. $K = K_P$, pričom

K_O – koeficient bočného tlaku zemín resp. zásypu v pokoji,

K_A – koeficient aktívneho tlaku zásypu,

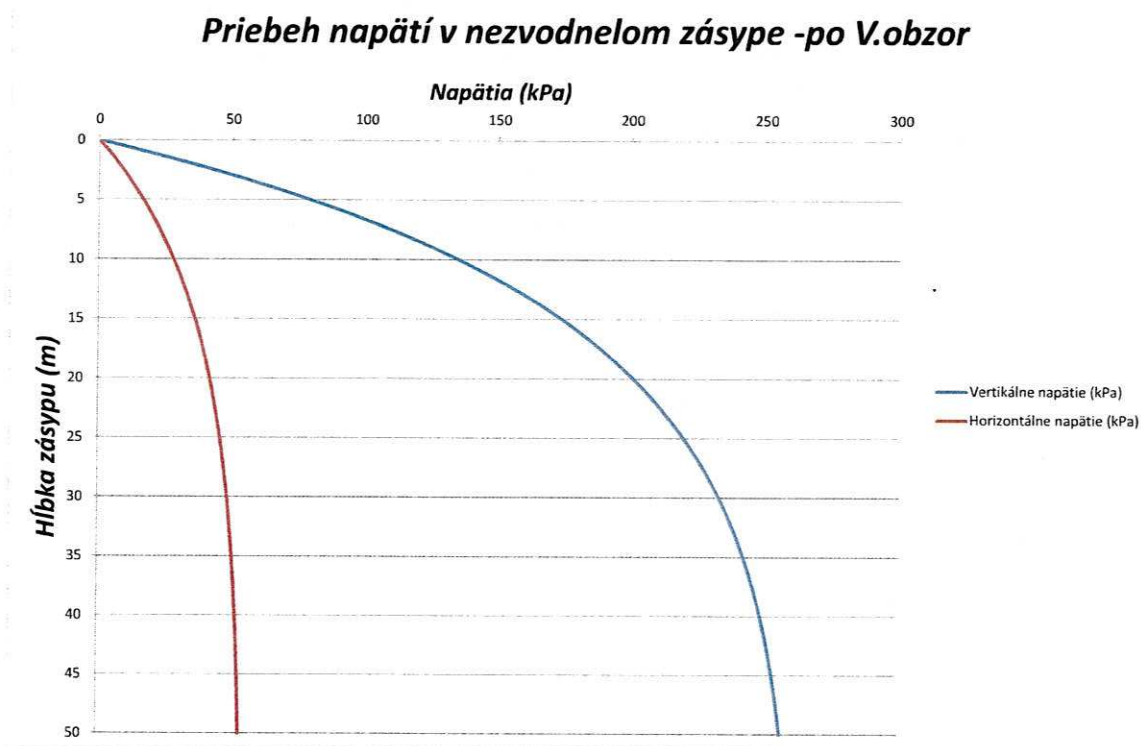
K_P – koeficient pasívneho odporu zásypu.

Pri výpočte horizontálneho napätia v zásype bol použitý koeficient K_A , pri ktorom došlo k najlepšej korelácii medzi hodnotami horizontálneho napätia vypočítaného analytickými vzťahmi, numerickým modelovaním a meraniami in situ (Pirapakaran, K., 2008).



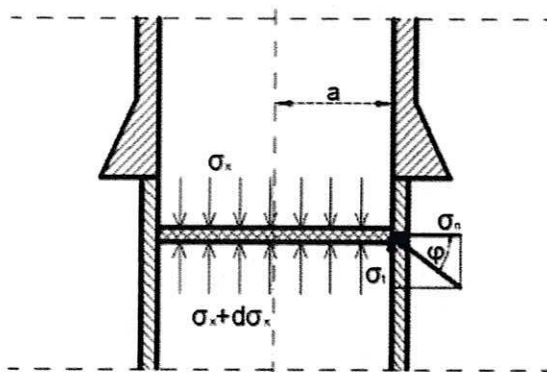
Obr. 110: Vertikálne napätia v základke v závislosti od pôdorysu základanej dobývky (Pirapakaran, K., 2008)

Na základe vyššie uvedeného postupu, boli pre prípad zasypávanej jamy vypočítané priebehy napätí v nespevnenom zásype (obr. 111).



Z porovnania priebehov vertikálnych napätí uvedených na obr. 110 a obr. 111 vyplýva porovnateľný nelineárny priebeh týchto veličín. Priebeh vertikálnych napätí podľa Pirapakarana, K. platí pre iné hodnoty sypnej hmotnosti, uhla vnútorného trenia zásypu a iný pôdorys zásypu v porovnaní s priebehom uvedeným na obr. 111.

Priebeh napätí uvedený na obr. 111 platí pre prípad zásypu jamy č.3 v DP Lubeník, ak nezvodnelý zásyp siaha od ohľbne jamy po úroveň V. obzoru, teda na hĺbku suchého zásypu 50 m.



Obr. 112: Vertikálne napätia v jame s priemerom $2a$ a na kontakte výstuž – zásyp (Konior, J., 2017).

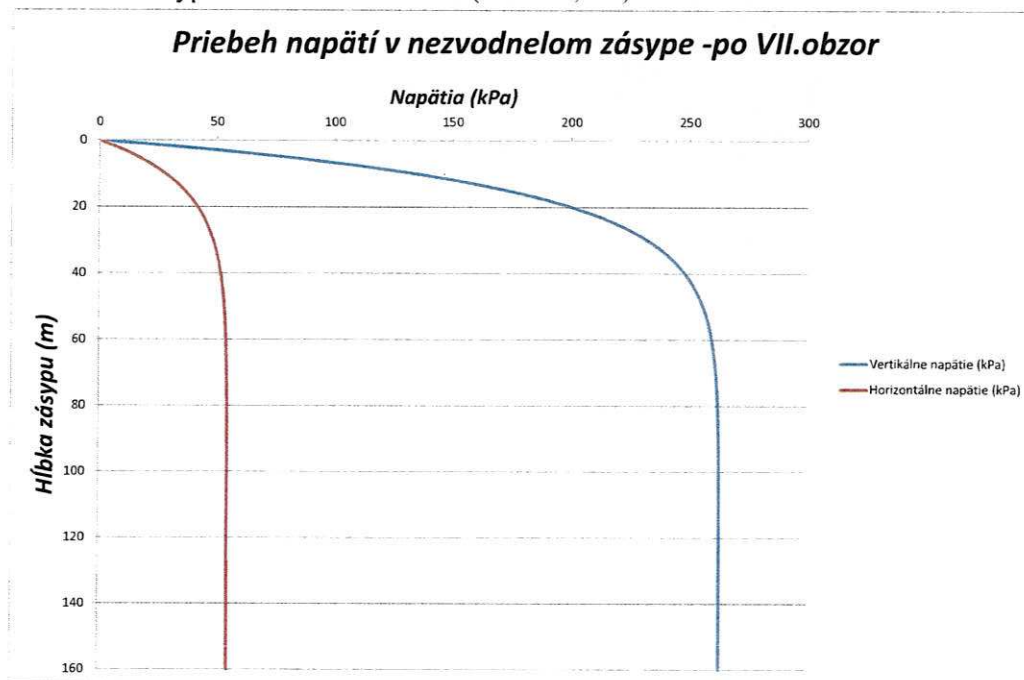
K dôležitým fyzikálno – mechanickým vlastnostiam zásypového materiálu patrí okrem uhla vnútorného trenia zásypu, ktorý podľa zahraničných skúsenosti by nemal klesnúť pod $28 - 30^\circ$, zrnitosti, objemovej tiaže zásypu, pórovitosti, obsahu ílovitých častí, stlačiteľnosti aj uhol trenia zásypového materiálu na kontakte s materiálom výstuže δ° (obr. 112). Hodnota δ bola zvolená v odporúčanom intervale $\delta = 1/2 \div 2/3 \varphi$, t.j. $\delta = 2/3 \varphi$ pre suché podmienky.

Pod úrovňou hladiny podzemnej vody bol uhol trenia medzi výstužou a zásypom zvolená hodnota $\delta' = \delta - 3^\circ \approx 25^\circ$.

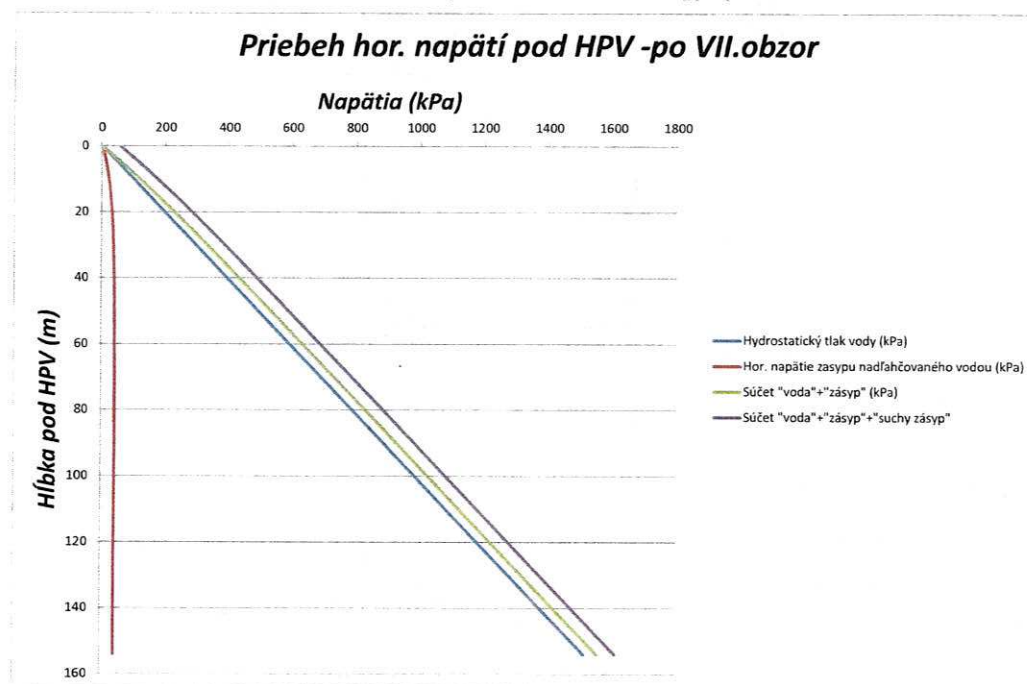
6.4.4 Stabilita jamy č. 3 po zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru

Pri zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru, bude mať suchý zásyp výšku 160 m. Pod VII. obzorom bude:

- zásyp nadľahčovaný vodou (γ'),
- pôsobiť tlak podzemnej vody na výške 155 m,
- pôsobiť prítlačenie na povrchu zvodnelého zásypu od tiaže vyššieho tzv. suchého zásypu o veľkosti cca 55 kPa (obr. 113,114).

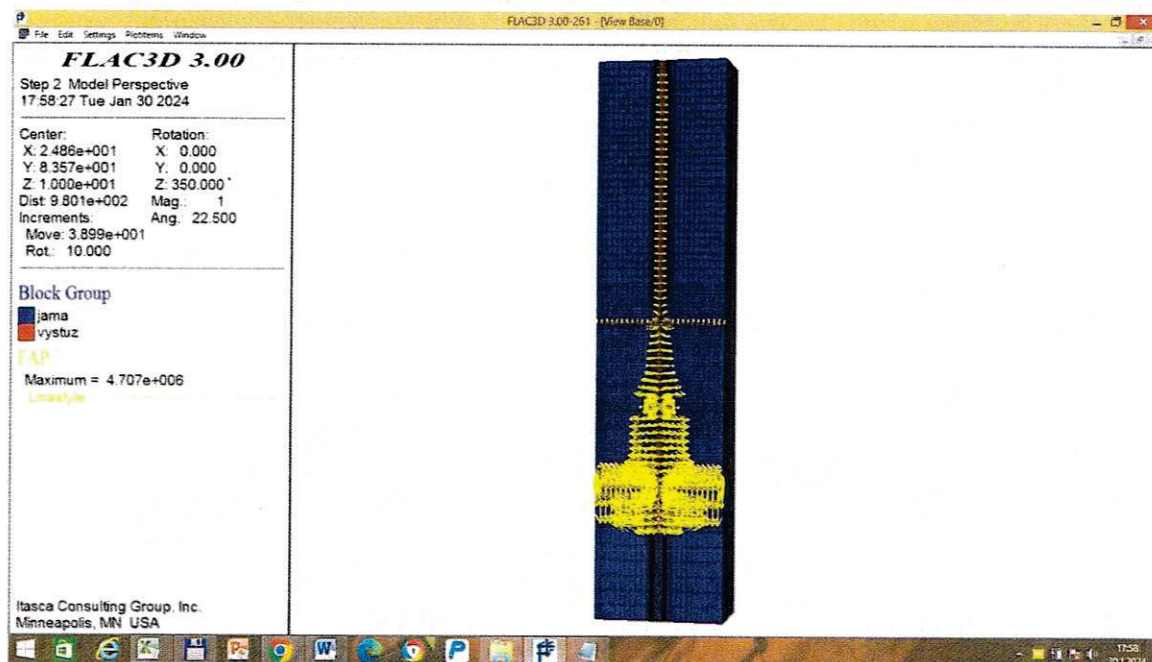


Obr. 113: Priebeh napätí v nezvodnelom zásype po VII. obzor



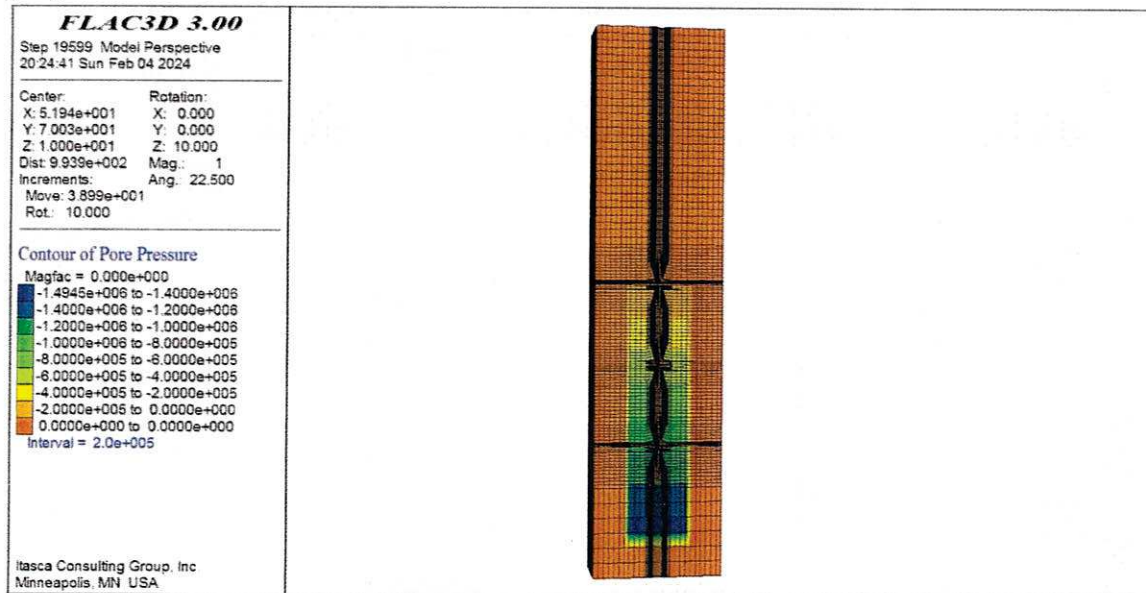
Obr. 114: Priebeh horizontálnych napätí v zásype pod vodou – zatopenie po VII. obzor

Na základe vyššie vypočítaných horizontálnych napätí boli do výpočtového numerického modelu implementované príslušné bočné napätia (obr. 115).



Obr. 115: Bočné zaťaženie v jame

Po úroveň VII. obzoru boli v modeli inicializované pórové tlaky (obr. 116), pod úroveň VII. obzoru došlo k zníženiu mechanicko – deformačných vlastností horninového prostredia a výstuže jamy.

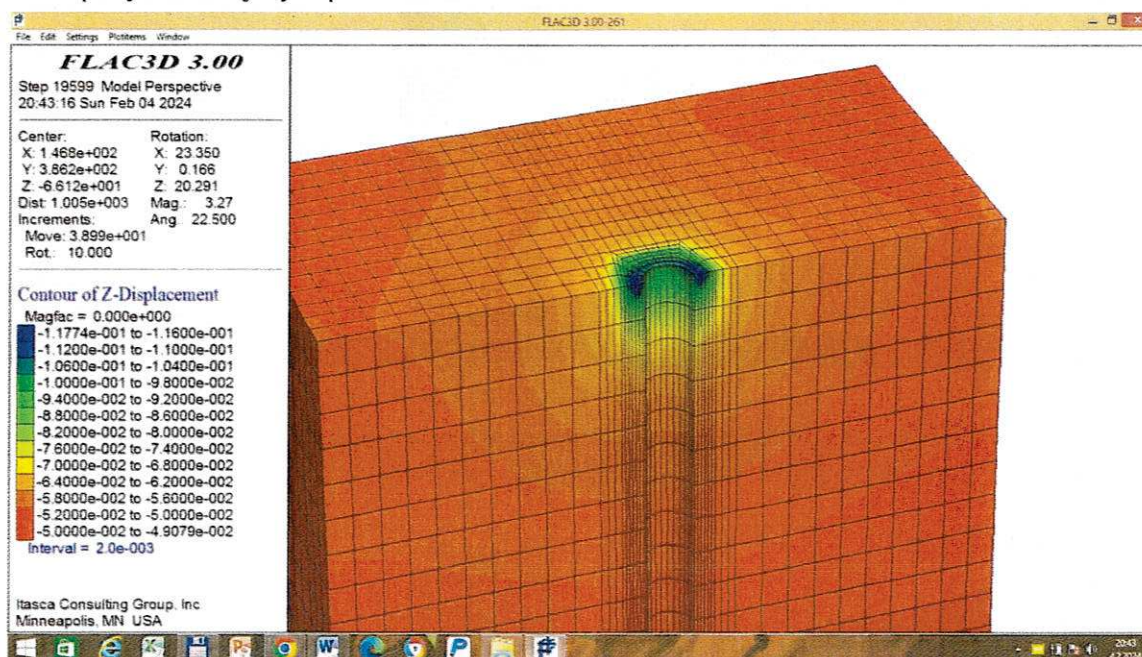


Obr. 116: Priebehy pórových tlakov

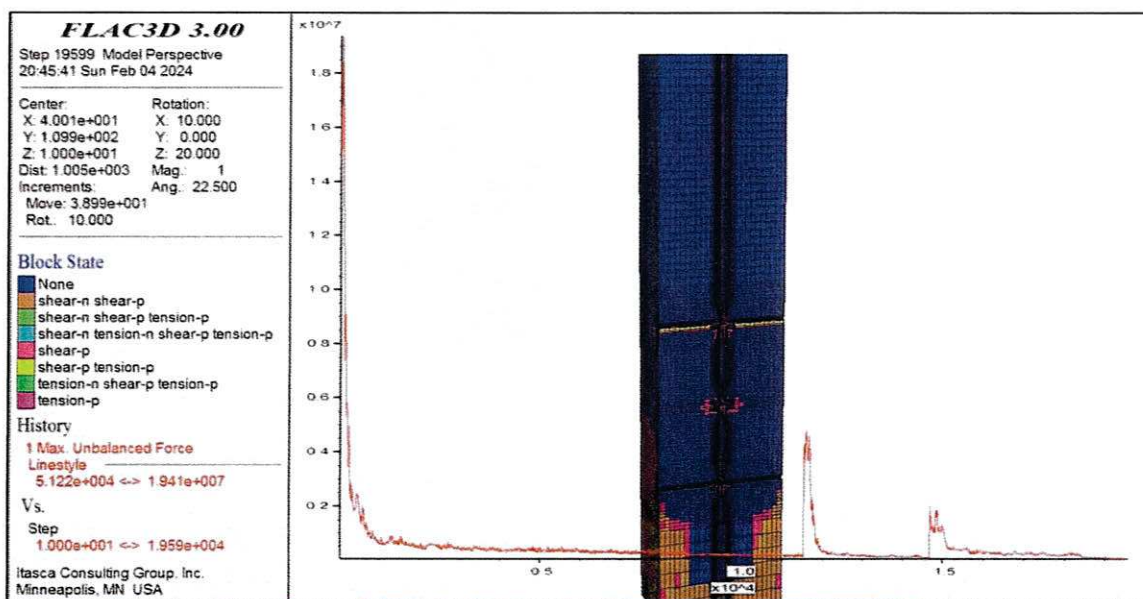
Pórové tlaky z nulovej hodnoty, ktoré sú na úrovni VII. horizontu lineárne narastajú na hodnotu cca 1,5 MPa pri spodnom okraji modelu. Pórové tlaky sú implementované len v oblasti jamy s polomerom 20 m. K takémuto prístupu bolo pristúpené z dôvodu, že jama je vybudovaná v prostredí málo priepustných sericiticko-chloritických fylitov. O nízkej priepustnosti tejto geologickej polohy svedčia aj poznatky zhotoviteľa z inšpekčnej jazdy jamou, kde neboli zaznamenané žiadne výrazné prútoky do jamy, viď aj obr. 102, kde napr. zarážky na VIII. obzore sú suché.

Na nasledujúcich grafických výstupoch sú uvádzané hodnoty vertikálnych deformácií v oblasti ohľbne jamy a stav stability modelu vyjadrený funkciou block_state, priebehom nevybalansovanej sily a stupňov bezpečnosti FoS vypočítaných podľa Mohr_Coulombovej podmienky medzného stavu. Podobne ako pri riešení prechádzajúcej dielčej úlohy aj pri riešení stability jamy č. 3 po zatopení sa postupovalo v nasledujúcich krokoch:

- výpočet suchého stavu,
- znulovanie deformácií, rýchlosti a stavu stability,
- implementácia pórových tlakov a náhradných zaťažení od vody, mokrého a suchého zásypu jamy,
- zníženie mechanicko – pretvárných vlastností hornín a výstuže pod hladinou jamy a výpočet pri týchto okrajových podmienkach.



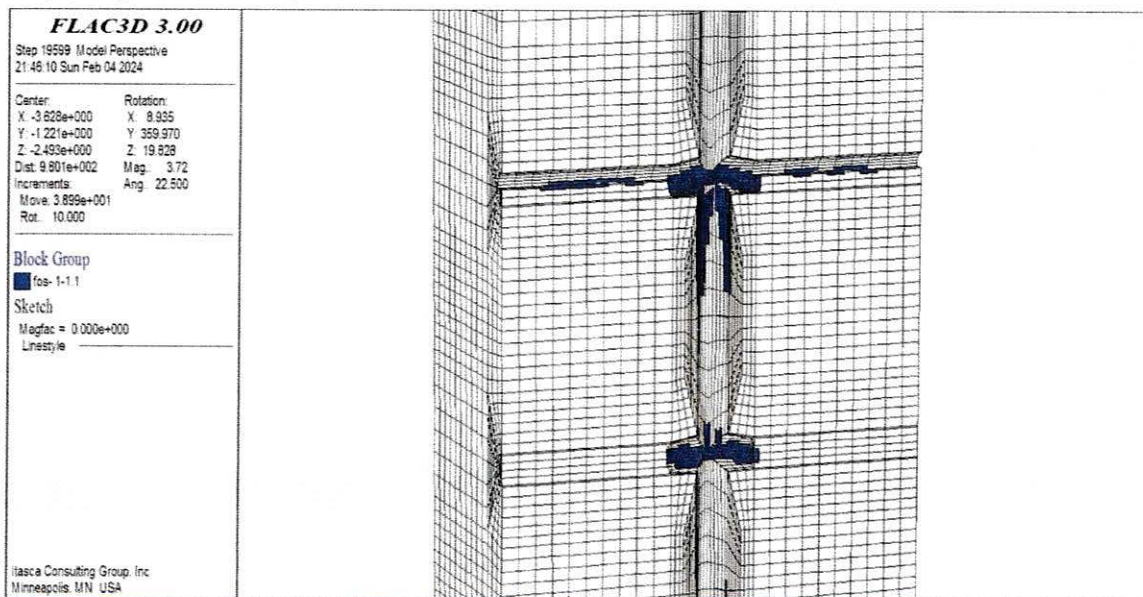
Obr. 117: Priebeh vertikálnych deformácií v oblasti ohľbne jamy



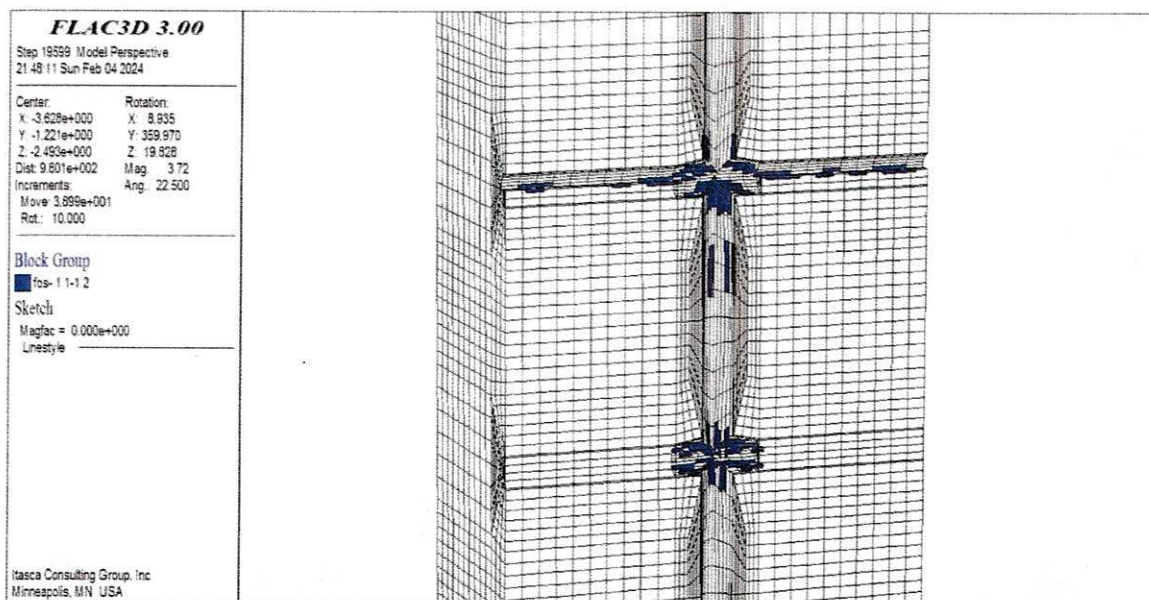
Obr. 118: Priebeh nevybalansovanej sily a stavu stability modelu

V oblasti ohlbne jamy pri zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru dochádza k zvislým deformáciám o veľkosti s maximom cca 11,7 cm (obr. 117).

Nevybalansovaná sila konverguje k nule, čo signalizuje stabilný stav modelu pri jeho zatopení po úroveň VII. obzoru (obr. 118). V modeli prevládajú zóny s predispozíciami na šmykové a ťahové porušenie. V oblasti počvy chodieb vozíkových obehov a dopravných prekopov sa vyskytujú zóny s kombinovanými predispozíciami na šmykové a ťahové porušenie. Je to pravdepodobne spôsobené použitou technikou modelovania počvy týchto diel, kde došlo k ich dodatočnému primodelovaniu resp. prílepeniu (obr. 118).



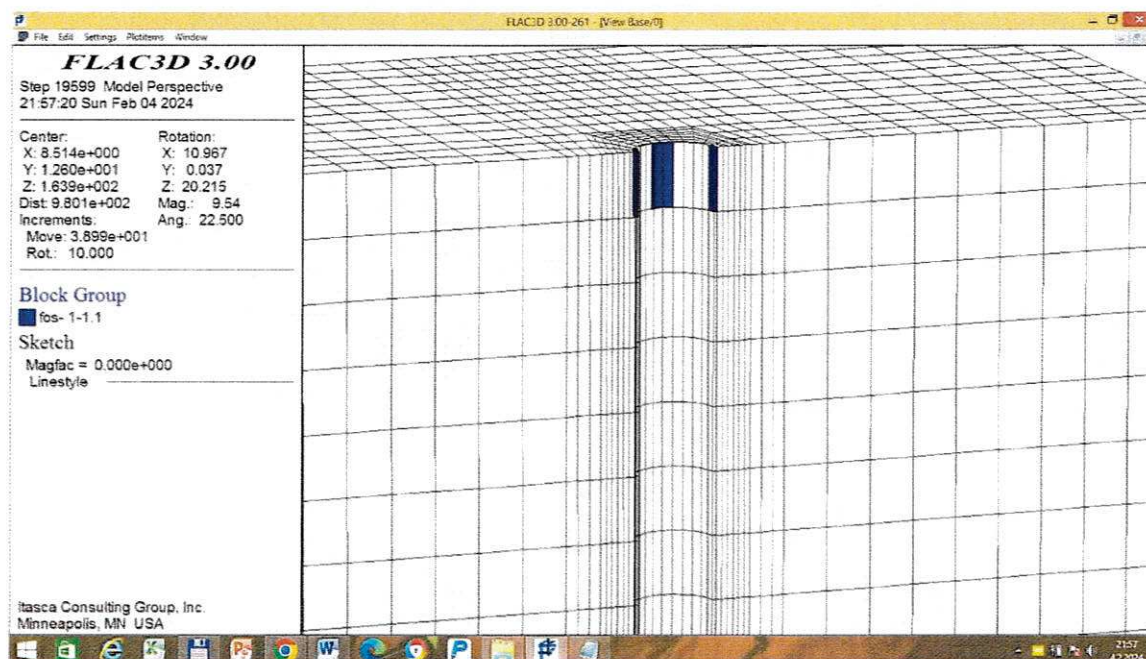
Obr. 119: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1 - 1,1>$



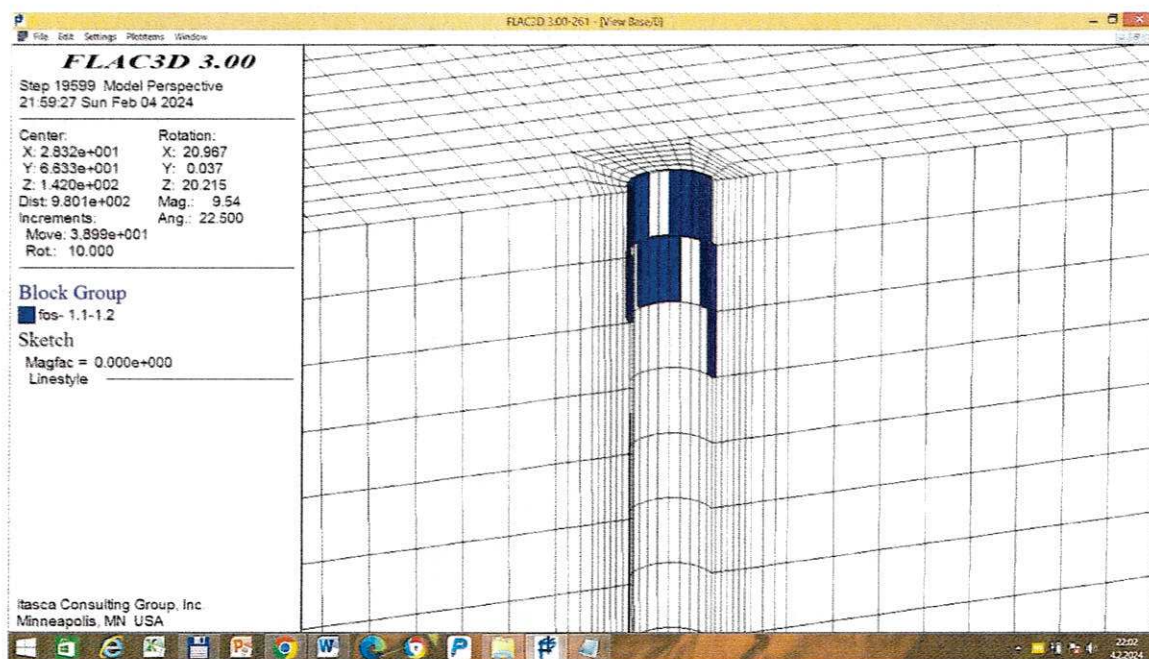
Obr. 120: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1,1 - 1,2>$

V oblasti pod úrovňou VII. obzoru, kde sú znížené vlastnosti hornín a výstuže a oblasť je zatopená, sa nachádzajú vo výstuži miesta s najnižšími stupňami bezpečnosti, ktoré sú v intervale $<1 - 1,2>$ (obr. 119,120). Zóny so stupňami bezpečnosti FoS < 1 sa v modeli nevyskytujú.

V oblasti ohľbne sa nevyskytujú zóny so stupňami bezpečnosti $FoS < 1$ (obr. 121, 122). Zatopenie jamy po úroveň VII. obzoru nespôsobí kritický stav v stave stability.



Obr. 121: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1 - 1,1>$ - ohľbeň jamy



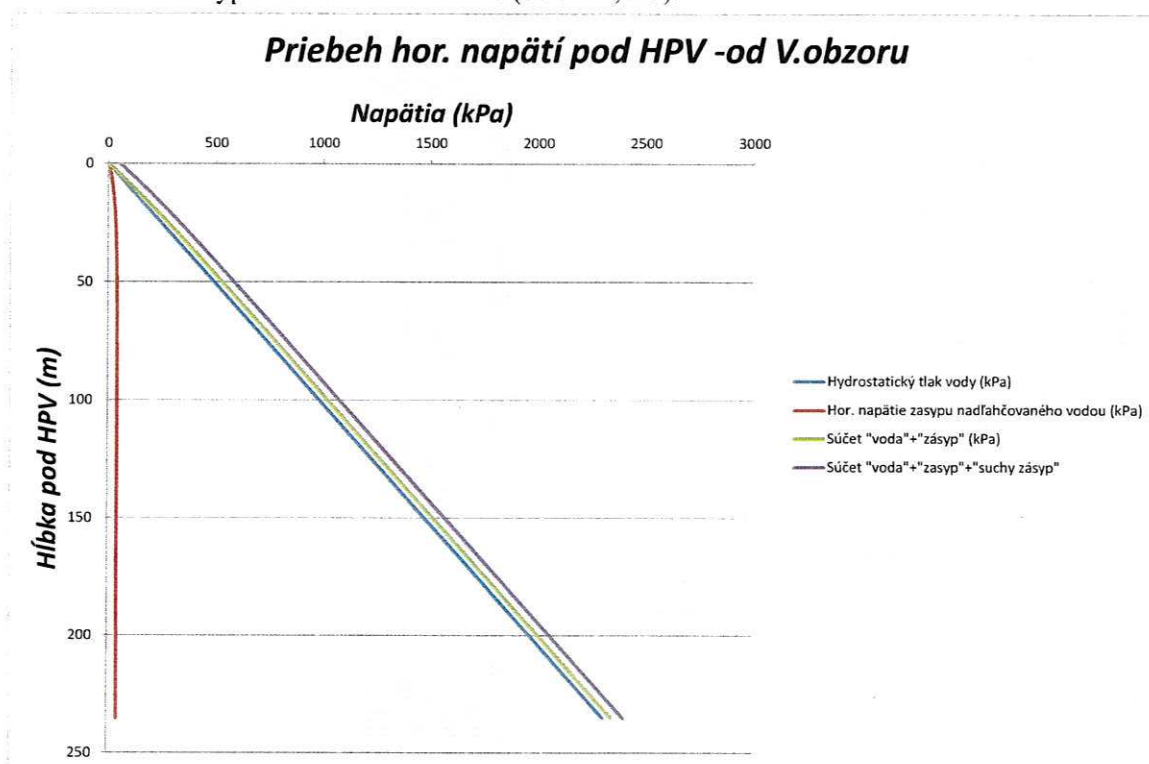
Obr. 122: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1,1 - 1,2>$ - ohľbeň jamy

V intervale $FoS <1-1,1>$ sa vyskytuje len veľmi malý počet zón (obr. 121), s vyšším stupňom bezpečnosti sa v tejto oblasti vyskytuje aj väčší počet zón (obr. 122).

6.4.5 Stabilita jamy č. 3 po zatopení podzemia po úroveň V. obzoru

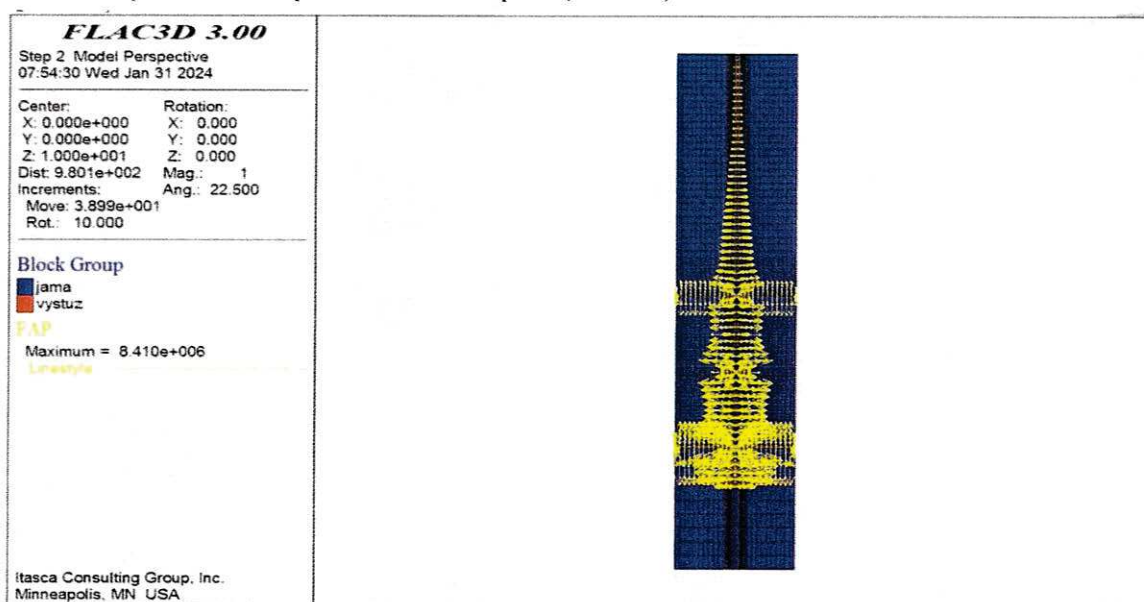
Pri zatopení podzemia po úroveň V. obzoru, bude mať suchý zásyp výšku 50 m. Pod V. obzorom bude:

- zásyp nadľahčovaný vodou (γ),
- pôsobiť tlak podzemnej vody na výške 235 m,
- pôsobiť priťaženie na povrch zvodneného zásypu od tiaže vyššieho tzv. suchého zásypu o veľkosti cca 53 kPa (obr. 111,123).



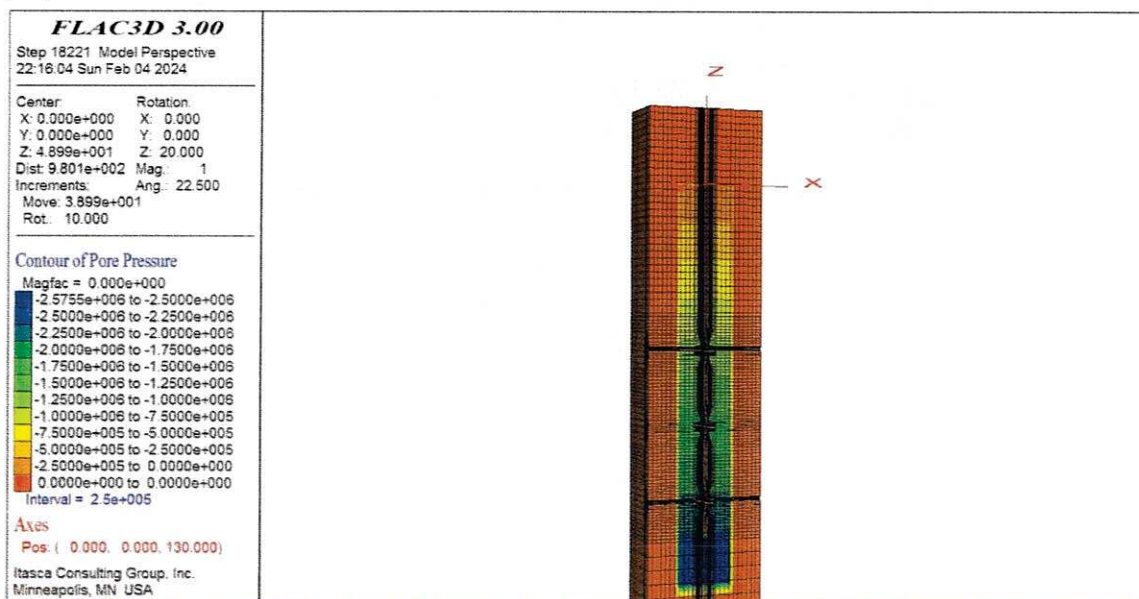
Obr. 123: Priebeh horizontálnych napätí v zásype pod vodou – zatopenie po V. obzor

Na základe vyššie vypočítaných horizontálnych napätí boli do výpočtového numerického modelu implementované príslušné bočné napätia (obr. 124).



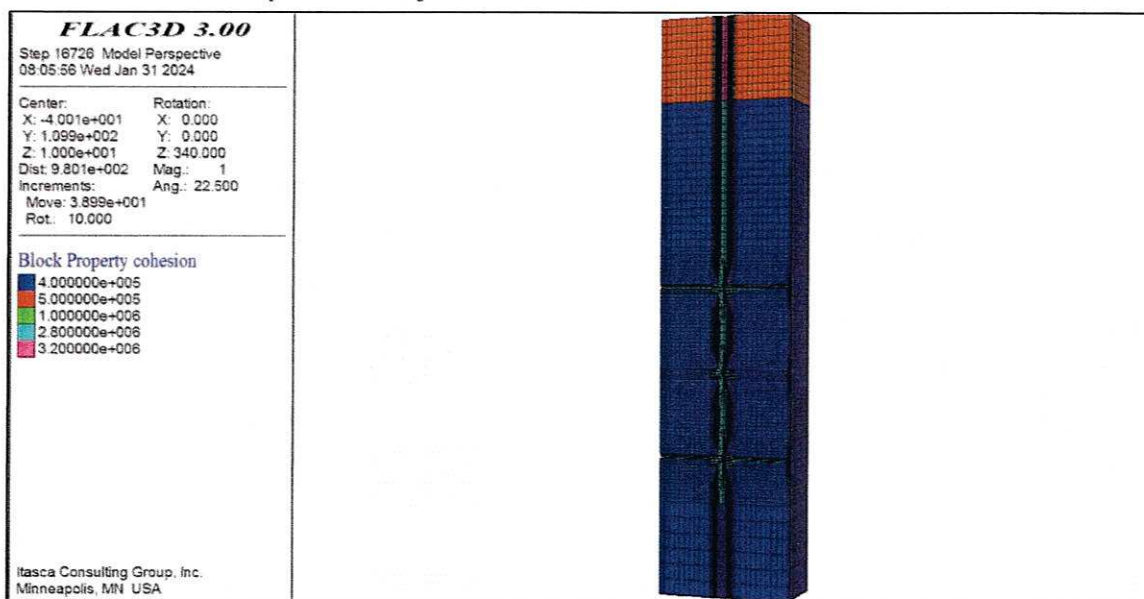
Obr. 124: Bočné zaťaženie jamy

Po úrovň V. obzoru boli v modeli inicializované pórové tlaky (obr. 125), pod úrovňou V. obzoru došlo k zníženiu mechanicko – deformačných vlastností horninového prostredia a výstuže jamy.



Obr. 125: Priebehy pórových tlakov

Pórové tlaky z nulovej hodnoty, ktoré sú na úrovni V. horizontu lineárne narastajú na hodnotu cca 2,6 MPa v oblasti spodného okraja modelu.

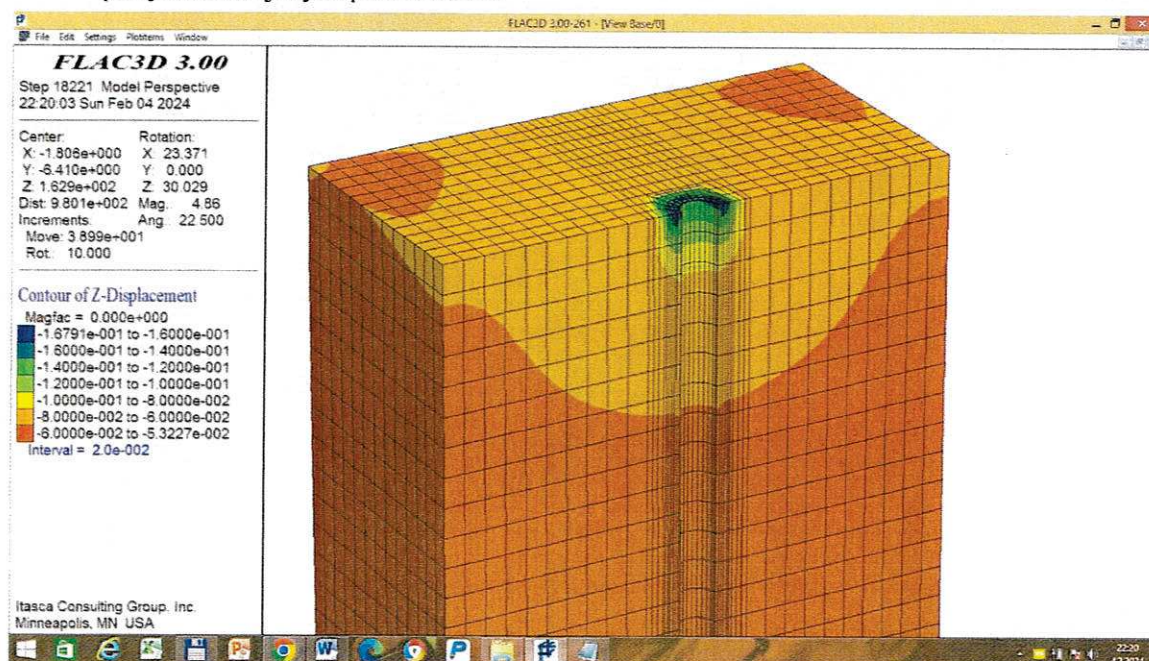


Obr. 126: Vlastnosti (súdržnosť) modelovaných entít pod úrovňou V. obzoru

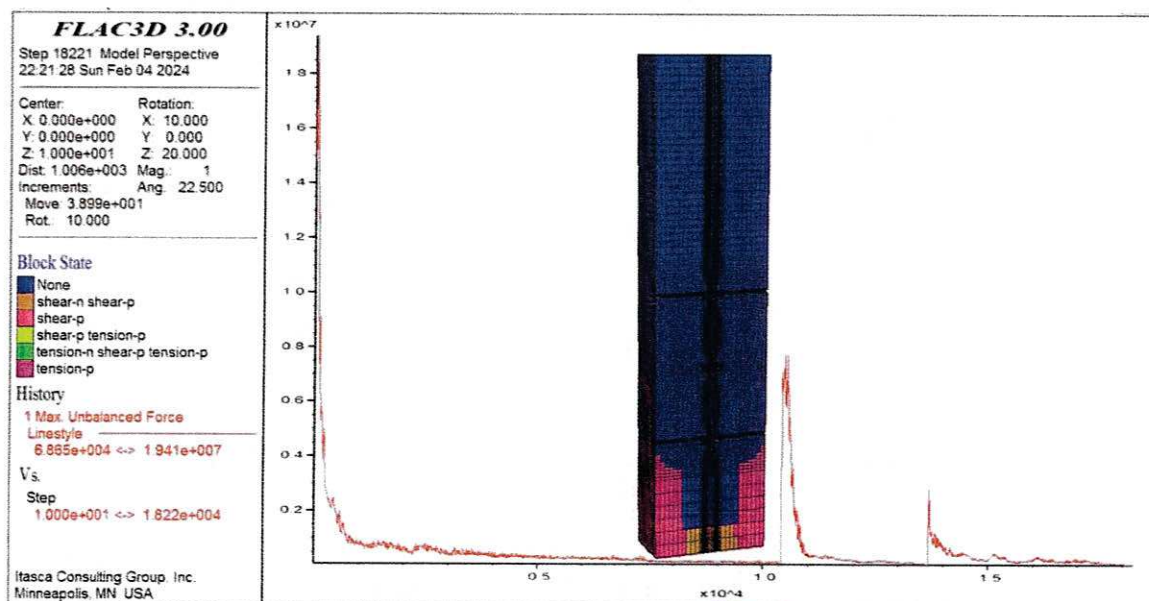
Pod úrovňou V. obzoru došlo k zníženiu mechanicko-pretvárnych vlastností modelovaných skupín. Zníženie parametrov sericiticko-chloritických fylitov bolo vykonané podľa údajov uvedených v tab. 9 (obr. 126). Zníženie parametrov betónovej výstuže vplyvom dlhodobých účinkov vody boli odhadnuté. Vzhľadom na charakter malo agresívneho chemizmu podzemnej vody v DP Lubeník aj dlhodobé dopady na zníženie hodnôt mechanicko-deformačných vlastností betónov budú pravdepodobne menej výrazne. Aj na základe obhliadky výstuže jamy č. 3, pri ktorej neboli zistené žiadne výrazne deformity, sú vyššie uvedené konštatovania relevantné.

Na nasledujúcich grafických výstupoch sú uvádzané hodnoty vertikálnych deformácií v oblasti ohlbne jamy a stav stability modelu vyjadrený funkciou block_state, priebehom nevybalansovanej sily a stupňov bezpečnosti FoS vypočítaných podľa Mohr-Coulombovej podmienky medzného stavu. Podobne ako pri riešení prechádzajúcej dielčej úlohy aj pri riešení stability jamy č. 3 po zatopení sa postupovalo v nasledujúcich krokoch:

- výpočet suchého stavu,
- znulovanie deformácií, rýchlosti a stavu stability,
- implementácia pórových tlakov a náhradných zaťažení od vody, mokrého a suchého zasypu jamy,
- zníženie mechanicko – pretvárných vlastností hornín a výstuže pod hladinou jamy a výpočet pri týchto okrajových podmienkach.



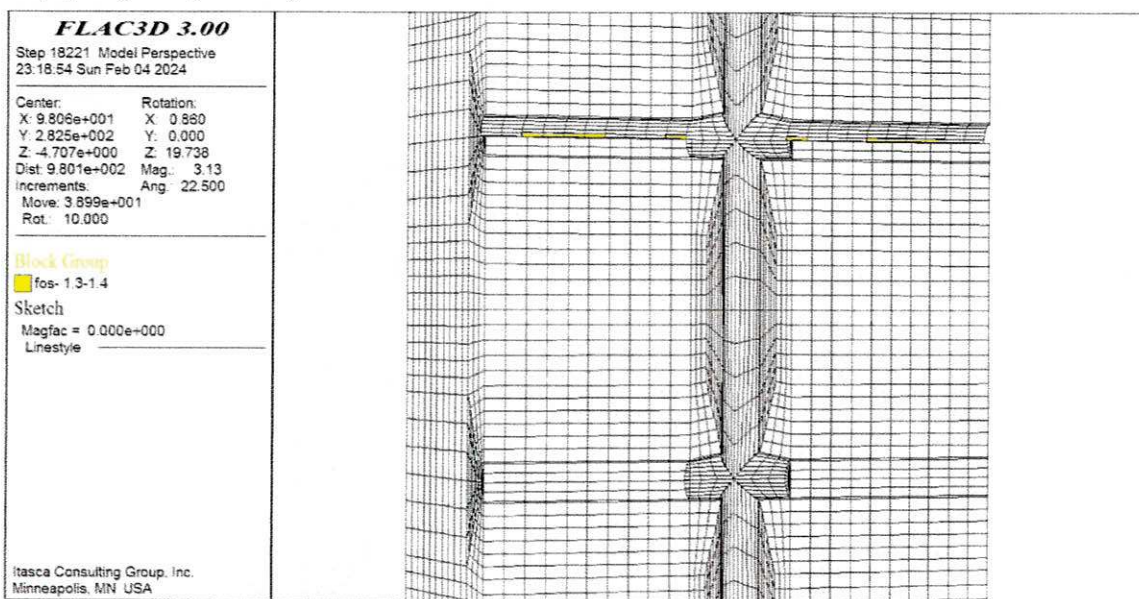
Obr. 127: Priebeh vertikálnych deformácií v oblasti ohlbne jamy



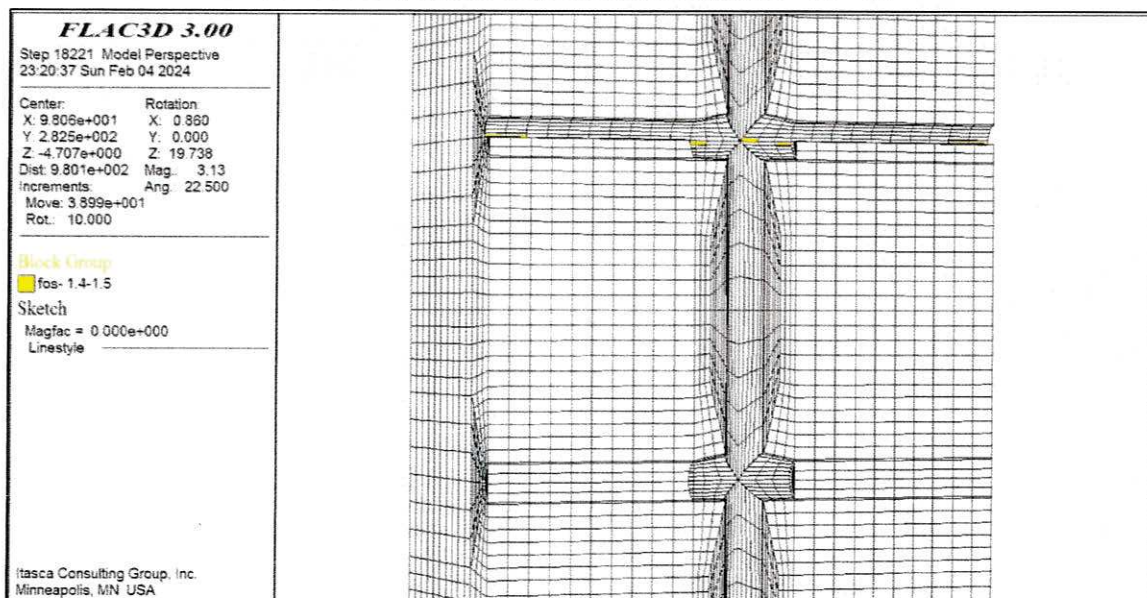
Obr. 128: Priebeh nevybalansovanej sily a stavu stability modelu

V oblasti ohlbne jamy pri zatopení podzemia po úroveň V. obzoru dochádza k zvislým deformáciám o veľkosti s maximom cca 17 cm (obr. 127).

Nevybalansovaná sila konverguje k nule, čo signalizuje stabilný stav modelu pri jeho zatopení po úroveň V. obzoru (obr. 128). V modeli prevládajú zóny s predispozíciami na šmykové a ťahové porušenie. V oblasti počvy chodieb vozíkových obehov a dopravných prekopov sa vyskytujú zóny s kombinovanými predispozíciami na šmykové a ťahové porušenie. Je to pravdepodobne spôsobené použitou technikou modelovania počvy týchto diel, kde došlo k ich dodatočnému primodelovaniu resp. prilpeniu (obr. 128).



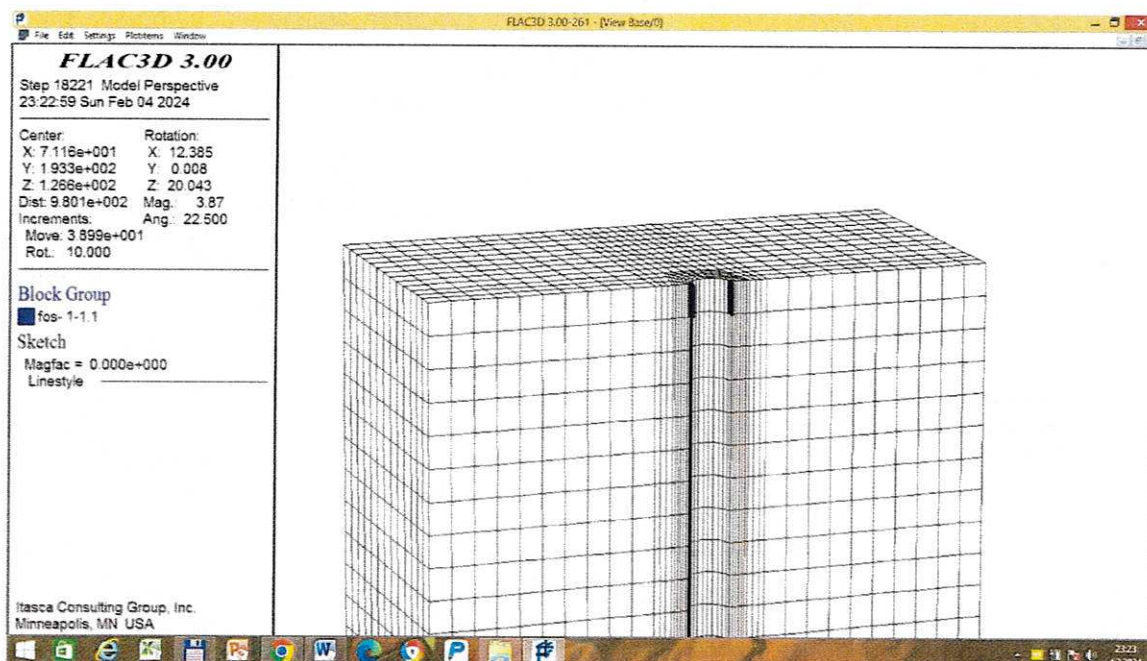
Obr. 129: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1,3 - 1,4>$



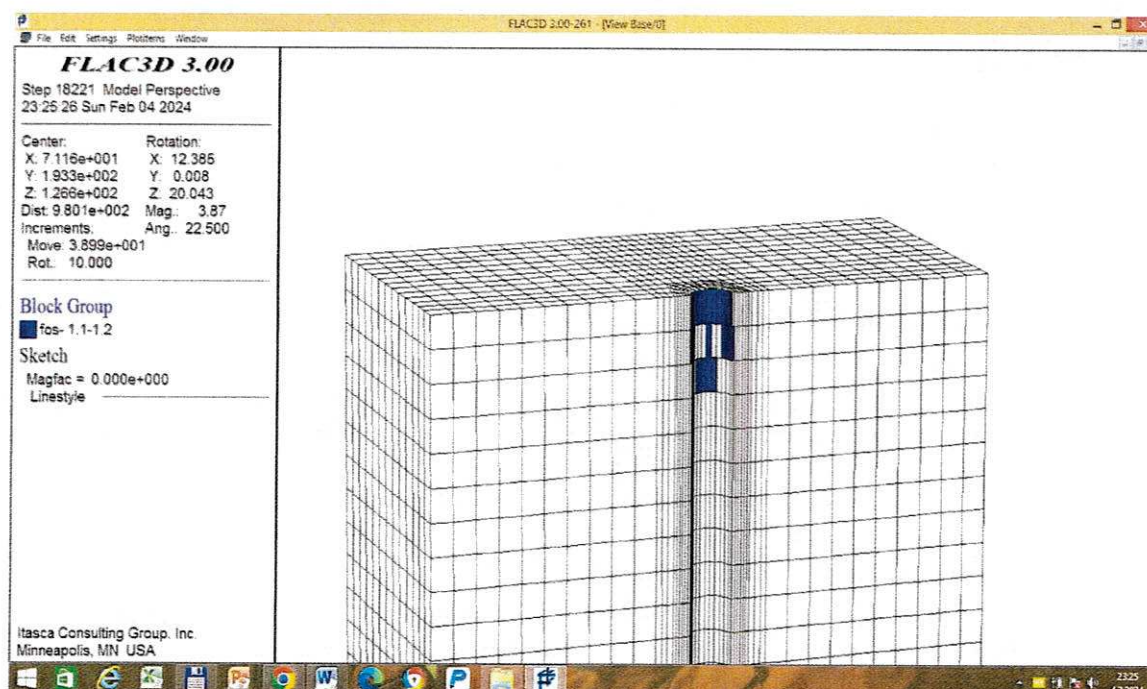
Obr. 130: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1,4 - 1,5>$

V oblasti pod úrovňou V. obzoru, kde sú znížené vlastnosti hornín a výstuže a oblasť je zatopená, sa nachádzajú vo výstuži miesta s najnižšími stupňami bezpečnosti, ktoré sú v intervale $<1,3 - 1,5>$ (obr. 129, 130). Zóny so stupňami bezpečnosti FoS < 1 sa v modeli nevyskytujú.

V oblasti ohľbne sa nevyskytujú zóny so stupňom bezpečnosti $FoS < 1$. Zatopenie jamy po úroveň V. obzoru nespôsobí kritický stav v stave stability.



Obr. 131: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1 - 1,1>$ - ohľbeň jamy



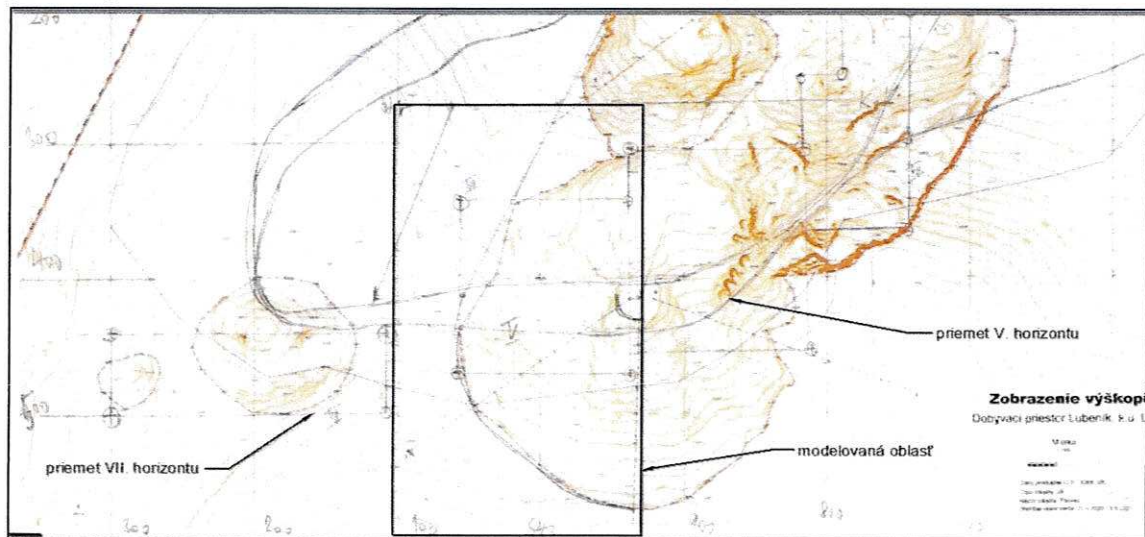
Obr. 132: Zóny stupňov bezpečnosti FoS v intervale $<1,1 - 1,2>$ - ohľbeň jamy

6.5 Posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem

Podobne ako v podkap. 6.2 a 6.3 bolo posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem realizované na základe zmeny hlavne deformačného stavu výpočtových modelov suchého a tzv. mokrého modelu cez inicializáciu pórových tlakov a znížením hodnôt mechanicko – pretvárných vlastností horninových typov nasiaknutých hornín. Pri vyhodnocovaní sa použila aj implementovaná „block state“ funkcia kódu Flac3D ako aj stupne bezpečnosti FoS podľa Mohr_Coulombovej teórie medzného stavu.

V správe pre tzv. suchý variant stability závalového pásma v DP Lubeník bola táto problematika riešená v podkap. 7.3, kde stabilita závalových pásiem bola posudzovaná cez rezy 4-4' a 11-11' (Vavrek, P., Vavreková, I., 2023). Rez 11-11' je priečny rez ložiskom, kde sú presne zadefinované geologické rozhrania aj stav vydobytých priestorov, preto bol tento rez použitý aj pri riešení tejto podkapitoly. Rez ložiskom 11-11', jeho umiestnenie je podrobnejšie popísané v správe pre tzv. suchý model (viď vyššie).

Rez 4 – 4' je vedený výrazne subparalelne k priečnym rezom ložiskom (viď geologicko-meračská dokumentácia vedená v SMZ Lubeník), preto nebol tento rez použitý v riešení podkap. 6.5. Pre komplexnejšie riešenie danej problematiky bol vytvorený 3D model záujmovej oblasti, ktorý bol pracovne nazvaný ako model tzv. „polzávalu“. Pri vytváraní modelu polovice závalovej oblasti sa vychádzalo z geodetického zamerania záujmovej oblasti od Ing. M. Plakingera technológiou LIDAR (obr. 133).



Obr. 133: Model „polzávalu“ (Plakinger, M., Vavrek, P.)

Zakreslenie jednotlivých priemetov ťažobných horizontov slúžilo na vytvorenie vydobytých priestorov vo výpočtovom numerickom modeli. Pri riešení tejto podkapitoly sa postupovalo podobne ako pri posudzovaní stability celého modelu v nasledujúcich krokoch:

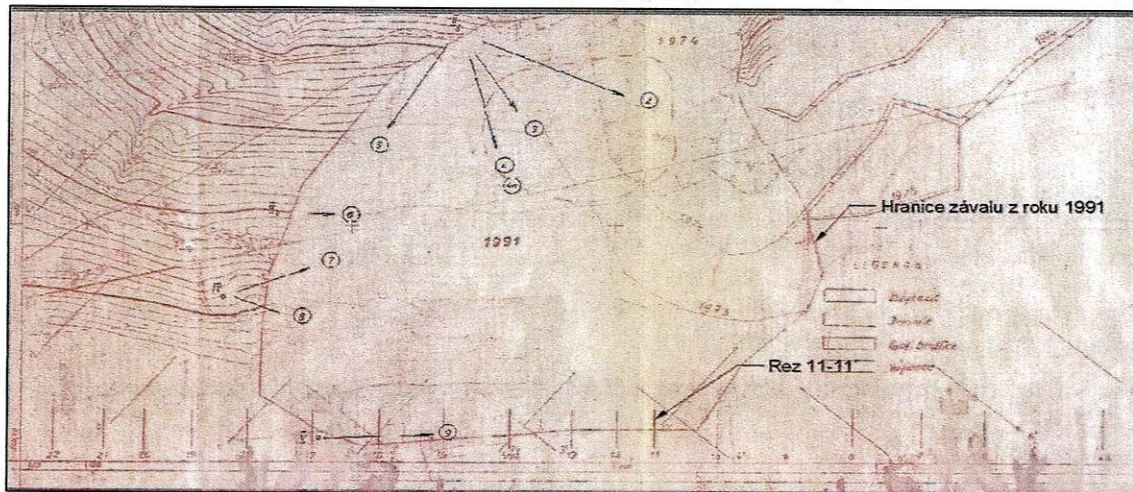
- 1) zistenie napätovo – deformačnej a stabilitej odozvy pre podmienky suchého stavu,
- 2) znulovanie vypočítaných deformácií, rýchlosti a stavu stability tzv. suchého modelu pre vymedzenie účinkov od pôsobenia podzemnej vody,
- 3) inicializácia pórových tlakov v príslušných hĺbkových úrovniach,
- 4) zníženie mechanicko – pretvárných parametrov modelovaných typov pod hladinou podzemnej vody so zohľadnením zmeny ich objemových hmotností pod a nad hladinou podzemnej vody.

Modely so zníženými vlastnosťami a pod účinkami pórových tlakov boli následne použité pri vyhodnocovaní účinkov podzemnej vody na stabilitu závalových pásiem. V suchom modeli bola táto otázka riešená aj pomocou stability posudzovaných rezov 11-11' a 4-4' metódou SRM (Strength Reduction Method). Vzhľadom k časovej náročnosti tejto metódy pri veľkých modeloch (polzával)

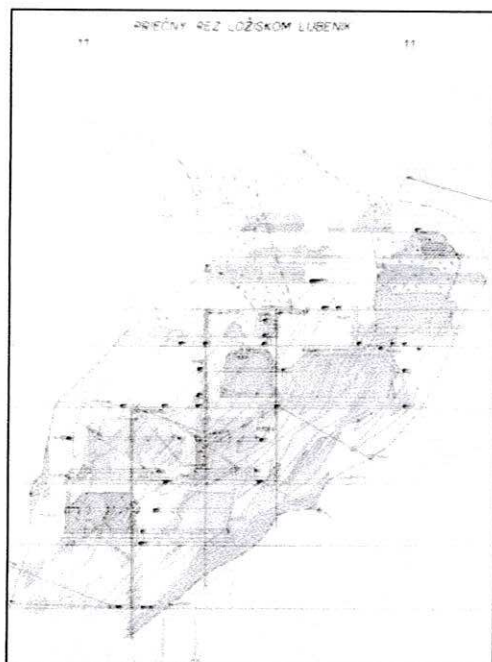
a problematickému chovaniu v podmienkach fluid-flow konštitučných vzťahoch, bolo od použitia tejto metódy upustené.

6.5.1 Stabilita závalového pásma v reze 11-11'

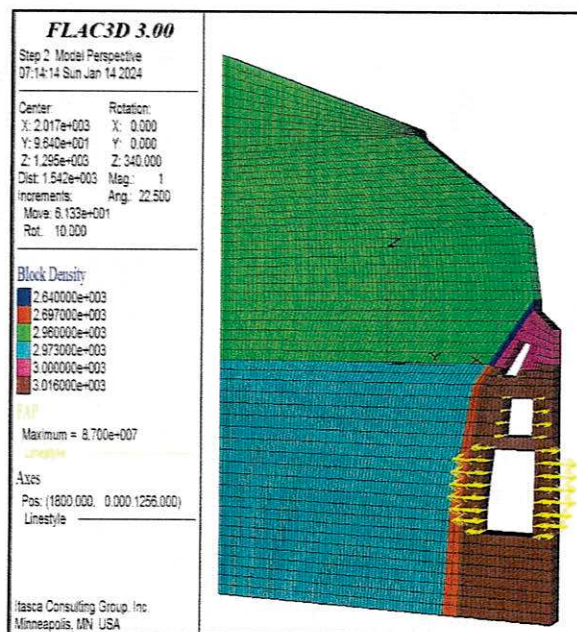
Pri riešení tejto problematiky bol použitý rez pričný rez ložiskom 11-11' ako v suchom modeli (obr. 134,135). Posudzovanie stability závalového pásma v reze 11-11' vychádzalo z rovnakých vlastností, ako pri riešení podkap. 6.2 a 6.3 (obr. 3). Vzhľadom k tomu, že podzemná voda pôsobí vo väčších hĺbkach pod povrchom terénu, bolo potrebné výpočtový model rezu 11-11' zo suchého modelu upraviť smerom do hĺbky, s vytvorením vydobytých priestorov v týchto podmienkach .



Obr. 134: Umiestnenie rezu 11-11' (SMZ Lubeník)



Obr. 135: Pričný rez ložiskom 11-11' (SMZ Lubeník)

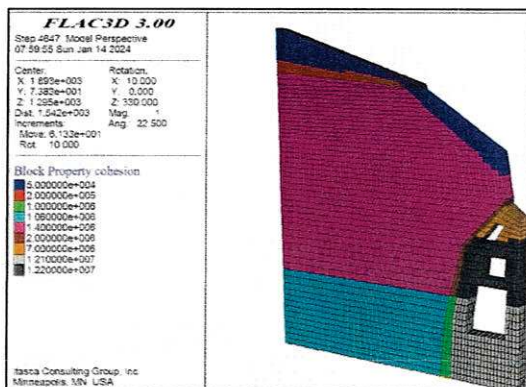


Obr. 136: Výpočtový model

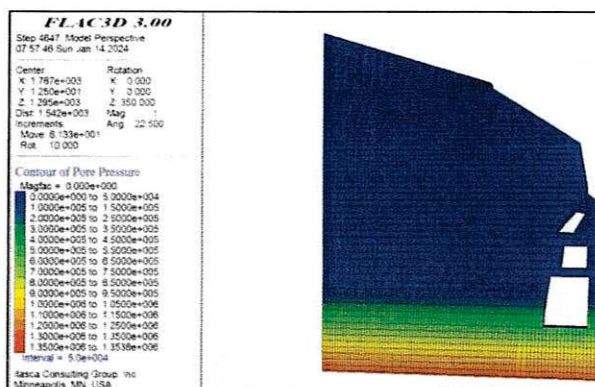
Vo výpočtovom modeli boli implementované v jednotlivých hĺbkových úrovniach bočné sily, ktoré nahrádzajú pôsobenie bočných hydrostatických tlakov od podzemnej vody (obr. 136).

6.5.1.1 Stabilita rezu 11-11' pri zatopení podzemia po úroveň 172 m n. m. (VII. obzor)

Z dôvodu výrazného zvetrania pripovrchovej vrstvy vápencov resp. vyššieho nadložia boli ich mechanicko – pretvárne vlastnosti znížené oproti hlbšiemu nadložiu (obr. 137).

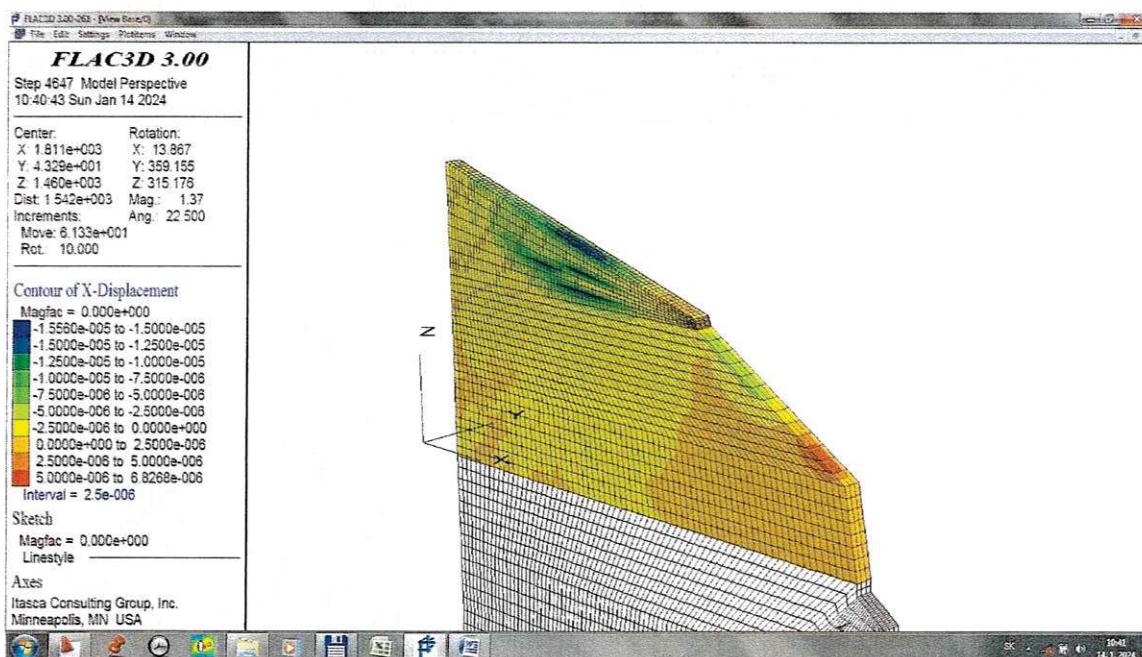


Obr. 137: Vlastnosti hornín v modeli (súdržnosť)



Obr. 138: Pôsobenie pórových tlakov

Pórové tlaky z nulovej hodnoty na úrovni VII. horizontu lineárne narastajú na úroveň cca 1,4 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 138).



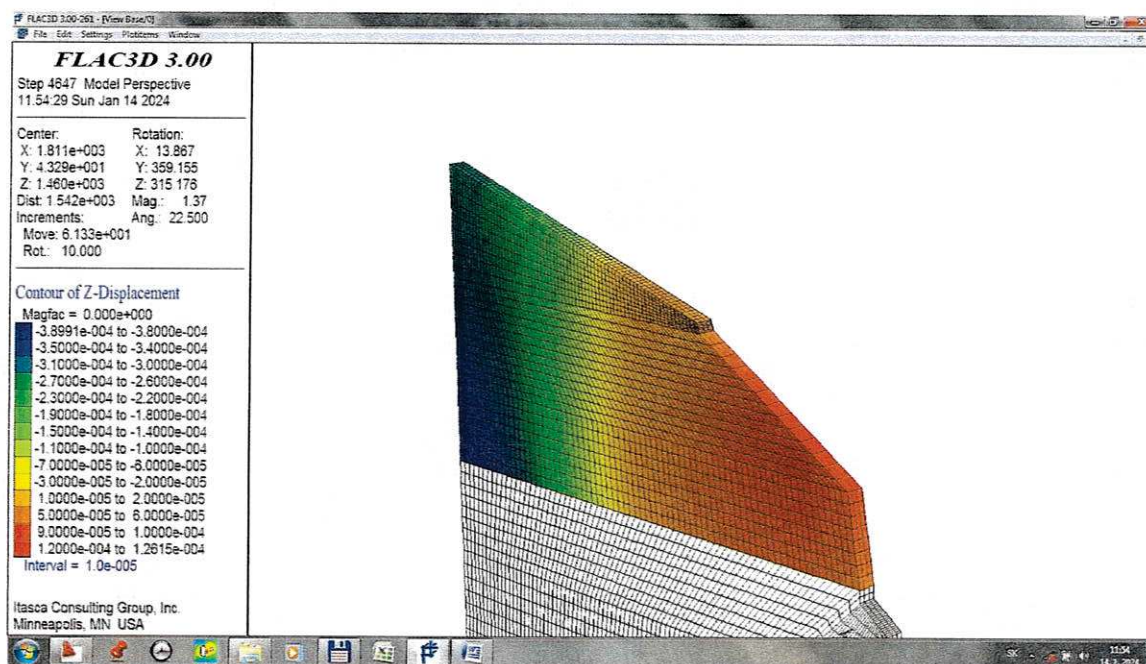
Obr. 139: Priebeh horizontálnych deformácií v smere osi x

Výpočtový numerický model má v smere osi y dĺžku 25 m s hustotou delenia zón v tomto smere 5 m. Aby pri prezentovaní výstupov z modelu neboli výsledky skresľované okrajovými deformačnými podmienkami, sú výstupy z tohto modelu vedené cez stred modelu.

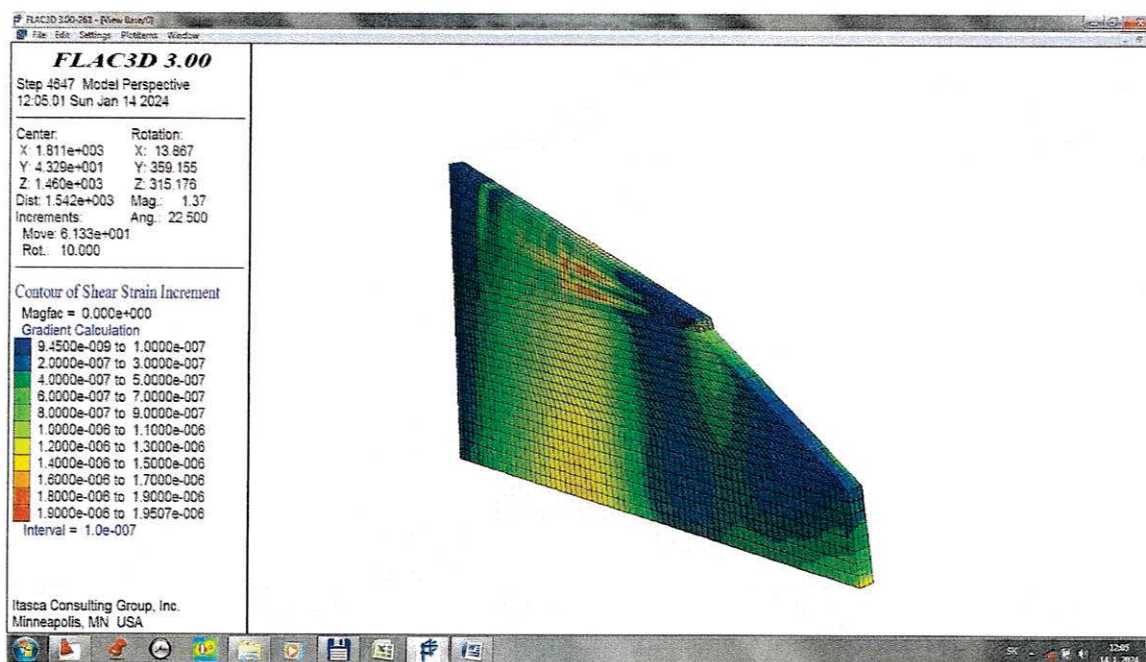
Predmetom tejto podkapitoly je stabilita závalového pásma, preto sú v nasledujúcich grafických výstupoch prezentované výsledky numerického modelovania v jeho vrchnej časti.

Maximum deformácií v smere osi x sa sústreďuje vo vrchnej časti rezu v oblasti povrchu a dosahuje hodnoty cca $2e5$, čo je cca 0,02 mm, čo je zanedbateľná hodnota (obr. 139).

Vertikálne deformácie v smere osi z dosahujú maximálne hodnoty na úrovni cca 0,4 mm, ktoré pôsobia v smere gravitácie a sústreďujú sa v ľavej časti výpočtového modelu. V jeho pravej časti deformácie v smere osi z pôsobia proti smeru gravitácie a dosahujú maxima na úrovni cca 0,12 mm. V obidvoch prípadoch ide taktiež v absolútnom vyjadrení o veľmi malé deformácie (obr. 140).

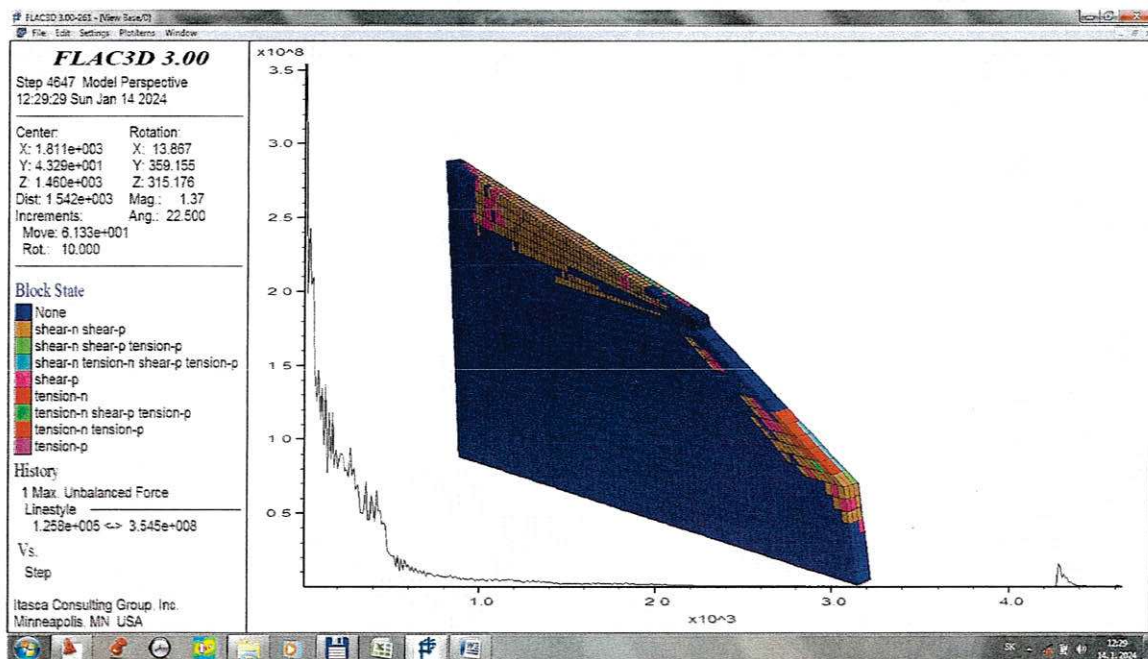


Obr. 140: Priebeh vertikálnych deformácií v smere osi z

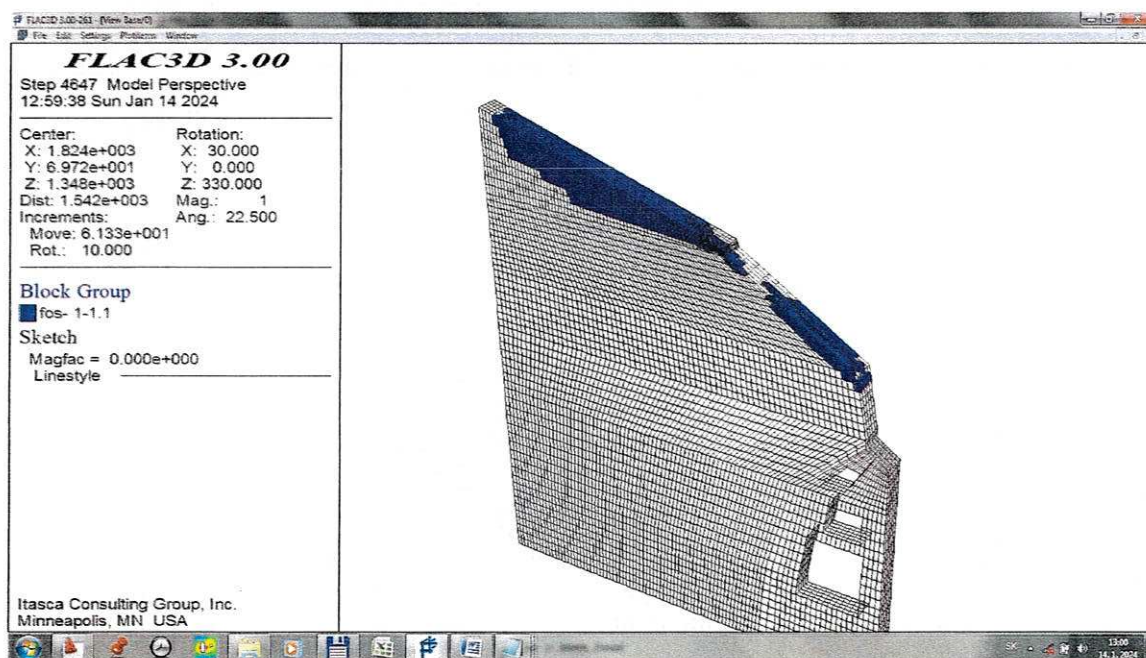


Obr. 141: Prírastok šmykového pretvorenia

Maximá prírastkov šmykových pretvorení sa sústreďujú na kontakt viac a menej porušených resp. zvetraných vápencov. Druhé maxima sa koncentrujú do oblasti prieniku povrchu terénu so šikmou stenou závalu, do oblasti subvertikálneho poklesu terénu (obr. 141).



Obr. 142: Stav stability modelu a priebeh nevybalansovanej sily



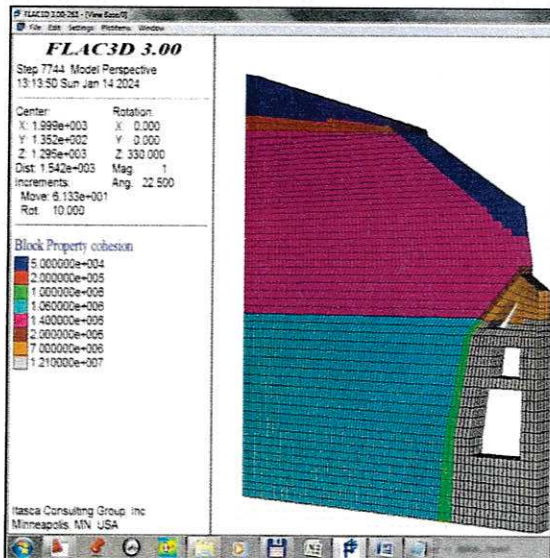
Obr. 143: Stupne bezpečnosti FoS (Factor of Safety) v intervale <1-1,1>

Model je v stabilnom stave v komplexnom pohľade, ako aj oblasti závalových pásiem sú v stabilnom stave pri zatopení ložiska po úroveň VII. obzoru a po znížení mechanicko – pretvárných vlastností pod úrovňou hladiny podzemnej vody, o čom vypovedá priebeh nevybalansovanej sily a block state funkcia (obr. 142). V modeli sa vyskytujú prevažne zóny s predispozíciou na šmykové a ťahové porušovanie.

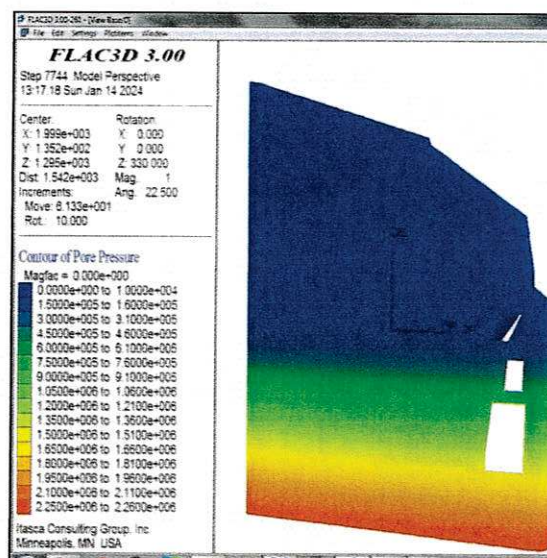
Najnižšie stupne bezpečnosti podľa Mohr_Coulombovej podmienky medzného stavu v intervale <1-1,1> sa koncentrujú do priepovrchovej oblasti, v ktorej sa nachádzajú zóny so zníženými parametrami vyššieho nadložia (obr. 143). Ostatné zóny majú vyššie stupne bezpečnosti.

6.5.1.2 Stabilita rezu 11-11' pri zatopení podzemia po úroveň 282 m n. m. (V. obzor)

Z dôvodu výrazného zvetrania pripovrchovej vrstvy vápencov resp. vyššieho nadložia boli ich mechanicko – pretvárne vlastnosti znížené oproti hlbšiemu nadložíu, vlastnosti sa menia aj pod hranicou pôsobenia podzemnej vody (obr. 144).

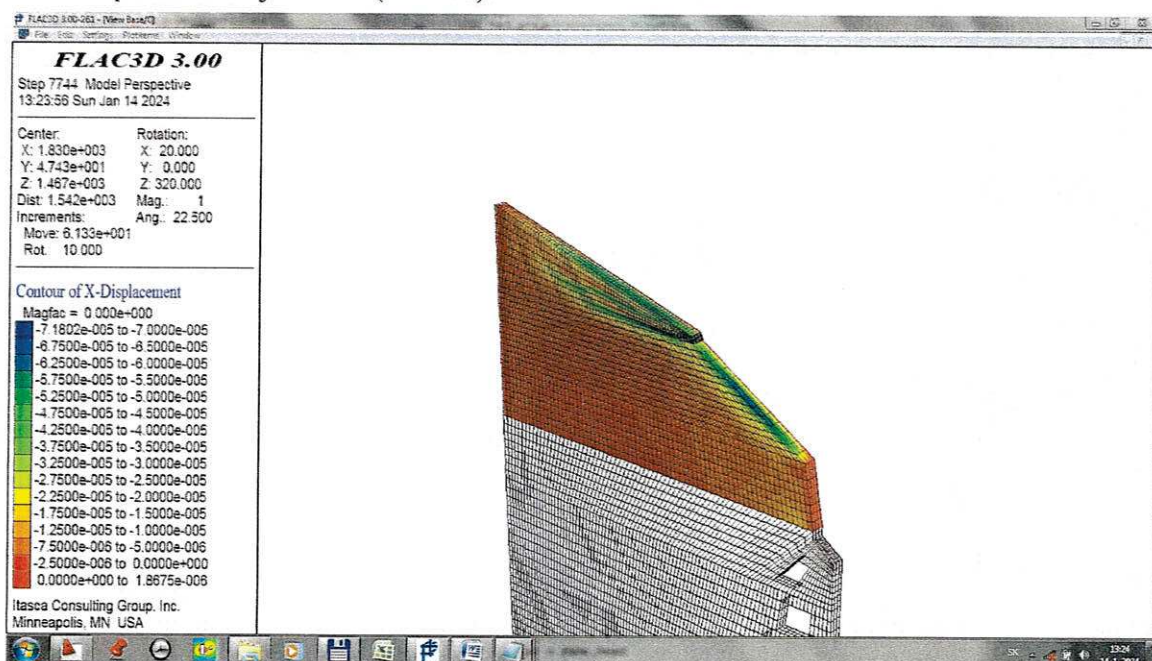


Obr. 144: Vlastnosti hornín v modeli (súdržnosť)



Obr. 145: Pôsobenie pórových tlakov

Pórové tlaky z nulovej hodnoty na úrovni V. horizontu lineárne narastajú na úroveň cca 2,3 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 145).

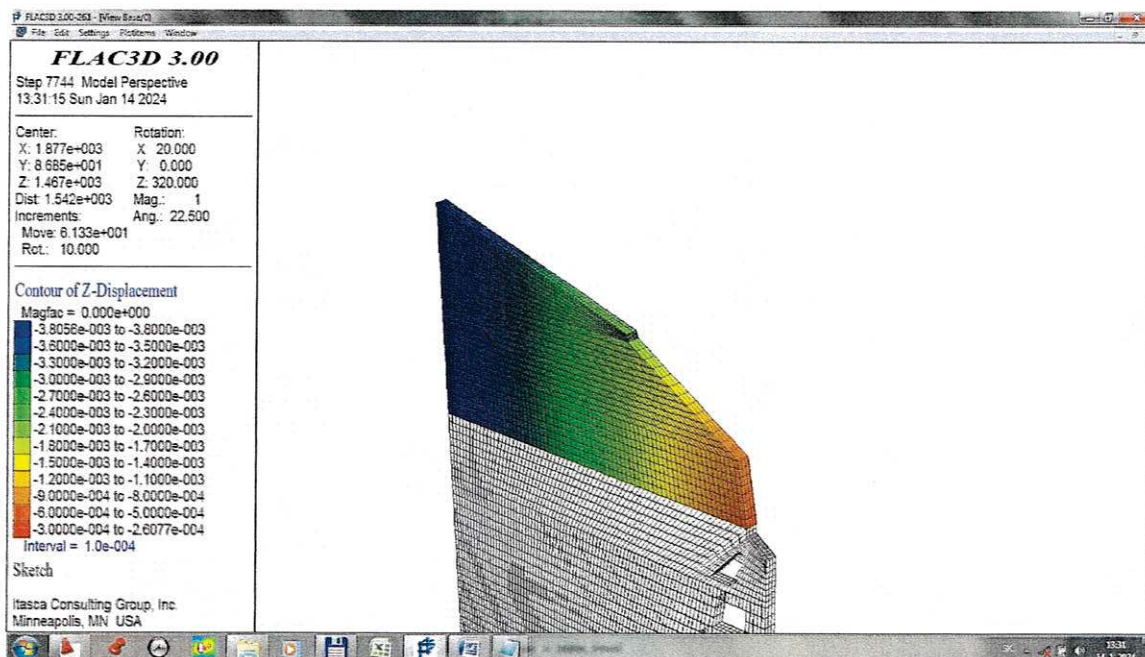


Obr. 146: Priebeh horizontálnych deformácií v smere osi x

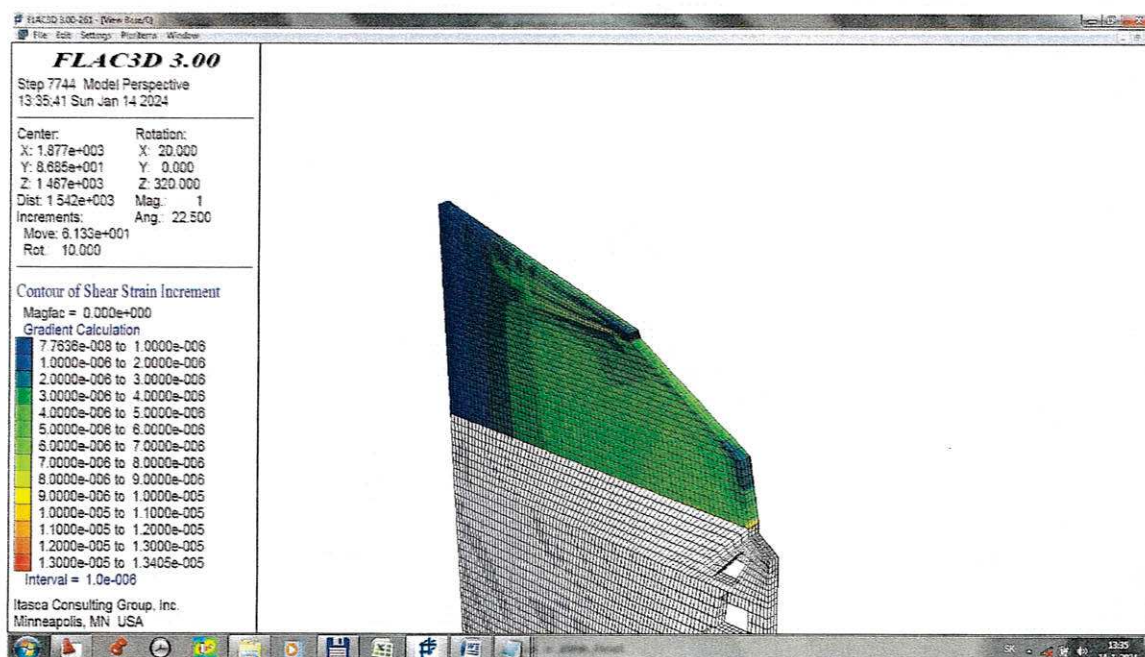
Maximum bočných deformácií v smere osi x sa sústreďuje vo vrchnej časti rezu v oblasti povrchu a dosahuje hodnoty cca $7e5$, čo je cca 0,07 mm, čo je zanedbateľná hodnota (obr. 146). So zvyšovaním úrovne hladiny podzemnej vody sa maximum týchto deformácií presúva smerom k subhorizontálnemu poklesu terénu, na kontakte plynššia časť a strmšia časť terénu (obr. 146).

Vertikálne deformácie v smere osi z dosahujú maximálne hodnoty na úrovni cca 4 mm, ktoré pôsobia v smere gravitácie a sústreďujú sa v ľavej časti výpočtového modelu. V jeho pravej časti

deformácie v smere osi z pôsobia proti smeru gravitácie a dosahujú maximá na úrovni cca 3 mm. V obidvoch prípadoch ide taktiež v absolútnom vyjadrení o veľmi malé deformácie s minimálnym dopadom na stabilitu závalového pásma v reze 11 – 11' (obr. 147).

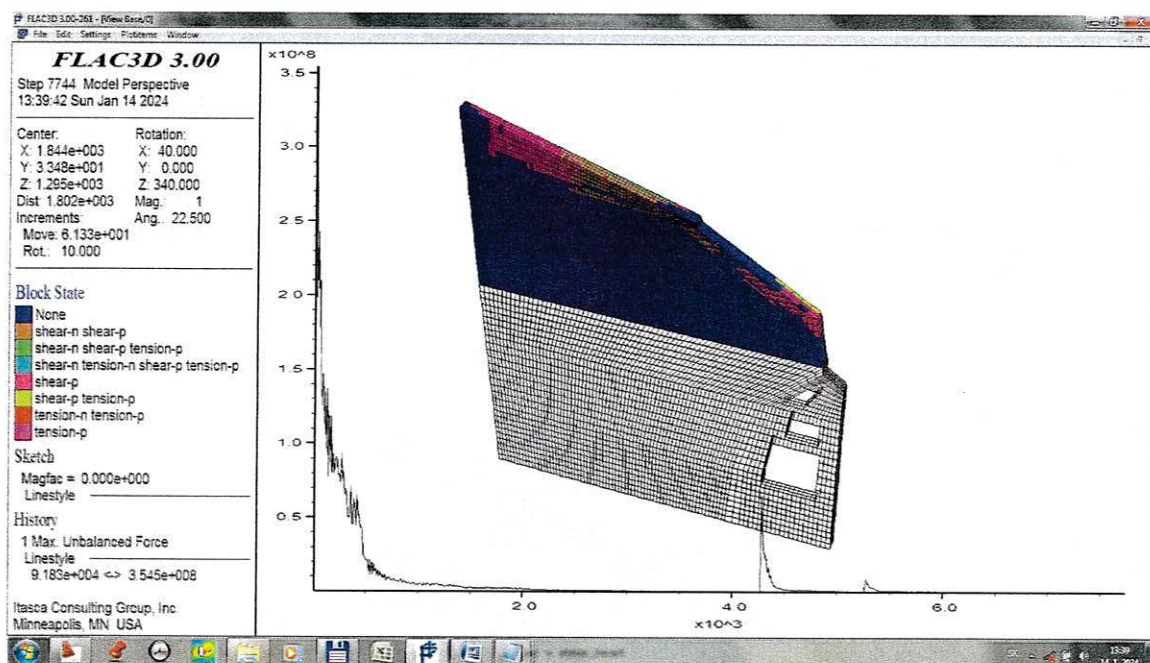


Obr. 147: Priebeh vertikálnych deformácií v smere osi z

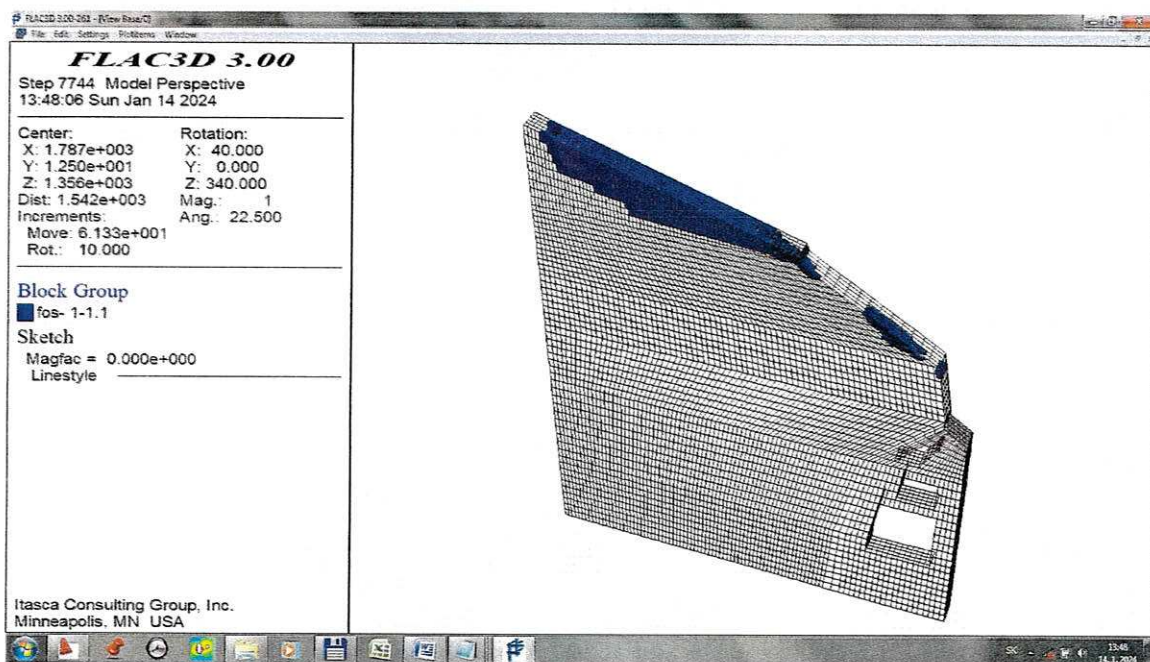


Obr. 148: Prírastok šmykového pretvorenia

Maximá prírastkov šmykových pretvorení sa sústreďujú na kontakt viac a menej porušených resp. zvetraných vápencov. Druhé maximá sa výraznejšie oproti predchádzajúcemu variantu koncentrujú do oblasti prieniku povrchu terénu so šikmou stenou závalu, do oblasti subvertikálneho poklesu terénu (obr. 148).



Obr. 149: Stav stability modelu a priebeh nevybalansovanej sily



Obr. 150: Stupne bezpečnosti FoS (Factor of Safety) v intervale $<1-1,1>$

Model je v stabilnom stave v komplexnom pohľade, ako aj oblasti závalových pásiem sú v stabilnom stave pri zatopení ložiska po úroveň V. obzoru a po znížení mechanicko – pretvárných vlastností pod úrovňou hladiny podzemnej vody, o čom vypovedá priebeh nevybalansovanej sily a block state funkcia (obr. 149). V modeli sa vyskytujú prevažne zóny s predispozíciou na šmykové a ťahové porušovanie.

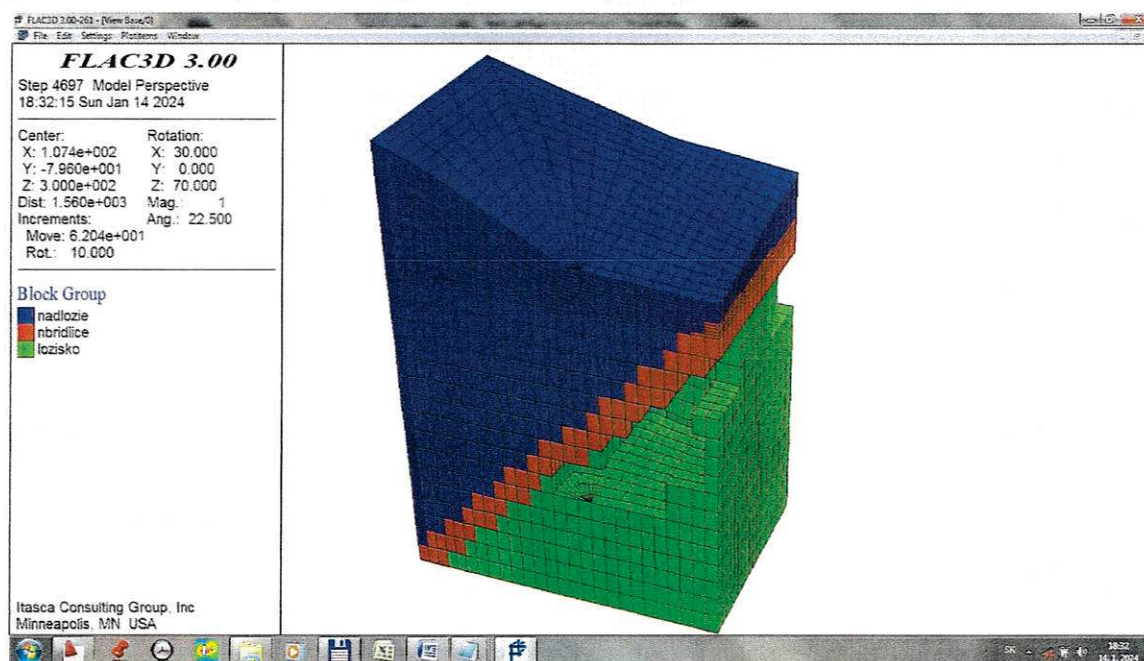
Najnižšie stupne bezpečnosti podľa Mohr-Coulombovej podmienky medzného stavu v intervale $<1-1,1>$ sa koncentrujú do pripovrchovej oblasti, v ktorej sa nachádzajú zóny so zníženými parametrami vyššieho nadložia (obr. 150). Ostatné zóny majú vyššie stupne bezpečnosti.

Oproti predchádzajúcemu variantu nedošlo k podstatnej zmeny v počte a umiestení zón s najnižšími stupňami bezpečnosti.

6.5.2 Stabilita závalového pásma pri zatopení podzemia stanovená pomocou tzv. polzávalu

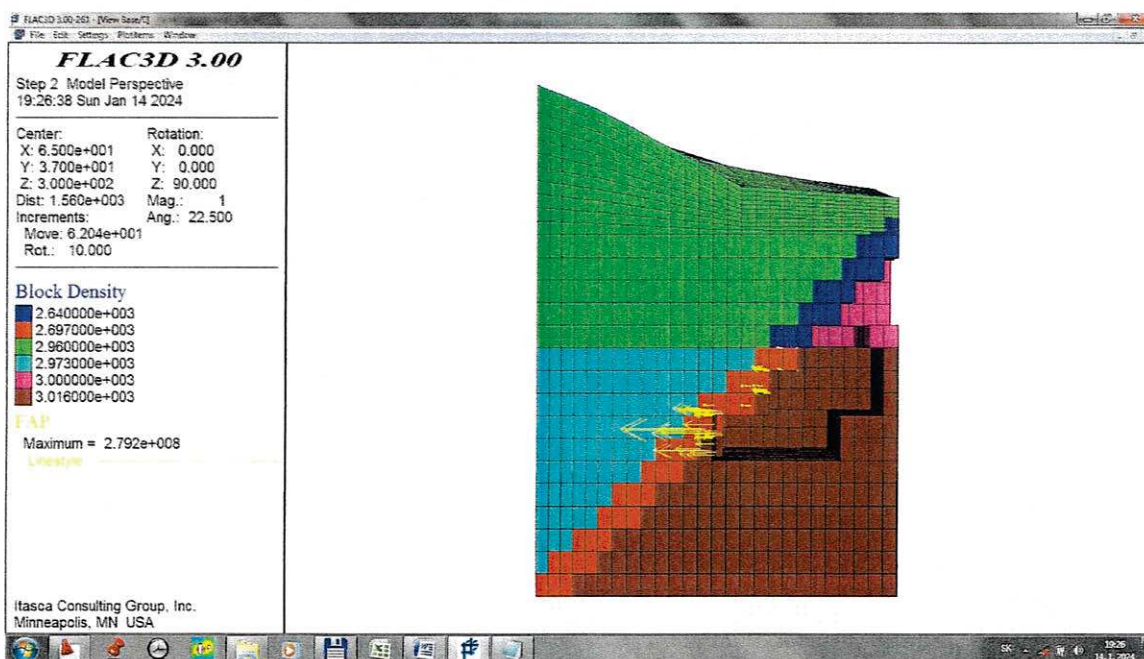
Ako je uvedené na začiatku podkapitoly. 6.5, vzhľadom na problematické vymedzenie rezu 4-4' z geologického a technologického hľadiska bol vytvorený komplexnejší 3D model približne polovice vrchnej časti závalového pásma, tzv. „polzával“, ktorého umiestnenie je zadefinované na obr. 1.

Model polzávalu je tvorený 3 typmi hornín (obr. 151) s rovnakými vlastnosťami ako horniny použité v modeloch pri predchádzajúcich variantoch (obr. 20).



Obr. 151: Horninové typy použité pri stavbe modelu tzv. polzávalu

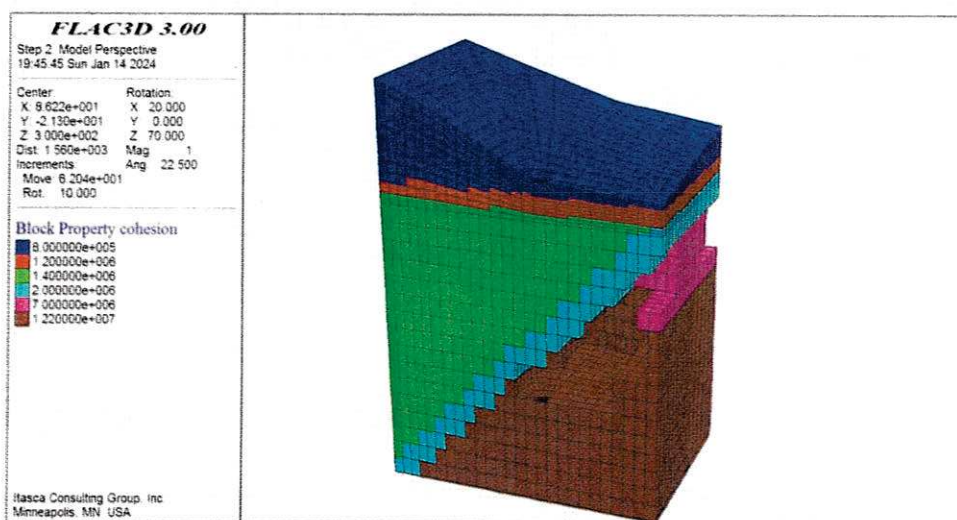
Horizontálne tlaky od hydrostatického tlaku vody boli nahradené zodpovedajúcimi bočnými silami (Apply Body Force) (obr. 152).



Obr. 152: Implementácia bočných tlakov vody

Pri riešení problematiky stability závalového pásma je dôležitým aspektom deformačná odozva povrchu terénu v oblasti závalového pásma a jeho šikmých stien na zatopenie banského podzemia. Preto bola pri zhotovovaní modelu venovaná menšia pozornosť pod úroveň povrchu terénu a bola použitá neupravovaná hexaedrická sieť pri vytváraní siete hlavne nadložných bridlíc a vydobytých priestorov, čo výrazne skrátilo čas tvorby takéhoto zjednodušeného modelu. Všetky dôležité aspekty tvorby tohto zjednodušeného podzemia (vlastnosti hornín, sklony vrstvy nadložných bridlíc, veľkosti vydobytých priestorov) však boli zachované.

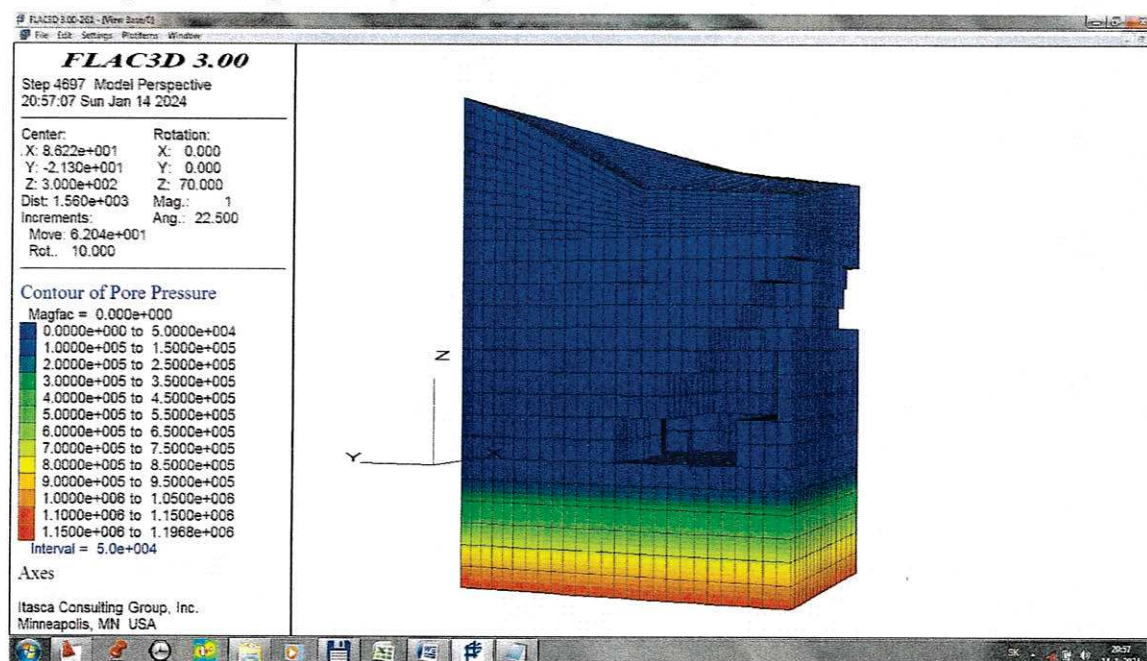
Pripovrchové vrstvy vápencov (vyššieho nadložia) majú vzhľadom na stav zvetrania znížené mechanicko-pretvárne vlastnosti v porovnaní s nižším nadložím (obr. 153).



Obr. 153: Vlastnosti modelovaných typov hornín

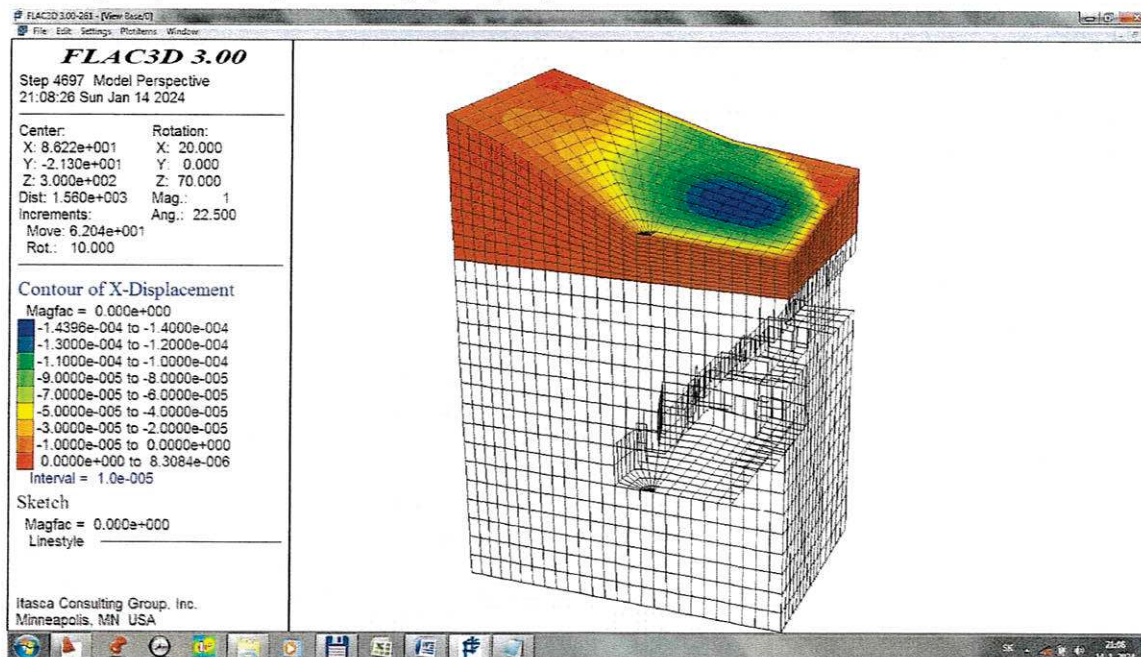
6.5.2.1 Stabilita polzávalu pri zatopení podzemia po úrovni VII. obzoru (172 m n. m.)

Pórové tlaky z nulovej hodnoty na úrovni VII. obzoru lineárne narastajú na hodnotu cca 1,2 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 154).

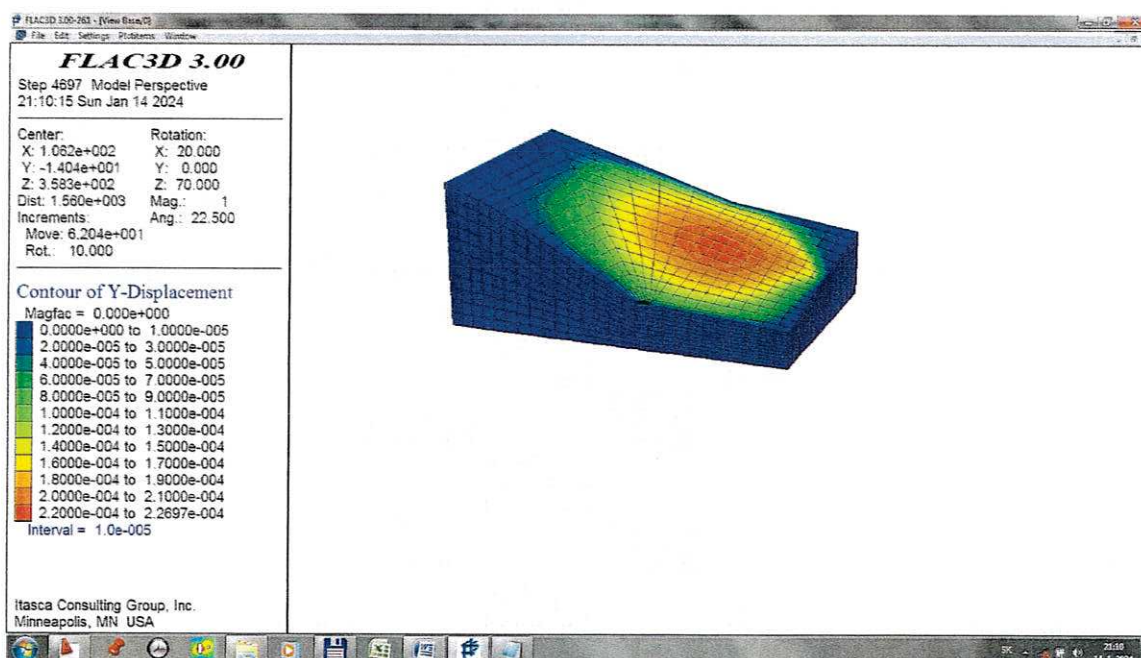


Obr. 154: Pribeh pórových tlakov

Na nasledujúcich obrázkoch sú prezentované výstupy vrchnej časti modelu, ktoré sú rozhodujúce pri riešení problematiky podkapitoly 6.5.



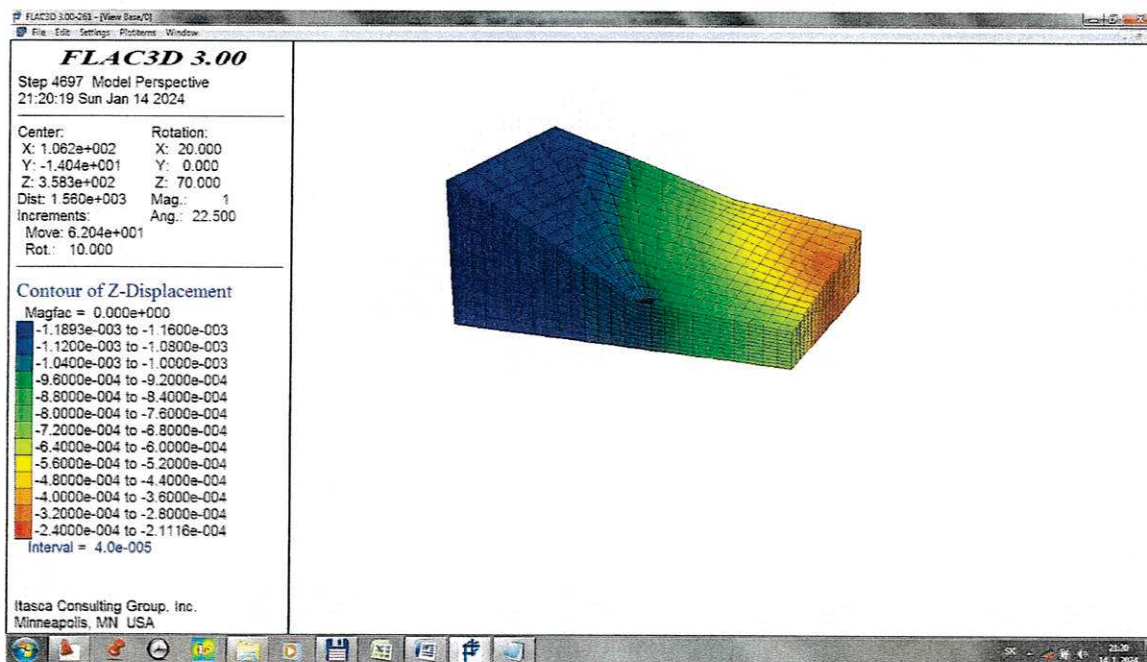
Obr. 155: Priebeh horizontálnych deformácií v smere osi x



Obr. 156: Priebeh horizontálnych deformácií v smere osi y

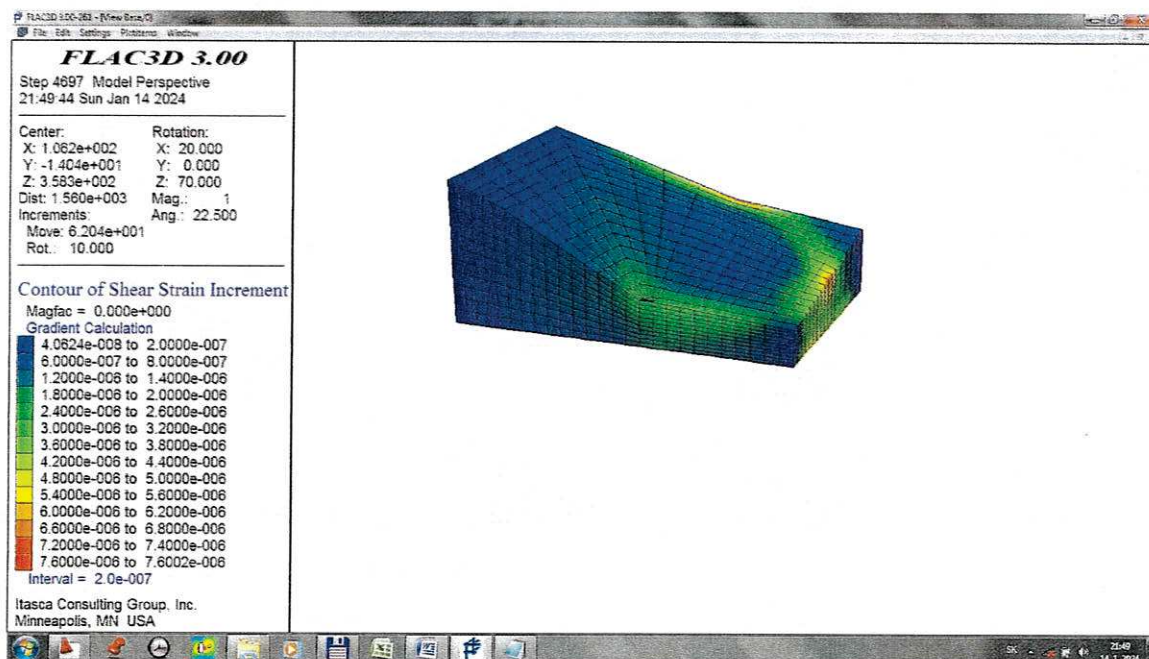
Maximum horizontálnych deformácií v smere osi x sa sústreďuje v oblasti nad vydobytými priestormi v spodnej časti modelovaného závalového pásma. Dosahuje hodnoty o veľkosti cca 0,14 mm (obr. 155). V oblasti vrchnej časti šikmých stien závalu sú tieto deformácie rozsahom ešte menšie.

Maximum horizontálnych deformácií v smere osi y sa koncentruje v oblasti nad vydobytými priestormi smerom na šikmé steny závalu. Dosahuje hodnoty o veľkosti cca 0,23 mm (obr. 156). V oblasti vrchnej časti šikmých stien závalu sú tieto deformácie rozsahom menšie.



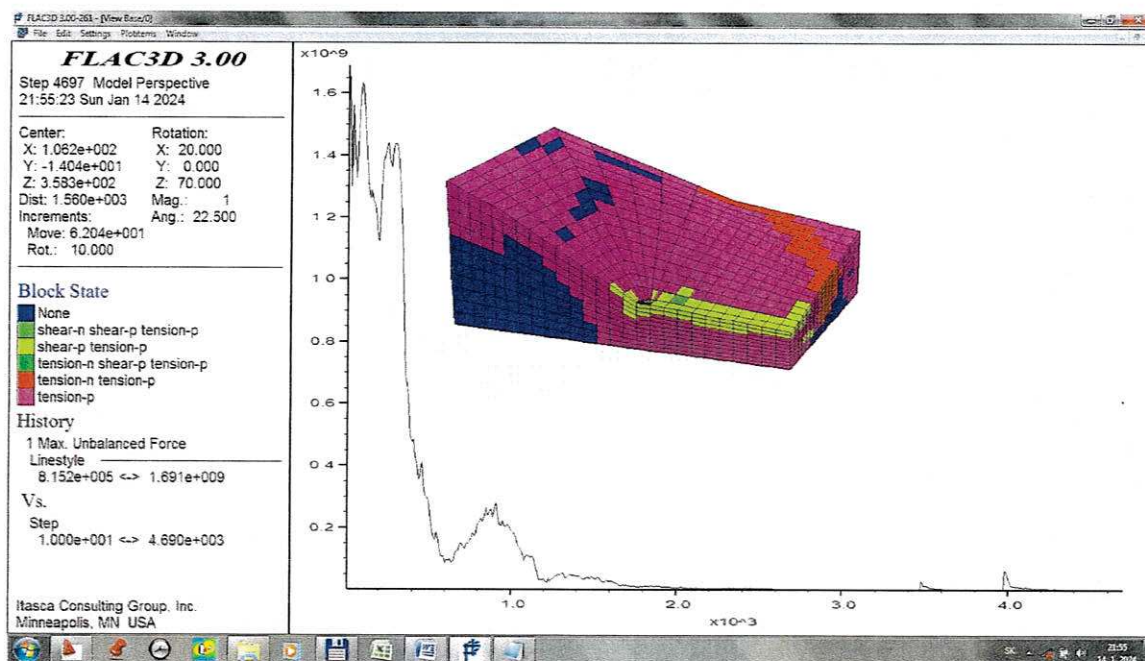
Obr. 157: Priebeh vertikálnych deformácií

Rozsahom najväčšie deformácie sú pretvorenia v zvislom smere s maximom o veľkosti cca 1 mm v oblasti vrchnej časti závalového pásma (modrá farba) (obr. 157).

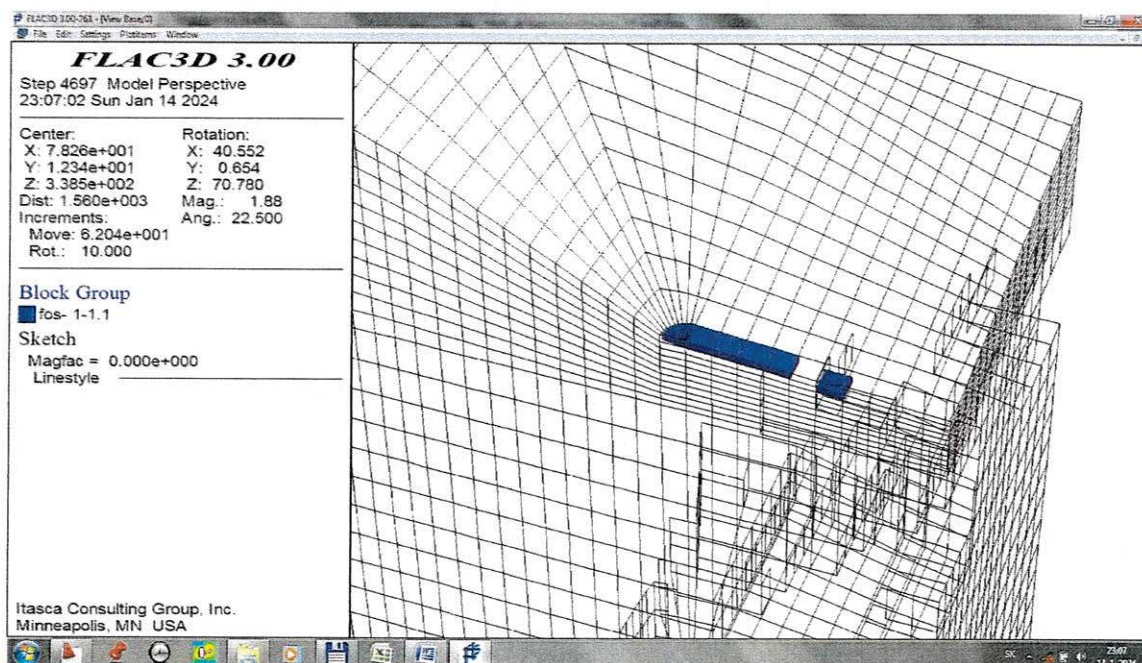


Obr. 158: Prírastok šmykového pretvorenia

Maximum šmykového pretvorenia sa koncentruje do oblasti okrajov výpočtového modelu v ich hornej časti. Druhá oblasť maxima prírastu šmykového pretvorenia sa sústreďuje nad vydobytou oblasťou a do vrchnej časti čelného svahu závalu (obr. 158).



Obr. 159: Stav stability modelu a priebeh nevybalansovanej sily



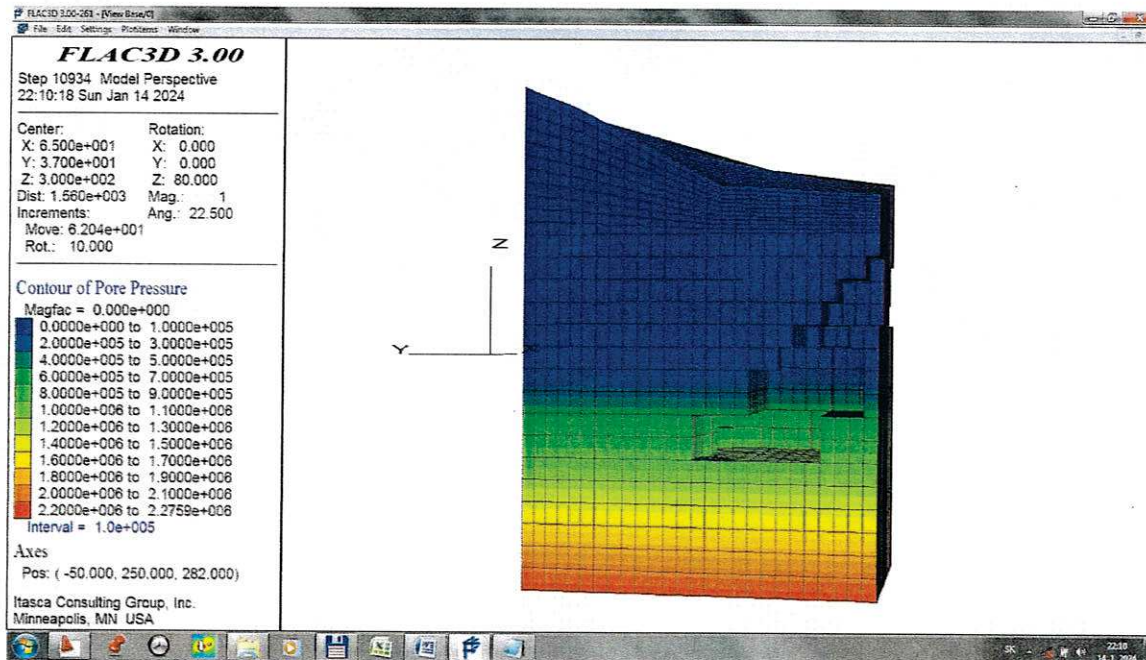
Obr. 160: Stupne bezpečnosti FoS (Factor of Safety) v intervale <1-1,1>

Konvergujúci priebeh nevybalansovanej sily poukazuje na stabilný stav výpočtového modelu pri riešenom variante. Prevládajúcimi zónami z hľadiska stability sú modelované entity s predispozíciou na ťahové porušovanie. Zhhlukujú sa hlavne do oblasti dna závalu nad vydobytými priestormi (obr. 159).

Podobne aj najnižšie stupne bezpečnosti FOS v intervale <1-1,1> sa koncentrujú nad dnom závalového pásma (obr. 160).

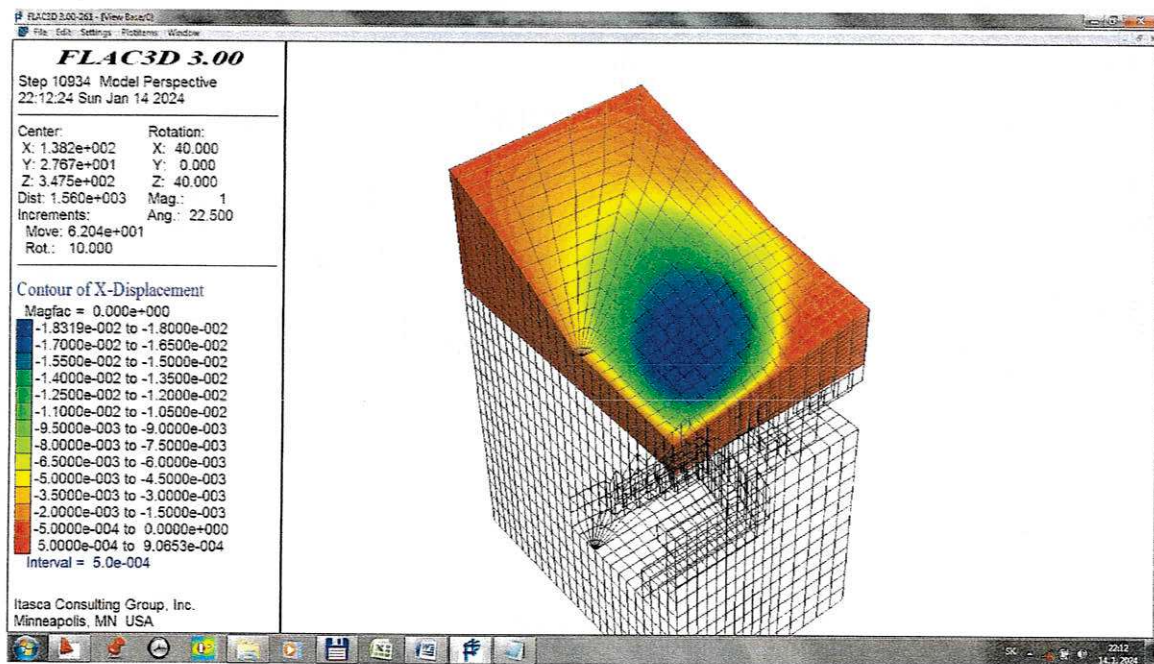
6.5.2.2 Stabilita polzávalu pri zatopení podzemia po úroveň V. obzoru (282 m n. m.)

Pórové tlaky z nulovej hodnoty na úrovni V. obzoru lineárne narastajú na hodnotu cca 2,3 MPa na spodnom okraji modelu (obr. 161).

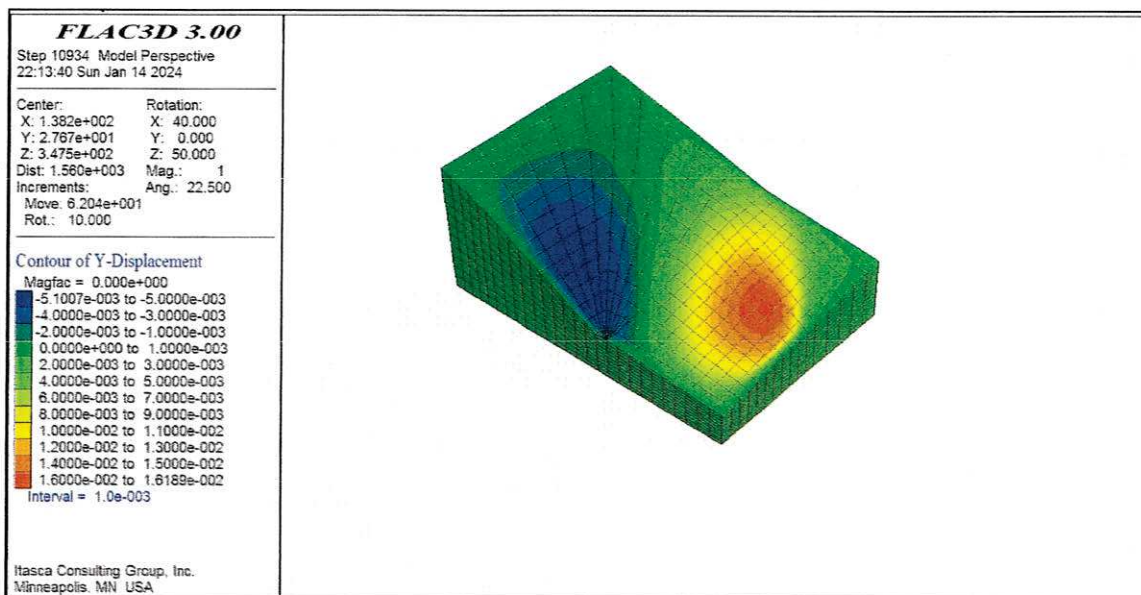


Obr. 161: Priebeh pórových tlakov

Na nasledujúcich obrázkoch sú prezentované výstupy vrchnej časti modelu, ktoré sú rozhodujúce pri riešení problematiky podkapitoly 6.5.



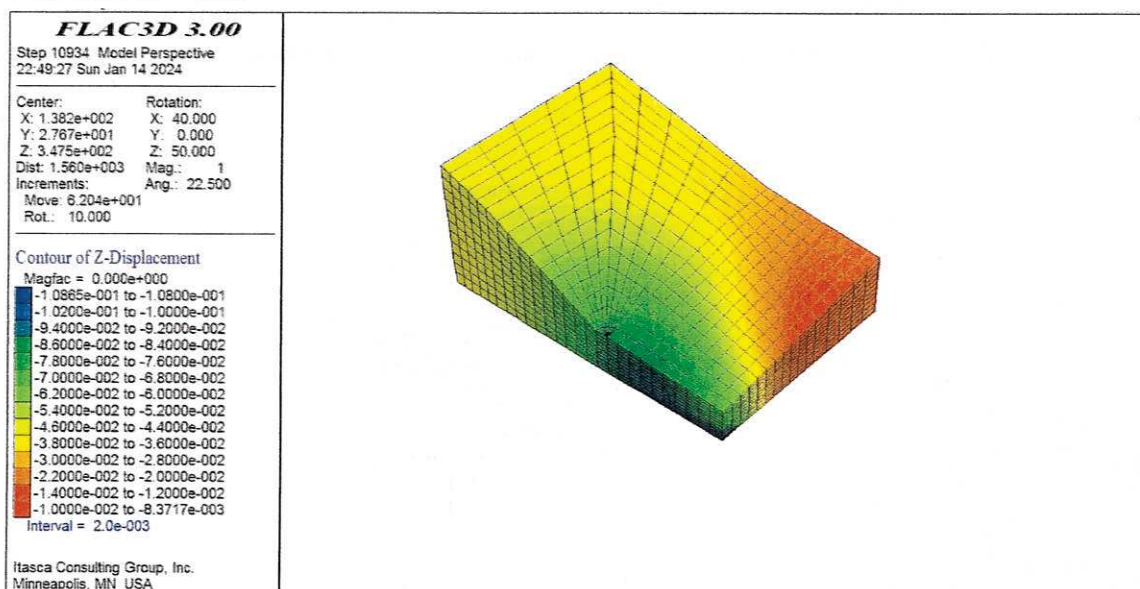
Obr. 162: Priebeh horizontálnych deformácií v smere osi x



Obr. 163: Priebeh horizontálnych deformácií v smere osi y

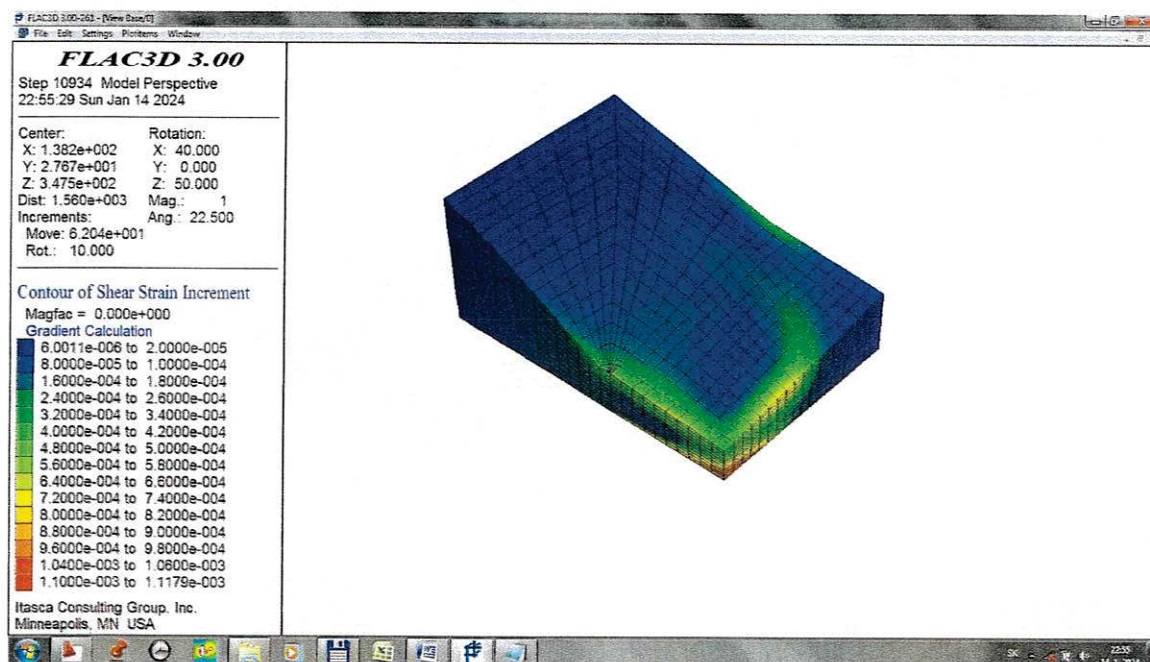
Maximum horizontálnych deformácií v smere osi x sa sústreďuje v oblasti nad vydobytými priestormi v spodnej časti modelovaného závalového pásma. Dosahuje hodnoty o veľkosti cca 1,8 cm (obr. 162). V oblasti vrchnej časti šikmých stien závalu sú tieto deformácie rozsahom menšie.

Maximum horizontálnych deformácií v smere osi y sa koncentruje v oblasti nad vydobytými priestormi smerom na šikmé steny závalu. Dosahuje hodnoty o veľkosti cca 1,6 cm (obr. 163). V oblasti vrchnej časti šikmých stien závalu sú tieto deformácie rozsahom menšie a dosahujú maximá o veľkosti cca 5 mm.



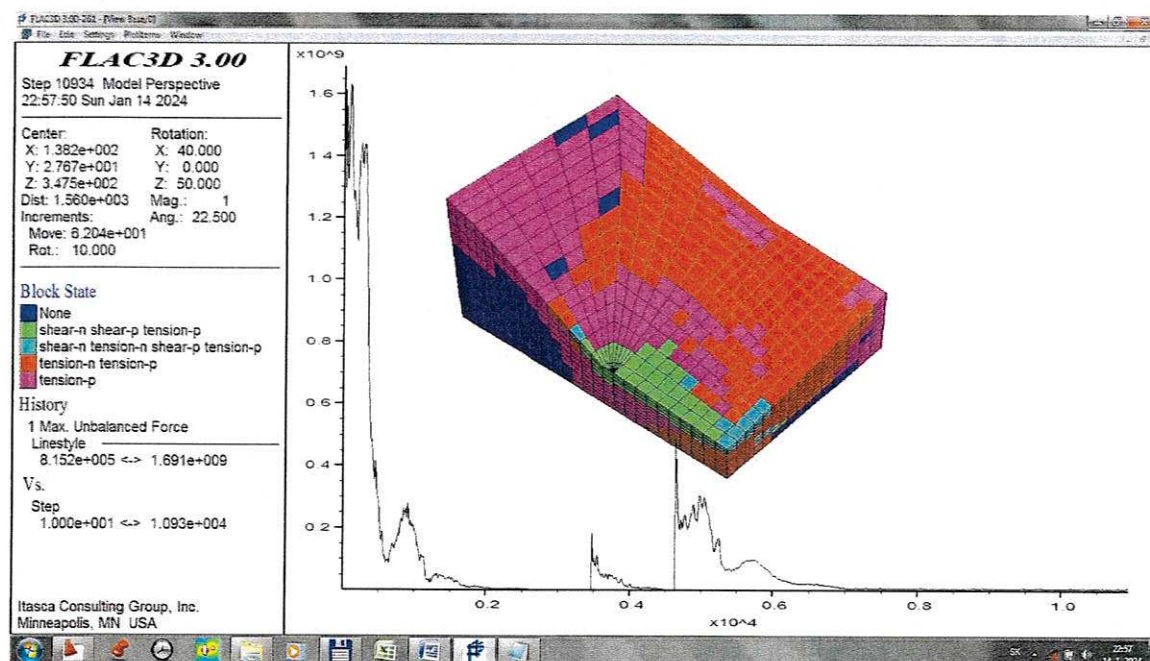
Obr. 164: Priebeh vertikálnych deformácií

Rozsahom najväčšie deformácie sú pretvorenia v zvislom smere s maximom o veľkosti cca 11 cm v oblasti dna závalového pásma (modrá farba). Vo vrchnej časti čelnej steny závalu dosahujú deformácie úrovne cca 3 – 6 cm (žltá až svetlozelená farba) (obr. 164).

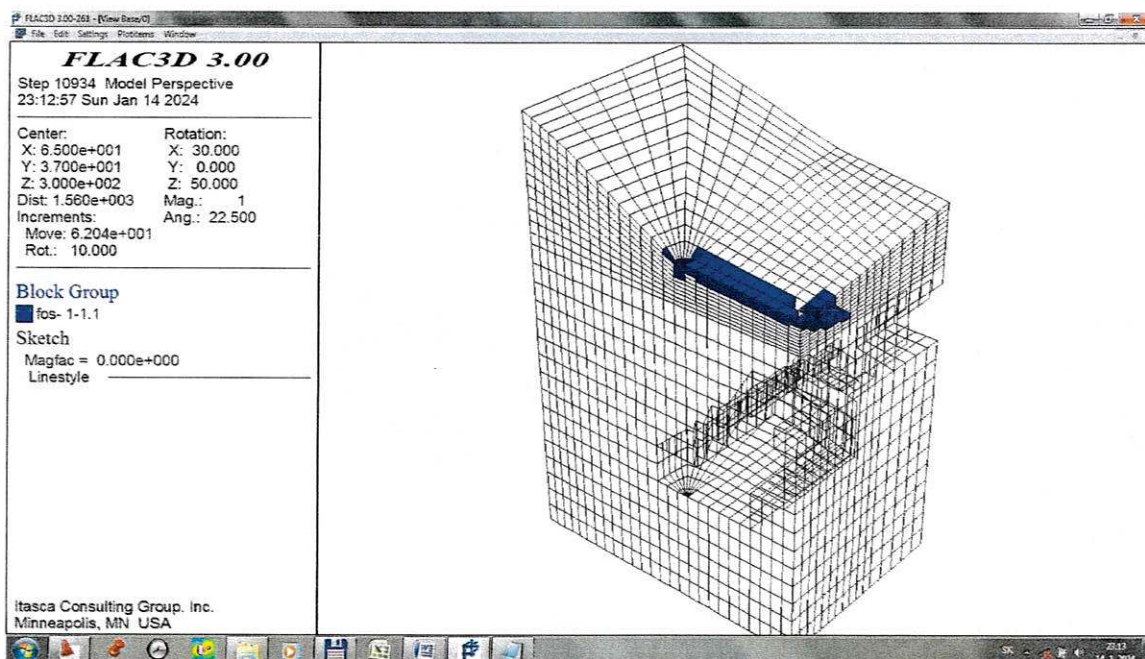


Obr. 165: Prírastok šmykového pretvorenia

Maximum šmykového pretvorenia sa koncentruje do oblasti okrajov výpočtového modelu a nad vydobytou oblasťou. Druhá oblasť maxima prírastku šmykového pretvorenia sa sústreďuje do vrchnej časti čelného svahu závalu (obr. 165).



Obr. 166: Stav stability modelu a priebeh nevybalansovanej sily



Obr. 167: Stupne bezpečnosti FoS (Factor of Safety) v intervale $<1-1,1>$

Konvergujúci priebeh nevybalansovanej sily poukazuje na stabilný stav výpočtového modelu pri riešení variante. Prevládajúcimi zónami z hľadiska stability sú modelované entity s predispozíciou na ťahové porušovanie a porušenie. Zhlukujú sa hlavne do oblasti pravej strany svahov závalového pásma. Nad dnom závalu vznikajú zóny s kombinovaným porušovaním (obr. 166). V porovnaní s predchádzajúcim variantom je počet menej stabilných zón vyšší.

Podobne aj najnižšie stupne bezpečnosti FOS v intervale $<1-1,1>$ sa koncentrujú nad dnom závalového pásma (obr. 167). Ich počet je väčší ako pri predchádzajúcom variante.

7. Zhodnotenie výsledkov numerického modelovania

V podkap. 6.1 sú prezentované výsledky numerického geotechnického modelovania. V prvej časti tejto podkapitoly je vykonané posúdenie stavu stability horninového masívu pre tzv. celý model pri zatopení banského podzemia po úroveň VII. a V. obzoru. V strednej časti podkapitoly 6.1 sú uvedené výsledky posúdenia stability jamy č. 3 so stanovením bezpečnostného pásma tejto šachty. Záverečná súčasť tohto segmentu práce je zameraná na posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem.

Každá z týchto podetáp práce začína stanovením východzieho tzv. suchého stavu s následnou inicializáciou nulových stavov deformácií, rýchlosti a stavu stability, aby boli presne vyšpecifikované dôsledky zatopenia banskej prevádzky v zvolených hĺbkových úrovniach.

Rezultáty modelovania pre suchý stav nie sú súčasťou tohto posudku. Tejto problematike bola venovaná práca z prvej polovice roka 2023 (Vavrek, P., Vavreková, I., 2023). Z dôvodu potreby stanovenia pórovitosti n pre modelované horninové typy pri mokrom variante, bolo potrebné vychádzať z objemových a zodpovedajúcich merných hmotností dotknutých hornín. Preto nebolo možné použiť výsledky modelovania suchého stavu z vyššie citovanej práce vzhľadom na použitie zmenených objemových hmotností pri mokrom variante. K zásadným zmenám vo výsledkoch modelovania suchého variantu v práci z roku 2023 a v tejto práci však nedošlo.

Vzhľadom hlavne na deformačný charakter riešenej úlohy (deformácie povrchu terénu) boli výstupy jednotlivých variant zamerané na priebehy deformácií v zvolených posudzovaných rezoch v priestore (v smere osi x,y,z). Okrem vertikálnych deformácií sú v grafických výstupoch uvádzané aj horizontálne deformácie v posudzovaných rezoch. V jednotlivých variantoch (zatopenie po úroveň VII. a V. obzoru) boli posudzované aj dopady na stav stability modelu pomocou funkcie Block_State, priebehu nevybalansovanej sily a stupňa bezpečnosti FoS (Factor of Safety) vypočítaného podľa Mohr-Coulombovej teórie medzného stavu.

7.1 Stabilita horninového masívu, tzv. celý model

Veľkosť vypočítaných horizontálnych deformácií v smere osi x a y podmienených účinkami podzemnej vody resp. pórových tlakov a znížených mechanicko-deformačných vlastností modelovaných typov hornín sa pohybuje rádovo v centimetroch, hodnoty zvislých deformácií dosahujú úroveň približne rádovo v desiatkach centimetrov (do cca 35 cm). Deformácie povrchu terénu sú spravidla menšie ako sú maximálne hodnoty, ktoré sa inicializujú hlavne v oblasti dobývok.

V nasledujúcej tab. 10 sú uvedené maximálne deformácie celého modelu v smere osi z , x a y (obr.24–44) a jeho uplift pre všetky posudzované rezy pri zatopení podzemia po úroveň VII. horizontu.

Tab. 10: Deformácie modelu po zatopení VII. obzoru – celý model

Rezy	MD _{zt} (cm)	MD _{yt} (cm)	MD _{xt} (cm)	MD _{zpo} (cm)	MD _{ypo} (cm)	MD _{xpo} (cm)	MD _{zu} (cm)	MD _{yu} (cm)	MD _{xu} (cm)
225 m	14,5	0,6	4,8	18,7	4,0	6,5	10,5	1,0	3,6
301 m	14,0	0,8	4,9	18,1	4,4	7,0	11,0	1,2	3,0
377 m	14,3	1,0	4,9	17,0	4,2	11,2	10,0	1,3	3,2
475 m	15,2	0,5	4,9	20,0	6,0	11,1	10,0	1,4	2,5
554 m	15,0	0,5	3,9	17,8	4,2	8,8	10,0	1,3	2,4
620 m	15,5	0,5	2,6	20,6	5,5	4,4	9,5	0,6	2,3
682 m	16,0	0,2	1,4	20,0	4,4	2,8	9,5	0,3	2,3

Pozn.: MD – maximálne deformácie; zt, yt, xt – v smere osi z, y, x; t – terénu; po – podzemia; u – uplift (zdvih terénu)

Tab. 11: Deformácie modelu po zatopení V. obzoru – celý model

Rezy	MD _{zt} (cm)	MD _{yt} (cm)	MD _{xt} (cm)	MD _{zpo} (cm)	MD _{ypo} (cm)	MD _{xpo} (cm)	MD _{zu} (cm)	MD _{yu} (cm)	MD _{xu} (cm)
225 m	25,1	2,5	9,3	24,8	7,1	18,6	16,0	0,5	13,8
301 m	24,9	3,0	9,3	25,2	11,0	18,6	16,0	3,0	10,0
377 m	24,8	3,5	9,3	25,4	10,9	18,6	15,0	1,5	7,1
475 m	24,0	2,0	9,3	33,1	12,9	21,1	16,0	1,6	7,0
554 m	23,8	2,5	7,6	10,6	10,3	14,2	22,2	2,0	5,0
620 m	24,8	2,2	6,6	24,7	6,7	14,7	17,0	2,1	5,2
682 m	24,1	1,1	4,0	25,7	5,3	11,9	17,0	0,9	2,7

V tab. 11 sú uvedené maximálne deformácie celého modelu v smere osi z, x a y (obr. 62 – 82) pre všetky posudzované rezy pri zatopení podzemia po úroveň V. horizontu a zdvih (uplift) terénu.

Vplyvom zatopenia bane dochádza k najväčším deformáciám v zvislom smere. V závislosti od posudzovaného rezu sa hodnoty vertikálnych deformácií povrchu terénu pri mokrej likvidácii podzemia po úroveň VII. obzoru pohybujú v rozmedzí cca 14 – 16 cm. V podzemí sa pre tento variant maximá pohybujú v intervale približne 17 – 21 cm. Horizontálne deformácie terénu v smere osi x dosahujú maximá na úrovni cca 1 – 5 cm, podzemia cca 3 – 11 cm. Najmenšie deformácie sú dosiahnuté v smere osi y (východno-západnom smere), na povrchu terénu dosahujú veľkosti približne 0,2 – 1 cm, v podzemí 4 – 6 cm. Podobne tendencie sú zachované aj pri veľkosti zdvihu. Najväčší zdvih terénu sa dosahuje v zvislom smere o veľkosti cca 9 – 11 cm, menšie v smere osi x (2,3 – 3,6 cm) a najmenšie v smere osi y (0,3 – 1,4 cm).

V závislosti od posudzovaného rezu sa hodnoty vertikálnych deformácií povrchu terénu pri mokrej likvidácii podzemia po úroveň V. obzoru pohybujú v rozmedzí cca 24 – 25 cm. V podzemí sa pre tento variant maximá pohybujú v intervale približne 10 – 33 cm. Horizontálne deformácie terénu v smere osi x dosahujú maximá na úrovni cca 4 – 9 cm, podzemia cca 12 – 21 cm. Najmenšie deformácie sú dosiahnuté v smere osi y (východno-západnom smere), na povrchu terénu dosahujú veľkosti približne 1 – 3,5 cm, v podzemí 5 – 13 cm. Podobné tendencie sú zachované aj pri veľkosti zdvihu. Najväčší zdvih terénu sa dosahuje v zvislom smere o veľkosti cca 15 – 22 cm, menšie v smere osi x (3 – 14 cm) a najmenšie v smere osi y (0,5 – 3 cm).

Podľa výpočtového modelu, pri vyššej úrovni hladiny zatopenia podzemia dochádza k väčším pretvoreniam podzemia aj povrchu terénu, naopak pri nižších úrovniach zatopenia podzemia dochádza k menším prejavom mokrej likvidácie na povrch terénu, v podzemí aj pri zdvihu terénu.

Modely pri obidvoch variantoch mokrej likvidácie sú v stave parciálnej stability, priebehy nevybalansovaných síl konvergujú k nule, čo potvrdzuje aj stabilita horninového masívu vyhodnotená pomocou funkcie block state.

Zmeny počtu zón s rôznymi intervalmi FoS pri dosiahnutí zatopenia podzemia po VII. a V. obzor sú uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 12.

Tab. 12: Počet zón FoS

Zatopenie	Počet zón stupňov bezpečnosti FoS					
	<1-1,1>	<1,1-1,2>	<1,2-1,3>	<1,3-1,4>	<1,4-1,5>	<1,5-1,6>
po VII. obzor	9 166	5 521	3 797	2 735	2 040	1 827
po V. obzor	11 416	3 464	3 324	2 707	2 268	2 045

Z hľadiska počtu zón FoS pre vrchnú časť modelu pri zatopení podzemia po VII. a V. obzor nedochádza k výraznej zmene počtu zón pri týchto variantoch. Množstvo zón so stupňami bezpečnosti s najnižšími hodnotami sú pre V. obzor vyššie ako pri zatopení VII. obzoru. Pri niektorých vyšších stupňoch bezpečnosti je tento pomer opačný (tab. 12).

Podobný trend je potvrdený aj pri stanovení počtu zón s rôznymi prípadmi porušenia pri aplikovaní funkcie block_state (tab. 13).

Tab. 13: Rôzne spôsoby porušenia

Zatopenie	Počet zón s rôznymi spôsobmi porušenia			
	tension_n	shear_n	tension_past	shear_past
po VII. obzor	501	10 154	13 353	46 657
po V. obzor	415	5 163	32 461	73 058

Pozn.: tension_n – ťahové porušovanie, shear_n – šmykové porušovanie, tension_past – predispozícia na ťahové porušenie, shear_past – predispozícia na šmykové porušenie

Zóny s predikciou na ťahové porušenie resp. porušovanie sa v modeli vyskytujú v oveľa menšej miere ako zóny na šmykové porušenie alebo možné porušovanie.

V niektorých prípadoch sa v modeli vyskytujú väčšie počty zón po zatopení po VII. obzor ako po zatopení V. obzoru, v niektorých prípadoch je to naopak, t.j. po zatopení V. obzoru je väčší výskyt zón s daným typom porušenia ako pri zatopení VII. obzoru (tab. 13).

Podobným spôsobom ako v predchádzajúcej tabuľke boli vyčíslené zóny s rôznym stupňom porušenia aj pre modelovanú variantu zdvihu (uplift).

Tab. 14: Rôzne spôsoby porušenia - uplift

Zatopenie	Počet zón s rôznymi spôsobmi porušenia - uplift			
	tension_n	shear_n	tension_past	shear_past
po VII. obzor	660	296	15 796	55 845
po V. obzor	1084	169	37 660	77 040

Zóny s predikciou na ťahové porušovanie sa v modeli vyskytujú v menšej miere ako zóny na šmykové porušovanie. Zóny na šmykové porušovanie sa vyskytujú vplyvom upliftu v menšej miere ako pri ťahovom porušovaní.

V prípade zón so šmykovým porušovaním (shear_n) sa v modeli vyskytujú väčšie počty zón po zatopení po VII. obzor ako po zatopení V. obzoru, v ostatných prípadoch je to naopak, t.j. po zatopení V.obzoru je väčší výskyt zón s daným typom porušenia ako pri zatopení VII.obzoru (tab. 14).

Z deformačného hľadiska dochádza vplyvom zatápania a postupného zvyšovania hladiny podzemnej vody až pod definitívnu výšku zatopenia k zhoršovaniu stavu. Deformácie však nedosahujú také hodnoty, ktoré by mali výrazný deštruktívny charakter.

Zo stabilného hľadiska (block state, FoS) dochádza v niektorých prípadoch k zhoršeniu stavu a v niektorých prípadoch k opačnému javu pri zvýšení hladiny zatopenia podzemia zo VII. obzoru na V. obzor. Tento jav je možné pravdepodobne vysvetliť stabilizačným účinkom podzemnej vody v horizontálnom smere pri zvýšených úrovniach zatápania.

7.2 Stabilita jamy č. 3

Veľkosť vypočítaných horizontálnych deformácií v smere osi x a y podmienených účinkami podzemnej vody resp. pórových tlakov a znížených mechanicko-deformačných vlastností modelovaných typov hornín sa pohybuje rádovo v centimetroch, hodnoty zvislých deformácií z dosahujú úrovne približne rádovo v desiatkach centimetrov (do cca 17 cm). Najväčšie deformácie sú dosiahnuté na povrchu terénu v okolí ohlbne jamy.

V nasledujúcej tab. 15 sú uvedené maximálne deformácie modelu jamy v smere osi z , x , y a maximálne hodnoty prírastkov šmykových pretvorení (shear strain increment) pri zatopení podzemia po úroveň VII. a V. horizontu.

Tab. 15: Deformácie modelu v smere x, y, z

Zatopenie	Z_{disp} (m)	X_{disp} (m)	Y_{disp} (m)	SSI (-)
po VII. obzor	$11,8e^{-1}$	$1e^{-2}$	$9e^{-3}$	$6,2e^{-3}$
po V. obzor	$17e^{-1}$	$2e^{-2}$	$2e^{-2}$	$1,1e^{-2}$

Pozn.: Z_{disp} – vertikálne deformácie, X_{disp}, Y_{disp} – horizontálne deformácie v smere osi x a y , SSI – Shear Strain Increment

Vplyvom zatopenia jamy č. 3 dochádza k najväčším deformáciám v zvislom smere. Hodnoty vertikálnych deformácií povrchu terénu v okolí jamy pri mokrej likvidácii podzemia po úroveň V. obzoru pohybujú v rozmedzí cca 10 – 17 cm. Horizontálne deformácie v tomto variante sa pohybujú v rozmedzí cca 1 – 2 cm.

Pri zatopení bane po úroveň VII. obzoru maximálne hodnoty zvislých deformácií dosahujú úrovne cca 12 cm, horizontálne deformácie dosahujú úrovne cca 1 cm.

Väčšie hodnoty šmykových pretvorení sa dosahujú pri zatopení podzemia po úroveň V. obzoru (tab. 15).

Podľa výpočtového modelu, pri vyššej úrovni hladiny zatopenia podzemia dochádza k väčším pretvoreniam povrchu terénu, naopak pri nižších úrovniach zatopenia podzemia dochádza k menším prejavom mokrej likvidácie na povrch terénu v okolí jamy.

Modely pri oboch variantoch mokrej likvidácie jamy č. 3 sú v stave parciálnej stability, priebehy nevybalansovaných síl konvergujú k nule, čo potvrdzuje aj stabilita horninového masívu vyhodnotená pomocou funkcie block state (obr. 118, 128).

Zmeny počtu zón s rôznymi intervalmi FoS pri dosiahnutí zatopenia podzemia po VII. a V. obzor pre výstuž sú uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 16.

Tab. 16 : Počet zón FoS

Zatopenie	Počet zón stupňov bezpečnosti FoS					
	<1-1,1>	<1,1-1,2>	<1,2-1,3>	<1,3-1,4>	<1,4-1,5>	<1,5-1,6>
po VII. obzor	220	237	263	216	194	111
po V. obzor	9	49	87	59	28	95

Z hľadiska počtu zón FoS v jednotlivých intervaloch je problematickejšim variantom zatopenie podzemnej prevádzky po úroveň VII. horizontu. V oblasti ohlbne jám je počet zón s najnižšími stupňami bezpečnosti veľmi nízky, pre obidve varianty je približne rovnaký.

Väčší počet zón FoS pre jednotlivé intervaly sa sústreďuje hlavne do oblasti nárazísk a dopravných chodieb. Pri zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru pôsobia menšie horizontálne tlaky podzemnej vody (menšia výška vodného stĺpca), pri zatopení bane až po úroveň V. obzoru pôsobia stabilizujúce bočné tlaky vody o väčších hodnotách (väčšia výška vodného stĺpca), čo sa prejavilo aj v počte zón FoS pre variant VII. a V. obzor (tab. 16).

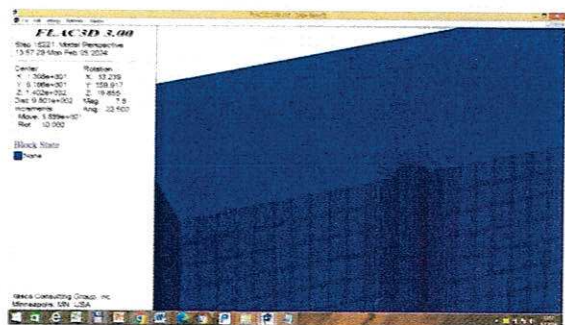
Pri obidvoch variantoch platí, že $FoS > 1$, modely sú v stabilnom stave, nedochádza k vzniku kritickej situácie z hľadiska straty stability.

V nasledujúcej tab. 17 je vygenerovaný počet zón s rôznymi spôsobmi porušenia pri aplikovaní funkcie block_state.

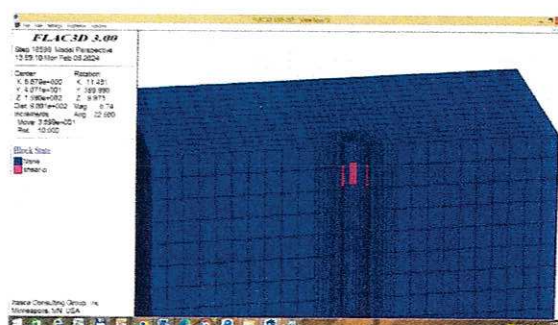
Tab. 17: Zóny s rôznymi spôsobmi porušenia

Zatopenie	Počet zón s rôznymi spôsobmi porušenia			
	tension_n	shear_n	tension_past	shear_past
po VII. obzor	0	2	0	425
po V. obzor	0	0	52	236

Podobný trend ako pri počte zón FoS je zachovaný aj pri počte zón s rôznymi spôsobmi porušenia. Väčší počet zón s rôznymi typmi porušenia sa sústreďuje hlavne do oblasti nárazísk a dopravných chodieb. Pri zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru pôsobia menšie horizontálne tlaky podzemnej vody (menšia výška vodného stĺpca), pri zatopení bane až po úroveň V. obzoru pôsobia stabilizujúce bočné tlaky vody o väčších hodnotách (väčšia výška vodného stĺpca), čo sa prejavilo aj v počte zón FoS pre variant VII. a V. obzor (tab. 17).



Obr. 168: Stav stability ohlbne jamy – V. obzor



Obr. 169: Stav stability ohlbne jamy – VII. obzor

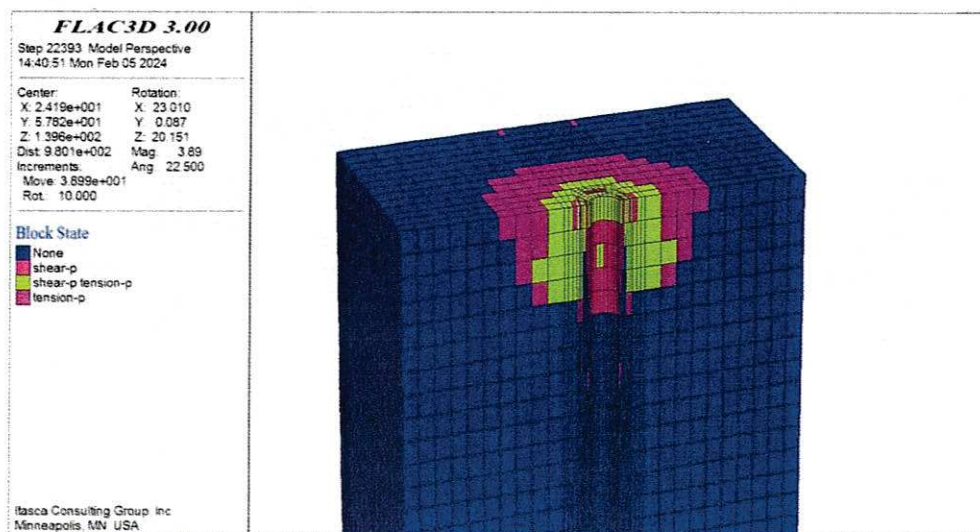
V oblasti ohlbne jamy č. 3, pri zatopení podzemia po úroveň V. obzoru nie sú evidované žiadne zóny s akýmkoľvek typmi porušenia (obr. 168).

V oblasti ohlbne jamy č. 3, pri zatopení podzemia po úroveň VII. obzoru je evidovaný malý počet zón s predispozíciou na šmykové porušenie (obr. 169).

Vyššie uvedené stavy stabilit (obr. 168,169) platia pre prípad obmedzeného pôsobenia pórových tlakov v oblasti samotnej jamy. Z deformačného hľadiska v oblasti ohlbne jamy je situácia náročnejšia (obr. 117,127). Vplyvom zatopenia podzemia sa dosahujú vertikálne deformácie o veľkosti cca 10 – 20 cm.

V prípade pôsobenia pórových tlakov na celom pôdoryse (plný pórový tlak) výpočtového modelu sa situácia z deformačného a stabilitného hľadiska zhoršuje. Pre ilustráciu je na nasledujúcom

obr. 170 uvedený stav stability modelu v oblasti prieniku jamy s povrchom terénu s tzv. plným pórovým tlakom.

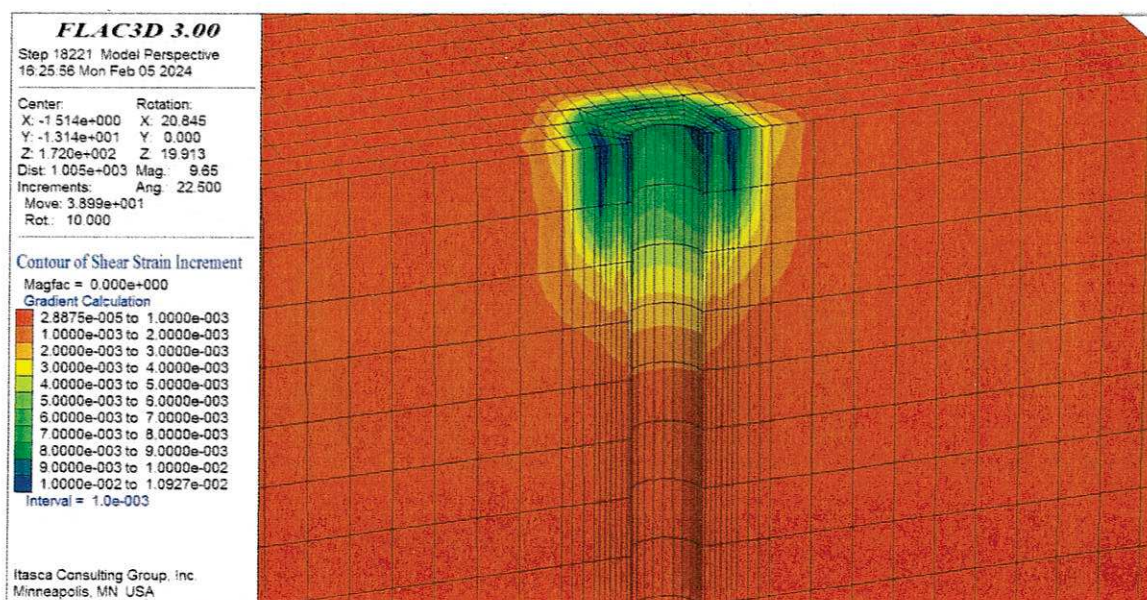


Obr. 170: Stav stability modelu –zatopenie po VII. obzor – plný pórový tlak

Pri zatopení po úroveň VII. horizontu sú max. deformácie v oblasti ohlbne jamy cca 25 cm, v oblasti prieniku jamy s terénom vzniká väčší počet zón hlavne s predispozíciami na šmykové a ťahové porušenie (obr. 170).

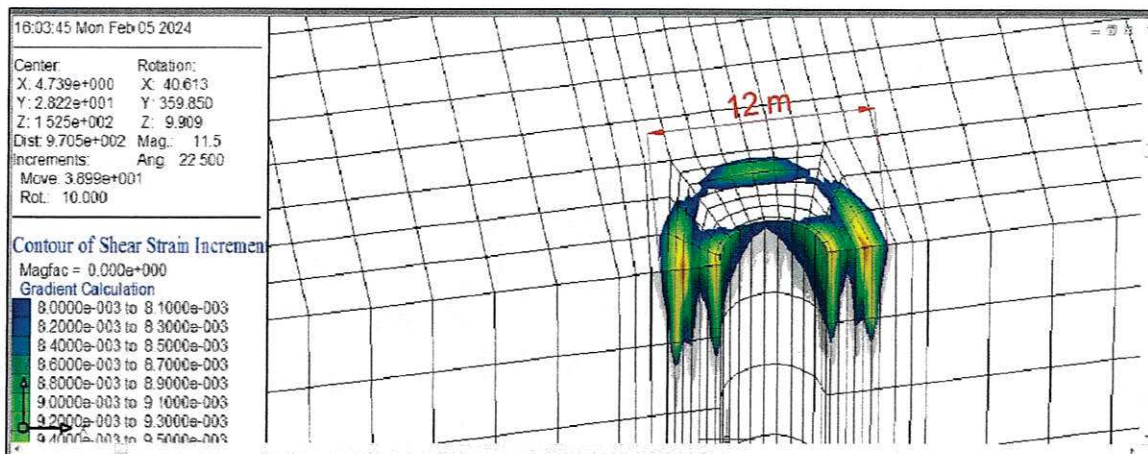
7.2.1 Bezpečnostné pásmo jamy č. 3

Bezpečnostné pásmo jamy č. 3 bolo stanovené na základe priebehu prírastkov šmykových pretvorení pre z hľadiska šmykových pretvorení najnepriaznivejší prípad, ktorý nastáva v prípade zatopenia jamy po úroveň V. horizontu (obr. 171).



Obr. 171: Prírastok šmykových pretvorení

Najväčšie prírastky šmykových pretvorení sa kumulujú v bezprostrednom okolí ohlbne jamy č. 3 s veľkosťami cca $1e^{-2} - 8e^{-3}$ (obr. 172). Je to oblasť, ktorá vymedzuje minimálne rozmery uzatváraciej povaly jamy č. 3 s odporúčaným priemerom $D = 12$ m (obr. 172).



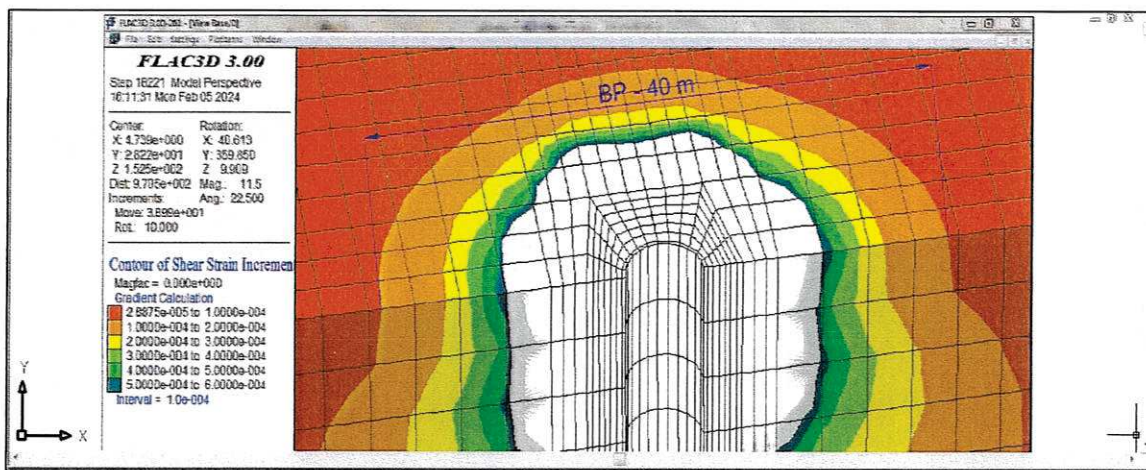
Obr. 172: Odporúčaný priemer D uzatváracej povaly jamy č. 3

Uzatváracie ohlbňové povaly sú bezpečnostným prvkom, ktorý významne zvyšuje bezpečnosť okolia ústia likvidovaného hlavného banského diela, pokiaľ by došlo k mimoriadnej udalosti sklúznutia sprievodných hornín a nespevneneho zasypaného hlavného banského diela, ktoré je spravidla doprevádzané vznikom povrchového krátera.

Dokumentujú to mnohé prípady havarovaných jám na územiach, ktoré boli v minulosti využívané na banskú činnosť. Existencia uzatváracích ohlbňových povál zabraňuje pádu ťažnej veže a ťahtovej budovy do jamy.

Okrem bezpečnostnej funkcie musia uzatváracie povaly umožňovať kontrolu stavu nespevnenej základky v jame, dosypávanie základky, odvádzanie škodlivých plynov a pod.

Najmenšie hodnoty prírastkov šmykových pretvorení v intervale cca $3e^{-5}$ až $1e^{-4}$ vymedzujú bezpečnostné pásmo likvidovanej ťažnej a ťažnej jamy č. 3 (obr. 173).



Obr. 173: Bezpečnostné pásmo jamy č. 3

Podľa vyššie uvedeného konštatovania je odporúčaný priemer bezpečnostného pásma jamy č. 3 $D_{BP} = 40$ m (obr. 173).

Takto vymedzené bezpečnostné pásmo dobre koreluje aj so stavom stability zón podľa funkcie block state (obr. 170).

7.3 Stabilita závalových pásiem

Posúdenie vplyvu zatopenia na stabilitu závalových pásiem bolo vykonané pomocou rezu 11-11' a modelu tzv. polzávalu. Vyhodnocovali sa horizontálne a vertikálne deformácie, prírastok šmykových pretvorení, stav stability modelov prostredníctvom implementovanej funkcie block_state, stupňov FoS a priebehu nevybalansovanej sily.

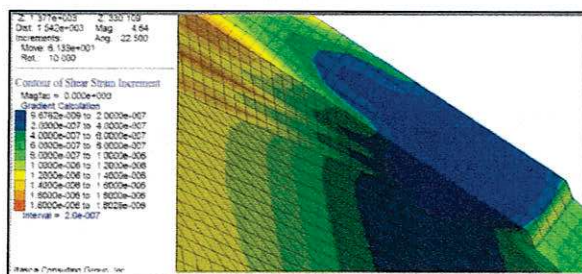
7.3.1 Stabilita rezu 11-11'

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené maximálne hodnoty bočných, zvislých deformácií a prírastok šmykového pretvorenia (Shear Strain Increment) pri zatopení VII. a V. obzoru.

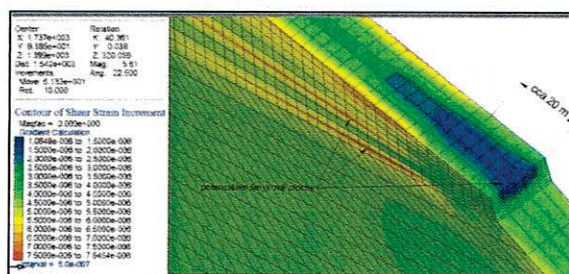
Tab. 18: Deformácie v reze 11-11'

Zatopenie	Z_{disp} (m)	X_{disp} (m)	Y_{disp} (m)	SSI (-)
po VII. obzor	$3e^{-4}$	$2e^{-5}$	$8e^{-7}$	$9,7e^{-9}$
po V. obzor	$4e^{-3}$	$6e^{-5}$	$7e^{-6}$	$7,5e^{-6}$

Pozn.: Z_{disp} – vertikálne deformácie, X_{disp}, Y_{disp} – horizontálne deformácie v smere osi x a y, SSI – ShearStrainIncrement



Obr. 174: Shear Strain Increment – VII. obzor



Obr. 175: Shear Strain Increment – V. obzor

Rozsah deformácií v reze 11-11' vplyvom zatápania sa pohybujú rádovo v desatinách milimetrov až v milimetroch. Najväčšie deformácie sú v zvislom smere, pri zatopení VII. obzoru sa maximá pohybujú na úrovni cca 0,3 mm, po zatopení V. obzoru tieto deformácie narastú na hodnoty cca 4 mm (tab. 18). Horizontálne deformácie sú radovo nižšie oproti vertikálnym deformáciám.

Podobne aj pri prírastkoch šmykového pretvorenia sú priaznivejšie hodnoty pri zatopení po úroveň VII. obzoru ako pri zatopení po úroveň V. obzoru (obr. 174-175).

Zmeny počtu zón s rôznymi intervalmi FoS pri dosiahnutí zatopenia podzemia po VII. a V. obzor sú uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 19.

Tab. 19: Počet zón FoS

Zatopenie	Počet zón stupňov bezpečnosti FoS					
	<1-1,1>	<1,1-1,2>	<1,2-1,3>	<1,3-1,4>	<1,4-1,5>	<1,5-1,6>
po VII. obzor	1817	239	204	180	151	90
po V. obzor	1771	284	219	173	142	92

Z hľadiska počtu zón FoS pre vrchnú časť modelu pri zatopení podzemia po VII. a V. obzor nedochádza k výraznej zmene počtu zón pri týchto variantoch. Množstvo zón so stupňami bezpečnosti s najnižšími hodnotami sú pre V. obzor sú o 46 zón nižšie ako pri zatopení VII. obzoru. Pri niektorých vyšších stupňoch bezpečnosti je tento pomer opačný (tab. 19).

Podobný trend je potvrdený aj pri stanovení počtu zón s rôznymi prípadmi porušenia pri aplikovaní funkcie block_state (tab. 20).

Tab. 20: Zóny s rôznymi typmi porušenia

Zatopenie	Počet zón s rôznymi spôsobmi porušenia			
	tension_n	shear_n	tension_past	shear_past
po VII. obzor	16	1361	28	1603
po V. obzor	1	0	17	1721

Zóny s predikciou na ťahové porušenie resp. porušovanie sa v modeli vyskytujú v oveľa menšej miere ako zóny na šmykové porušenie alebo možné porušovanie.

V niektorých prípadoch sa v modeli vyskytujú väčšie počty zón po zatopení po VII. obzor ako po zatopení V. obzoru, v niektorých prípadoch je to naopak, t.j. po zatopení V. obzoru je väčší výskyt zón s daným typom porušenia ako pri zatopení VII. obzoru (tab. 20). Pri zónach so šmykovým porušovaním je tento pomer veľmi výrazný v neprospech zatopenia podzemia po úroveň V. obzoru.

Z deformačného hľadiska dochádza vplyvom zatápania a postupného zvyšovania hladiny podzemnej vody až pod definitívnu výšku zatopenia k zhoršovaniu stavu. Deformácie však dosahujú len veľmi malé hodnoty, nemajú v princípe žiaden deštruktívny charakter.

Zo stabilitného hľadiska (block state, FoS) dochádza v niektorých prípadoch k zhoršeniu stavu a v niektorých prípadoch k opačnému javu pri zvýšení hladiny zatopenia podzemia zo VII. obzoru na V. obzor. Tento jav je možné pravdepodobne vysvetliť stabilizačným účinkom podzemnej vody v horizontálnom smere pri zvýšených úrovniach zatápania. V konečnom dôsledku rez 11-11' aj pri zatopení po úroveň VII. aj V. obzoru ostáva v stave parciálnej stability. Dôjde teda pri mokrej likvidácii k malému zhoršeniu stability závalového pásma v reze 11-11'.

7.3.2 Stabilita závalového pásma pri zatopení podzemia stanovená pomocou tzv. polzávalu

V nasledujúcej tabuľke sú uvedené maximálne hodnoty bočných, zvislých deformácií a prírastok šmykového pretvorenia (Shear Strain Increment) pri zatopení VII. a V. obzoru.

Tab. 21: Deformácie modelu polzávalu

Zatopenie	Z_{disp} (m)	X_{disp} (m)	Y_{disp} (m)	SSI (-)
po VII. obzor	$1,2e^{-3}$	$1,4e^{-4}$	$2,3e^{-4}$	$7,1e^{-6}$
po V. obzor	$9,5e^{-2}$	$1,8e^{-2}$	$1,6e^{-2}$	$1,1e^{-3}$

Pozn.: Z_{disp} – vertikálne deformácie, X_{disp} , Y_{disp} – horizontálne deformácie v smere osí x a y, SSI – Shear Strain Increment

Rozsah deformácií pri modeli polzávalu vplyvom zatápania sa pohybujú rádovo v milimetroch až v centimetroch. Najväčšie deformácie sú v zvislom smere, pri zatopení VII. obzoru sa maximálna pohybuje na úrovni cca 1,2 mm, po zatopení V. obzoru tieto deformácie narastú na hodnoty cca 9,5 cm (tab. 18). Hodnoty horizontálnych deformácií sú rádovo nižšie oproti vertikálnym deformáciám, v oboch smeroch sú približne rovnaké.

Podobne aj pri prírastkoch šmykového pretvorenia sú priaznivejšie hodnoty pri zatopení po úroveň VII. obzoru ako pri zatopení po úroveň V. obzoru (obr. 21).

Zmeny počtu zón s rôznymi intervalmi FoS pri dosiahnutí zatopenia podzemia po VII. a V. obzor sú uvedené v nasledujúcej tabuľke č. 22.

Tab. 22: Počet zón FoS

Zatopenie	Počet zón stupňov bezpečnosti FoS					
	<1-1,1>	<1,1-1,2>	<1,2-1,3>	<1,3-1,4>	<1,4-1,5>	<1,5-1,6>
po VII. obzor	14	22	32	36	54	116
po V. obzor	90	61	97	133	185	236

Z hľadiska počtu zón FoS pre vrchnú časť modelu pri zatopení podzemia po VII. a V. obzor dochádza k výraznejšej zmene počtu zón pri týchto variantoch. Množstvo zón so stupňami bezpečnosti s najnižšími hodnotami sú pre V. obzor sú o 76 zón vyššie ako pri zatopení VII. obzoru. Aj pri ostatných vyšších stupňoch bezpečnosti je tento pomer rovnaký (tab. 22). Nevýhodnejší z hľadiska počtu zón pre rôzne intervaly FoS je variant so zatopením po V. obzor ako pri zatopení po úroveň VII. obzoru.

Podobný trend je potvrdený aj pri stanovení počtu zón s rôznymi prípadmi porušenia pri aplikovaní funkcie block_state (tab. 23).

Tab. 23: Zóny s rôznymi typmi porušenia

Zatopenie	Počet zón s rôznymi spôsobmi porušenia			
	tension n	shear n	tension past	shear past
po VII. obzor	77	0	1909	56
po V. obzor	909	83	2066	99

Zóny s predikciou na ťahové porušenie resp. porušovanie sa v modeli vyskytujú vo väčšej miere ako zóny na šmykové porušenie alebo možné porušovanie. Výhodnejší z hľadiska stability je variant zatopenia po VII. obzor.

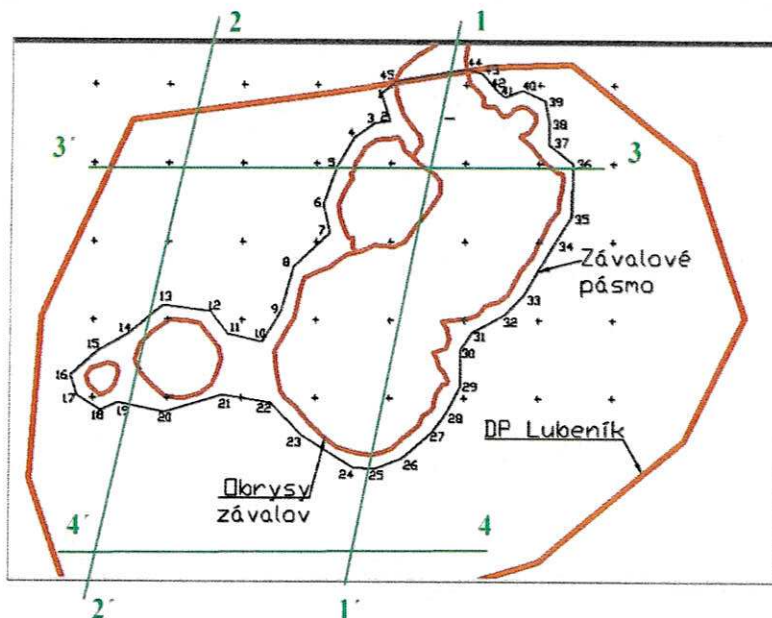
Pri všetkých posudzovaných typoch porušenia je variant zatopenia po VII. horizont výhodnejší ako zatopenie po V. horizont (obr. 174).

Z deformačného hľadiska dochádza vplyvom zatápania a postupného zvyšovania hladiny podzemnej vody až pod definitívnu výšku zatopenia k zhoršovaniu stavu. Deformácie však z hľadiska veľkosti dosahujú len veľmi malé hodnoty, ich vplyv na nestabilitu závalových pásiem je málo podstatný, nemajú v princípe žiaden deštruktívny charakter.

Ten istý trend pri modeli polzávalu je zachovaný aj pri vyhodnocovaní stability závalového pásma pomocou funkcií block state a Fish funkcie FoS.

V konečnom dôsledku aj pri modeli polzávalu pri zatopení po úroveň VII. aj V. obzoru ostáva numerický geotechnický model v stave parciálnej stability. Pri mokrej likvidácii dôjde k malému zhoršeniu stability závalového pásma tzv. polzávalu v porovnaní s výpočtom suchého variantu.

Z výsledkov modelovania mokrej likvidácie banského podzemia na stabilitu a deformačné prejavy tzv. celého modelu a závalových pásiem je zrejmé, že zatopenie podzemia nebude mať pravdepodobne výrazný deštruktívny charakter, preto nie je potrebné pristúpiť k novému vymedzeniu závalového resp. ochranného pásma.



Obr. 176: Závalové pásmo – rovnaké pre suchý aj tzv. mokrý model

Závalové pásmo zo suchého modelu vyhovuje aj pre podmienky mokrej likvidácie podzemnej banskej prevádzky (obr. 176).

Územie dotknuté banskou činnosťou v súčasnej dobe (tzv. suchý stav) a aj v rámci mokrej likvidácie (budúci stav) je potrebné sledovať a vyhodnocovať periodicky a permanentne formou merania deformácií povrchu terénu v navrhnutých meracích geodetických profiloch zhotoviteľom 1-1' až 4-4' (obr. 176) a aj v oblasti Štyroch chotárov odborne spôsobilou osobou resp. organizáciou.

Na základe nameraných a vyhodnotených deformácií povrchu terénu je geotechnická autorita oprávnená vydať následne stanovisko k realizácii lesníckej alebo inej činnosti v rámci DP Lubeník počas mokrej likvidácie.

Navrhnuté meračské profily boli konzultované s vedením bane Lubeník (tel. hovor s Ing. L. Gallom – 20.2.2024) aj v súvislosti s doteraz realizovanými geodetickými meraniami v predmetnej oblasti.

Spôsob a četnosť merania, počet meracích bodov na geodetických profiloch, nastavenie medzných stavov stability povrchu dotknutého územia musí byť riešené v rámci projektu geotechnického monitoringu.

8. Záver

Predložená výskumná správa resp. odborný posudok sa zaoberá problematikou vplyvu zatopenia podzemia v DP Lubeník na stabilitu dotknutej časti horského masívu. Posudok je zameraný hlavne na tieto oblasti:

- zmena fyzikálno-mechanických a deformačných parametrov hornín a horninového masívu pri dlhodobom styku s banskou vodou,
- verifikácia numerického výpočtového modelu pomocou analytického výpočtu,
- posúdenie stability horninového masívu pri zatopení podzemia,
- posúdenie stability ťažnej jamy č. 3 pri jej zatopení,
- dopad mokrej likvidácie podzemia na stabilitu závalových pásiem,
- zhodnotenie výsledkov numerického modelovania.

Vplyv zatopenia podzemia na povrch v DP Lubeník bol riešený variantne:

- zatopenie podzemia po úroveň VII. horizontu,
- zatopenie podzemia po úroveň V. obzoru.

Pri všetkých 3 typoch výpočtových modelov (celý model, jama, závalové pásma) boli použité tieto postupy:

- výpočet v podmienkach suchého stavu,
- znulovanie deformácií, rýchlosti a stavu stability tzv. suchých výpočtových modelov,
- inicializácia účinkov pórových tlakov a zodpovedajúcich horizontálnych zaťažení od vody a zásypu (pri jame) na požadovanej výške resp. hĺbke a ich výpočet,
- zníženie parametrov modelovaných entít (horniny a betón) vplyvom dlhodobého účinku podzemnej vody a výpočet,
- posúdenie dopadov tohto algoritmu na stabilitu riešenej dielčej úlohy.

V prípade posúdenia stability horninového masívu ako celku pri zatopení podzemia bol modelovaný aj zdvih (uplift) dotknutého územia. Vzhľadom k tomu, že tento fenomén je pozorovaný na čiernouhoľných ložiskách, kde sa dobývalo plne mechanizovanými stenami na zával, v prípade posúdenia jamy a závalových pásiem, tento dielčí výpočet nebol použitý, lebo je malý predpoklad vzniku tohto účinku podzemnej vody na povrch terénu.

Vo všeobecnosti je možné konštatovať, že vplyvom mokrej likvidácie dôjde k zhoršeniu hlavne deformačného, menej napätového resp. stabilitného stavu oproti suchému modelu. Je potrebné si uvedomiť, že po výpočte suchého stavu dochádza k znulovaniu stavu stability numerického modelu, čiže všetky entity nestability vypočítané v nasledujúcich krokoch sú podmienené výlučne mokrým spôsobom likvidácie.

Výpočtové modely (celý model, jama, závalové oblasti) sú pri použití postupov simulácie zatápania banského podzemia v stave tzv. parciálnej stability, nič nenasvedčuje tomu, žeby malo dôjsť k náhlej deštrukcii, resp. kolapsu likvidovaného podzemia mokrou cestou.

Stav parciálnej stability je charakteristický výskytom zón s rôznym stupňom resp. typom porušenia (shear, tension a ich kombinácie), na rozdiel od stavu totálnej stability, kde všetky zóny, z ktorých pozostávajú výpočtové modely sú v stabilnom stave.

Priebehy nevybalansovaných síl, stavu stabilit výpočtových zón ako aj stupne bezpečnosti jednotlivých zón FoS nesignalizujú žiaden kritický stav z pohľadu stability výpočtových modelov.

Zatopením banského podzemia dochádza k vertikálnym deformáciám povrchu terénu ale aj dobývok rádo vo desiatkach centimetrov (do cca 35 cm). Horizontálne deformácie dosahujú vplyvom mokrej likvidácie hodnoty rádo vo mili až centimetroch. Vo všeobecnosti platí, že pri zatopení vyššieho horizontu (V. obzor) dochádza aj k výraznejším deformačným prejavom oproti zatopeniu podzemia po úroveň nižšieho, t.j. VII. obzoru.

Zo stabilitného hľadiska je skôr pozorovaný opačný efekt. Vyššia úroveň zatopenia – lepšia stabilita, nižšia úroveň zatopenia – horšia stabilita. Tento efekt je pravdepodobne spätý so stabilizujúcimi účinkami horizontálnych zaťažení od účinkov pôsobiacej podzemnej vody. Pri

dosiahnutí vyššej úrovne zatopenia pôsobia vyššie hodnoty bočných tlakov vody na väčšej hĺbke zatopenia.

Vplyvom zatopenia podzemia nedochádza ku kritickému zhoršeniu stability závalových pásiem. Preto je možné aj pre podmienky mokrej likvidácie použiť to isté závalové resp. ochranné pásmo ako v suchom modeli (Vavrek, P., Vavreková, I., jún 2023).

Zatopením jamy č. 3 nedochádza k výrazným zmenám napäťovo-deformačného a stabilitného stavu oproti suchému variantu. Voda má výrazný stabilizačný účinok oproti nespevnenému zásypu (Pirapakaran, K., 2008). Pomocou prírastkov šmykových pretvorení bolo vymedzené bezpečnostné pásmo jamy č. 3 s priemerom $D_{BP} = 40$ m od stredu jamy a s priemerom ochrannej ohľbňovej povaly $D = 12$ m.

Vyššie uvedené konštatovania (stabilita ohlbne jamy, veľkosť DBP a D) platia vtedy, ak prienik odvodňovacej štôlne s telesom jamy bude technicky riešený tak, že nedôjde k porušeniu celistvosti a statickej funkčnosti vencov výstuže jamy nad prienikom jama č. 3 – odvodňovacia štôlna.

Vypočítané deformácie a stav stability výpočtových modelov platia pre tzv. konečný stav z pohľadu dosiahnutia posudzovaných úrovní zatápania, čo bude z časového hľadiska predstavovať niekoľko desaťročí.

Na základe hlavne zahraničných skúseností sa dá predpokladať, že na začiatku zatápania dôjde k zhoršeniu stabilitného stavu (rekonsolidácia závalových oblastí, zníženie šmykových pevností v oblasti tektonických zón) s následnou konsolidáciou stabilitno-deformačných prejavov. Pri dosahovaní konečných úrovní zatápania podzemia možno očakávať aktivizáciu deformačných prejavov povrchu terénu.

Výkon vlastníckych práv na lesných pozemkoch v DP Lubeník mimo závalového pásma je aj pri mokrej likvidácii možný za týchto podmienok:

- zákaz vstupu do závalového resp. ochranného pásma,
- vytýčenie a označenie závalového pásma,
- rozdelenie DP Lubeník na 3 rovnaké časti v severo-južnom smere (I., II., III. oblasť) z hľadiska uľahčenia kontroly a monitorovania stavu povrchu terénu,
- pred samotným započatím lesníckych prác v danej oblasti (I. alebo II. alebo III. oblasť) je povinné zhodnotiť stav povrchu terénu zodpovedným pracovníkom. Až po jeho kladnom stanovisku je možné začať hospodársku činnosť,
- vybudovanie meracích profilov na kontrolu pretvorení povrchu terénu v DP Lubeník,
- odporúčaná kampaňovitosť.

Záver tejto výskumnej správy platia aj pre budúci, tzv. „mokrý stav“ na ložisku, t.j. dochádza k jeho likvidácii mokrou cestou.

Ďalšie nakladanie s týmto vypracovaným materiálom sa riadi zákonom č. 185/2015 Z.z. SR.

Správa bola vyhotovená v 3 exemplároch.

V Košiciach, 22.2.2024

Ing. Pavol V
Ing. Ivana V
Geova, s.r.o

9. Literatúra

- Aubertin, M. a kol.: Interaction between Backfill and Rock mass in narrow stopes. Soil and Rock mechanics America, 2003.
- Barton, N.: Quantitative description of rock masses for the design of NMT reinforcement (Special Lecture 1). Int. Conf. on Hydro Power Development In Himalayas. Shimla, India, 1998.
- Bauer, A., Calder, P.N.: Open pit and blasting seminar. Course No. 63321. Kinston, Ontario, Canada: Queens University, Mining Engineering Dept., 1978.
- Calvetti, F., DiPrisco, C., and Vecchiotti, M.: Experimental and numerical study of rock-fall impacts on granular soils, Rivista Italiana di Geotecnica, 4, 95–109, 2005.
- Chai, S.: Analytical and Numerical Studies on the Stresses in Backfilled Stopes and the Stability of Side-Exposed Backfill in Inclined Stopes. Dissertation of Thesis, 2020.
- Didier, Ch. a kol.: Mine Closure and Post Mining Management International State of the Art. 2008.
- Dudek, M. a kol.: Predicting of land surface uplift caused by the flooding of underground coal mines – a case study. Elsevier, 2020.
- Felsmechanik und Tunnelbau. TU Graz, 2007.
- Galvin, J., M.: Pillar System Stability Considerations, 2008.
- Google Earth, 2014.
- Grecula, P. a kol.: Ložiská Spišsko-gemerského rudohoria. 1995.
- Grenda, O. a kol.: Zhodnotenie skutkového stavu likvidácie pilierov v ložisku Lubeník. OBV VÚ SMZ-Lubeník, október 1991.
- Guang, D. a kol.: Three-dimensional numerical calculation analysis of stress induced by pore pressure variation. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 2012.
- Hamrol, A.: A quantitative classification of the weathering and weather ability of rocks. Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., 1961.
- Hatala, J. a kol.: Mechanika hornín a masívu. VŠT Košice, 1988.
- Hatala, J. a kol.: Štúdiá dobývania Striebornej žily na ložisku Mária baňa závodu Rožňava pre obdobie rokov 1996 – 1999. Košice, apríl 1996.
- Hawkins, A.B.: Sensitivity of sandstone strength and deformability changes in moisture content. Journal of Engineering Geology, 1992.
- Helm, P., R. a kol.: Numerical modeling of shallow abandoned mine working subsidence affecting transport infrastructure. Engineering Geology, 2013.
- Herel a kol.: Stanovení fyzikálne – mechanických vlastností ložiskové výplne a pruvodných hornín magnezitových ložisek a určení základných technologických parametrů. ÚVR, Praha, 1966.
- Hoek, E.: Practical Rock Engineering. 2000.
- Hoek, E.: A brief history of the Hoek – Brown criterion. Program: „RocLab“, 2002.
- Horák, V. a kol.: Polní zkoušky a měření mechaniky hornín. FAST VUT Brno, 2005.
- Jun, L. a kol.: Theoretical and Numerical Study of Shear Strength of Concrete Material. Journal of Engineering Science and Technology Review, 2020.
- Kandiah, P.: Load-deformation characteristics of minefills with particular reference to arching and stress developments. PhD Thesis, James Cook University, 2008.
- Kasim, M. a kol.: An investigation of the relationship between uniaxial compressive strength and degradation for selected rock types. Elsevier, Engineering Geology 44, 1996.
- Konior, J.: Development of load exerted on the lining of the shaft after its liquidation. Arch. Min. Sci., Vol. 60, 2015.
- Kunák, L. a kol.: Vplyv dobývania na deformácie v okolí banských diel. Záverečná správa, KMaG, SF VŠT Košice, 1985.
- Li, L.: An improved analytical solution to estimate the stress state in subvertical backfilled stopes. Canadian Geotechnical Journal, 2008.
- Li Z. a kol.: Multiscale Laboratory Study and Numerical Analysis of Water-Weakening Effect on Shale. Hindawi, Advances in Materials Science and Engineering, 2020.
- Luo, Y.: Effects of Water in Inactive Room and Pillar Coal Mines on Causing and Preventing Surface Subsidence. Crimson Publisher, 2021.
- Malgot, J. a kol.: Mechanika hornín a inžinierska geológia. Alfa Bratislava. 1992.

- Maras, M., Vavrek, P.: Modelovanie stability Striebornej žilu na ložisku Mária baňa v Rožňave. Geotechnika, Podbanské, 1997.
- Marston, A., 1930: The theory of external loads on closed conduits in the light of latest experiments. Bulletin No. 96, Iowa Engineering Experiment Station.
- Mužik, L. a kol.: Určenie napätovo-deformačného stavu na magnezitovom ložisku Miková. Záverečná správa, Ústav geologie a geotechniky ČSAV Praha, 1979.
- Neset, K. a kol.: Hornická príručka II. Vydavateľstvo Alfa, 1973.
- Neset, K. a kol.: Vlivy poddolování. Vydavatelství SNTL, Praha, 1984.
- OBÚ Spišská Nová Ves: Dobývacie metódy pri hlbinnom dobývaní ložísk, nerastov v oblasti Spišskogemerského rudohoria a Východoslovenského kraja. Prešov, 1989.
- Özbek, A. a kol.: Anisotropy effect on strengths of metamorphic rocks. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2018.
- Pakinger, M.: Zobrazenie výskopisu. DP Lubeník.LLS. ÚGKK SR 2023.
- Piovarčiová, V. a kol.: Expertíza vplyvu dobývania na povrch s prechodom na nižšie horizonty v závode Lubeník. ÚVR, Košice, október 1989.
- Pirapakaran, K., 2008: Load – deformation characteristics on minefiles with particular reference to arching and stress developments. PhD Thesis, James Cook University.
- Rajabzadeh, M.A. a kol.: Effects of Rock Classes and Porosity on the Relation between Uniaxial Compressive Strength and Some Rock Properties for Carbonate Rocks. Rock Mech Rock Eng. 45, 2012.
- Salmon, R. a kol.: Case Studies and analysis of mine shafts incidents in Europe. Conference Paper, 2012.
- Sakhno, I. a kol.: Numerical simulation of the surface subsidence evolution caused by the flooding of the longwall goaf during excavation of thin coal seams. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, 2023.
- Sinha, R.S. : Underground Structures Design and Instrumentation. Denver, 1998.
- Singh, S.P., Narendrula, R.: Assessment and prediction of rock mass damage by blast vibrations. Conference Paper, 2004.
- Singht, M.: Mining Subsidence, 1992.
- Terzaghi, K.: Theoretical soil mechanics. New York, 1943.
- Todd, F. a kol.: Coupled hydraulic and mechanical model of surface uplift due to mine water rebound: implications for mine water heating and cooling schemes. Scottish Journal of Geology, 2019.
- Zahoranský, G. a kol.: Prehodnotenie postupu likvidácie na obzore 450 - 400 m n.m. na závode Jelšava. Záverečná správa, ÚVR, Košice, jún 1983.
- Záhoranský, G. a kol.: Prehodnotenie ďalšieho postupu dobývania a likvidácie na závode SMZ Lubeník. Záverečná správa, ÚVR, Košice, december 1984.
- Zhao, J. a kol.: Numerical simulation of flooding induced uplift for abandoned coal mines: simulation schemes and parameter sensitivity. International Journal Coal Sciences Technology, 2021.
- Vásárhelyi, B., Davarpanah, M.: Influence of Water Content on the Mechanical Parameters of the Intact Rock and Rock Mass. Periodica Polytechnica, Civil Engineering, 2018.
- Vavrek, P.: Prehodnotenie napätovo-deformačného stavu v okolí bariérneho piliera z hľadiska ďalšieho postupu dobývania. Výskumná správa, časť matematické modelovanie, Košice, máj 2002.
- Vavrek, P.: Napätovo-deformačný stav pre oblasť Mikovského klobúka pri zoslabení bariérneho piliera a vyhodnotenie napätosti vo VBP č. 28 na hor. 220 m n. m. Odborný posudok, Košice, jún 2018.
- Vavrek, P.: Napätovo-deformačný stav pre oblasť Mikovského klobúka pri zoslabení bariérneho piliera a vyhodnotenie napätosti vo VBP č. 28 na hor. 220 m n. m. Odborný posudok, Košice, jún 2018.
- Vavrek, P.: Prepočet stability Mikovského klobúka pri zmenených vlastnostiach fylitov a vyhodnotenie napätosti vo VBP č. 28 na hor. 220 m n. m. a vo vrte JV-5 na hor. 482 m n. m. Odborný posudok, Košice, október 2019.
- Vavrek, P., Vavreková I.: Prehodnotenie vplyvov dobývania magnezitovej suroviny v dobývacom priestore Lubeník na povrch numerickým modelovaním. Geova, s.r.o., Košice, jún 2023.
- Vavro, M. a kol.: Metody propočtu horninových pilířů a stability nadloží porubních prostorů. Praha, 1975.

Velázquez-Cruz, D. a kol.: Determination of PorePressure Using Divergences. International Journal of Petroleum Science and Technology, 2017.

Vervoort, A.: Surface movement above an underground coal longwall mine after closure. Nat. Hazards Earth Syst. Sci, 16, 2107.

Wesołowski, M. a kol.: Influence Analysis of Mine Flooding from the Environmental Standpoint: Surface Protection. Polish Journal of Environmental Studies, 2018.

ŠGÚDŠ: Geologická mapa SR, M1:10000. apl.geology.sk, 2017.

Užívateľský manuál k programu Flac3D od firmy Itasca, 1997.