

АНАЛИЗА СТАБИЛНОСТИ ДИВЕРЗИОНЕ КОМБИНОВАНЕ БРАНЕ - КАМЕНО ЗЕМЉАНЕ БРАНЕ НАДВИШЕНЕ ЈАЛОВИШНОМ БРАНОМ

Проф. др Љупчо ПЕТКОВСКИ
Грађевински факултет у Скопју,
Универзитет Св. Кирил и Методиј, РС Македонија

РЕЗИМЕ

Потреба за обезбеђивањем додатног обима за депоновање јаловинског материјала, неопходног за редован рад рудника у условима просторне ограничености, актуелизује доградњу постојећа хидројаловишта. Надвишење постојећих јаловишта, са изградњом нове јаловинске пешчане бране изнад постојећег седиментног језера (метод сличан узводном напредовању јаловишних брана), представља хетерогену геосредину која је подложна ликвидацији под статичким и динамичким (цикличним) оптерећењем и стога су хидротехничке конструкције са највећим ризиком по стабилност.

Такву надоргадњу карактеришу детаљна геотехничка истраживања терена и софистициране структурне анализе. Они су у овом чланку илустровани резултатима истраживања стабилности (у статичким и динамичким условима) надвишења постојеће ретензионе камено-земљане бране са глиеним језгром, са јаловинском пешчаном браном изнад седиментног језера хидројаловишта Торанице 1, Крива Паланка, Република Северна Македонија..

Кључне речи: јаловишне бране, таложна језера, суво одлагање, надоградња, ликвидација

1. КРИТИЧНО СТАЊЕ ОПТЕРЕЋЕЊА НАДВИШЕЊА ПОСТОЈЕЋИХ ХИДРОЈАЛОВИШТА СА ЈАЛОВИНСКИМ ПЕСКОМ ИЗНАД ПОСТОЈЕЋИХ ТАЛОЖНИХ ЈЕЗЕРА

Досадашња пракса је потврдила да се највећа стабилност јаловинске бране постиже низводним начином напредовања. У том случају се круна бране помера низводно и циклонирани песак се наноси у нагнутим слојевима дуж низводне падине преко насипа јаловине. Најнижа стабилност хетерогеног геоокружења се добија узводним методом фазног напредовања. Тада, у свакој следећој фази, круна пешчане бране се помера узводно, односно пешчане бране се темеље на таложеном јаловинском муљу. Хетерогено геоокружење - јаловиште изнад седиментног језера или јаловиште са узводним начином изградње подложно је ликвидацији под статичким и динамичким (цикличним) оптерећењем. Због тога се јаловишне бране са узводним начином изградње третирају као хидрограђевински објекти највећег ризика и не препоручују се у сеизмички активним регионима.

Надвишење постојећих јаловишних брана, са изградњом нове јаловинске пешчане бране изнад постојећег таложног језера (метод сличан узводном напредовању хидројаловишта), представља хетерогену геосредину која је подложна ликвидацији под статичким и динамичким (цикличним) оптерећењем и стога су хидротехничке конструкције са највећим ризиком по стабилност. Анализа стабилности ових хетерогених геоокружења је потврдила да се критични услов оптерећења добија поређењем: (а) дуготрајног статичког оптерећења (са највећим потребним коефицијентом сигурности 1,5), (б) краткорочног статичког оптерећења (са нижим потребним

Podaci o prihvatanju članka

Primljen: 19.3.2023.

Ispravljen: -

Prihvaćen: 28.4.2023.

Kontakt: petkovski@gf.ukim.edu.mk

коэффициентом сигурности 1,3), (в) сеизмичка отпорност током дејства земљотреса (где се толеришу кратки излети са фактором сигурности мањим од 1,0), и (г) инцидентна оптерећења током појаве ликвидације (са потребним фактором сигурности од 1,1) је управо појава ликвидације. Због тога ценимо да појава ликвидације (статичке и динамичке) мора постати обавезно стање оптерећења јаловишних брана, јер најчешће усвојени параметри (геометрија и композиција попречног пресека - распоред локалних материјала) који гарантује неопходну стабилност зависе од овог стања оптерећења.

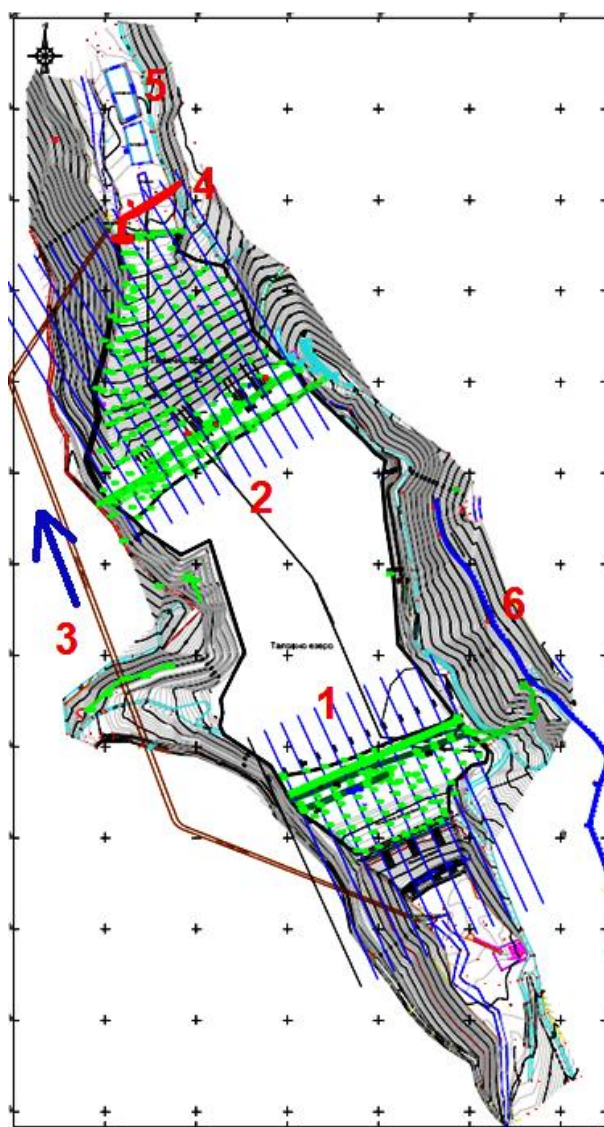
2. НАДОГРАДЊАЊА ХИДРОЈАЛОВИШТА ТОРАНИЦА 1 У СЕВЕРНОЈ МАКЕДОНИЈИ

Рудник „Тораница“, К. Паланка (Булмак) тренутно послује са производњом руде од око 320.000 t/год, а за потребе те производње у функцији је постојеће јаловиште Тораница 1. Седиментно језеро хидројаловишта је формирано узводном и низводном браном, слика 1. Узводна (диверзиона или ретенциона) брана је конвенционална брана (камено земљана са глиеним екраном) са круном на 977,5 мнм. Низводна брана је јаловишна брана са низводном конструкцијом од циклонираним јаловинског песка.

Постојеће јаловиште Тораница 1 је до сада два пута надвишено преко 977,5 мн.м. Прво надвишење је било до висине круне 990,0 мнм. Ретенциона брана је надвишена јаловином са централним начином изградње, али са круном помереном са конвенционалне бране, односно темељене на седиментном језеру, на позицији „А“ (слика 2). Друго надвишење, које је у фази изградње, пројектовано је до коте 1.000 мнм, у складу са техничком документацијом за јаловиште рудника „Тораница“ (Геинг – Скопје, 2018.09.12). Овим пројектом је било предвиђено да се ретенциона брана надвиши јаловином браном са круном на 1.000 мнм од циклоналног песка са централним начином градње, темељен на седиментном језеру, на позицији "Б".

Алтернативно решење за надвишење узводне бране до коте од 1.000 мнм анализирано у Анексу 1 (ДИПКО – Скопје, 2022.08.30), слика 3, са локацијом циклонирања у близини „А“, односно померено узводно за 47,25 m у односу на „Б“.

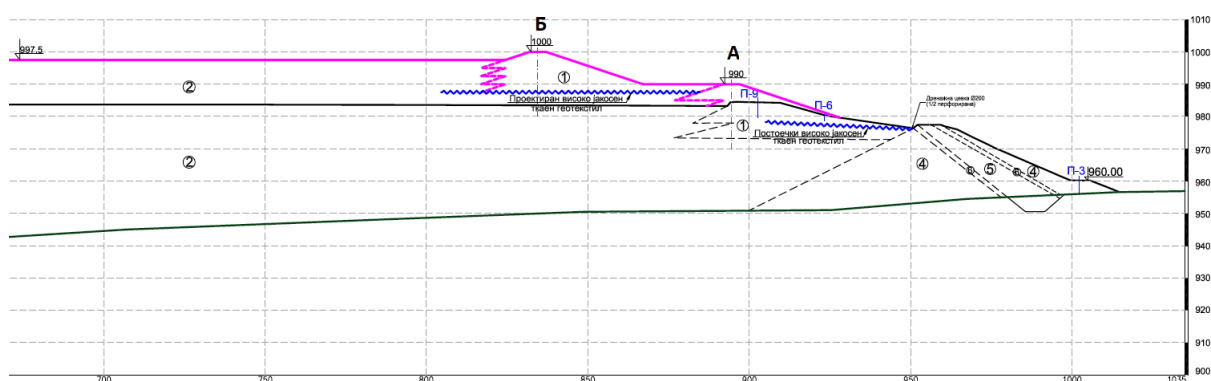
Поређењем варијанти „Б“ (2018) и „А“ (2022), на истом нивоу техничких истраживања стабилности, са методом граничне равнотеже и са чврстоћом на смицање у недренираним условима у постојећем седиментном језеру, потврђено је да је варијанта "А" има већу стабилност.



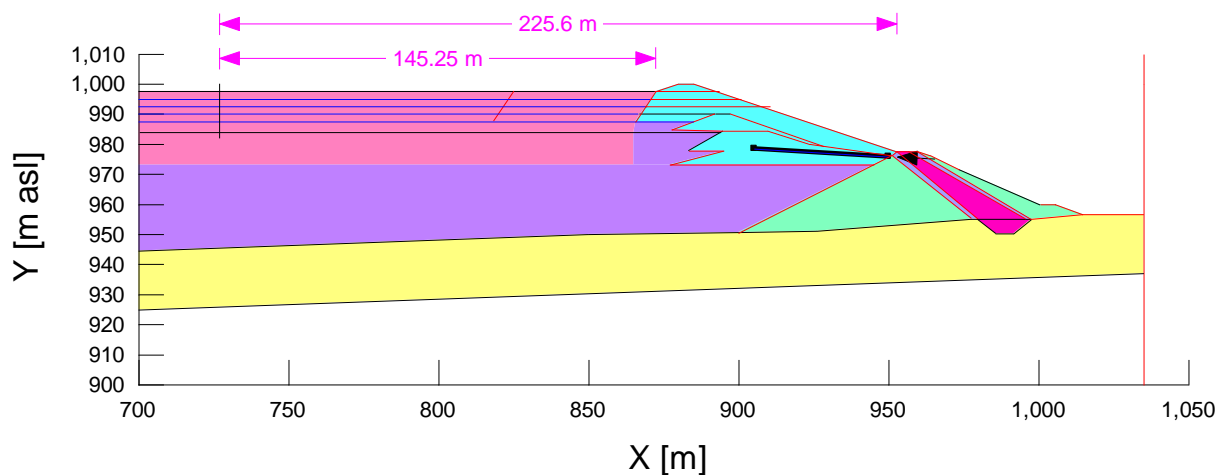
Слика 1. Ситуационо решење хидро јаловишта Тораница 1, према геодетској подлози из септембра 2023. године. (1) узводна или ретенциона или диверзиона брана, (2) низводна или јаловишна брана, (3) обилазни тунел, (4) габионски зид за заштиту излазне конструкције тунела, (5) таложнице за дренирану и избистрену воду, (6) пулповод

Тренутно, октобра 2023. године, врши се надвишење узводне (ретенционе) бране (слика 4) на коту од 1.000,0 мнм према Анексу 2 (ДИПКО – Скопје, 2023.07.03.), урађеном према подацима из SPT и СРТ - теренска геотехничка истраживања (ДИПКО – Скопје, 2023.03.16). Динамичком анализом у Анексу 2 за решење попречног пресека према Анексу 1, добијен је фактор стабилности мањи од 1,0 за стање после земљотреса са појавом ликвидације у седиментном језеру. Усвојена је варијанта са

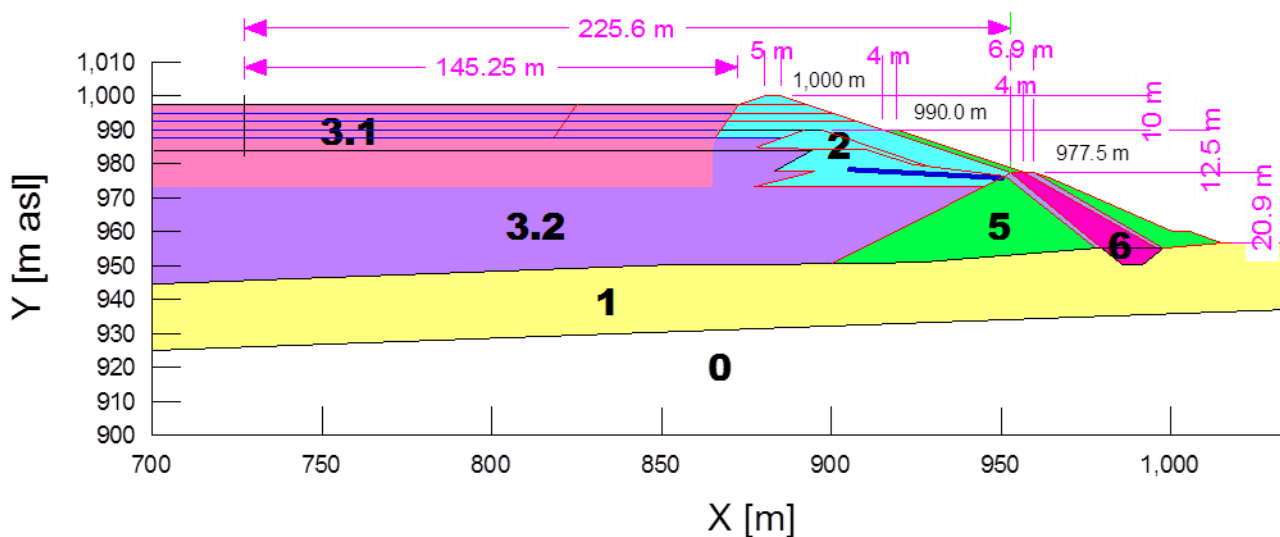
минималном количином уграђеног рудничког камена и која обезбеђује фактор стабилности (Φ) најмање онолико колико је дозвољено за стање после земљотреса у случају ликвидације ($\Phi_{\text{доз}}$), односно са вредношћу од $\Phi = 1,152 > \Phi_{\text{доз}} = 1,1$. Тај облик „подупрене дренаже“ има следеће димензије: ширина берме 4,0 м и висина 12 м, односно од коте круне првобитне диверзионе бране на 977,5 мнм (са ширином круне 6,9 м) до коте 990 мнм.



Слика 2. Скица надвишења узводне (ретенционе) бране хидројаловишта Тораница, према прилогу 3 Основног пројекта од 12.09.2018.



Слика 3. Скица надвишења узводне (ретенционе) бране хидројаловишта Тораница, према Анексу 1 Основног пројекта од 30.08.2022.



Слика 4. Модел надвишења узводне бране до 1.000 мнм, према Анексу 2, 2023.07.03.

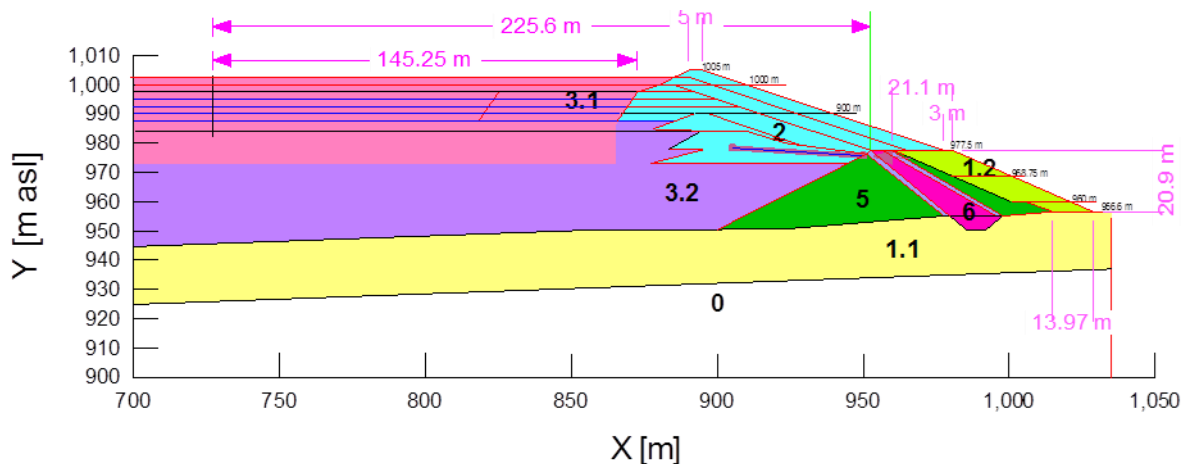
0 – темељна стена, гранични филтрациони и деформабилни услов, 1 – шљунковита мешавина, алувијум у подножју испод бране, 2 – циклонски јаловински песак, брана, 3 - јаловински муљ, седиментно језеро (3,1 плитка зона и 3,2 дубока зона), 5 - камен, потпорно тело ретенционе бране, 6 - глина, косо језгро ретенционе бране, 7 - песак, филтер прелазне зоне ретенционе бране

Имајући у виду дуг период за добијање Одобрења за изградњу новог јаловишта Тораница 2 (низводно од Торанице 1, за коју су урађена геотехничка истраживања и ревидирани Основни пројекат), која се због бројних административно бирократских потешкоћа може продужити до 4-5 година, инвеститор Булмак, Пробиштип је одобрио наставак експлоатације постојеће Торанице 1, са новом котом од 1.005 мнм.

Надоградњом до 1.000 m н.м. централном методом у позицији „А“ исцрпило је стабилност ретенционе бране (Анекс 2), па је усвојено да се надвишење од 1.000 до 1.005 мнм одвија напредовањем у супротном смеру од седиментног језера (према ваздушној падини ретенционе бране). У ту сврху, нагнуте слојеве јаловинског песка (са нагибом 1:3) треба ослонити на проширену круну ретенционе бране (камено земљане) на коти од 977,5 мнм, слика 5. Измењена геометрија узводне бране у предметној

анализи (у поређењу са Анексом 2) урађена према сазнању и концепту техничке изводљивости надвишења од 5,0 m хидројаловишта Тораница 1 (ХЕИ - Скопје, 2023.10.01). Добијена је са нагибом јаловинског песка 1:3, бермом на коти од 977,5 мнм од 3,0 m и нагибом алувијумског баласта 1:2,3. Затрпавање шљунковитом мешавином (алувијумом) на висини од 977,5 - 956,6 = 20,9 m и променљиве ширине, насипано у хоризонталним слојевима од 30 cm и уз умерено збијање, које треба извршити пре одлагања на низводну падину јаловинског песка са нагибом од 1:3 више од надвишења на коти 1.000,0 мнм.

У даљем тексту овог чланка дат је преглед кључних поставки и закључака из конструктивне (статичке, филтрационе и динамичке) анализе надвишења узводне (диверзионе) бране од 977,5 до 1.005,0 мнм хидројаловишта Тораница 1.



Слика 5. Измењена геометрија (у поређењу са Анексом 2) ваздушног нагиба узводне (ретенционе) бране са круном на 1,005 мнм

3. КОНСТРУКТИВНА АНАЛИЗА НАДВИШЕЊА УЗВОДНЕ БРАНЕ ХИДРОЈАЛОВИШТА ТОРАНИЦА 1 ДО 1.005 мнм

3.1 ОСНОВНИ УЛАЗНИ ПОДАЦИ ЗА КОНСТРУКТИВНУ АНАЛИЗУ

За одређивање вредности недрениране чврстоће смицања јаловинског муља у статичким условима $S_u(\text{yield})/\sigma'_v$ и у условима ликвидације $S_u(\text{liq})/\sigma'_v$ в, које су одређене 'in situ' SPT и CPT, подаци из најновија теренска геотехничка истраживања (ДИПКО - Скопје, 2023.03.16). Теренска истраживања су се састојала од извођења две бушотине на удаљености од узводне ивице првобитне конвенционалне ретенционе бране (круном на 977,5 мнм) на 55,6 м ИД-1 и 72,5 м ИД-2 до максималне дубине од око 40 м, на максималном пресеку (отприлике на средини корита реке). У бушотинама ИД-1 спроведене су две серије стандардних (динамичких) испитивања пенетрације (SPT) и једна конусна (статичка) испитивања пенетрације са мерењем порног притиска (CPT). У бушотини ИД-1 потенцијал ликвидације је процењен на дубини од око 16,1 м, са SPT, а најнижи параметри чврстоће са CPT су добијени приближно у тој зони.

Резултати CPT у ИД-1, за критичну дубину од 15 до 25 м, дати су на слици 6. Са процењеним вредностима CPT и коришћењем израза из техничке литературе за прорачун чврстоће смицања без

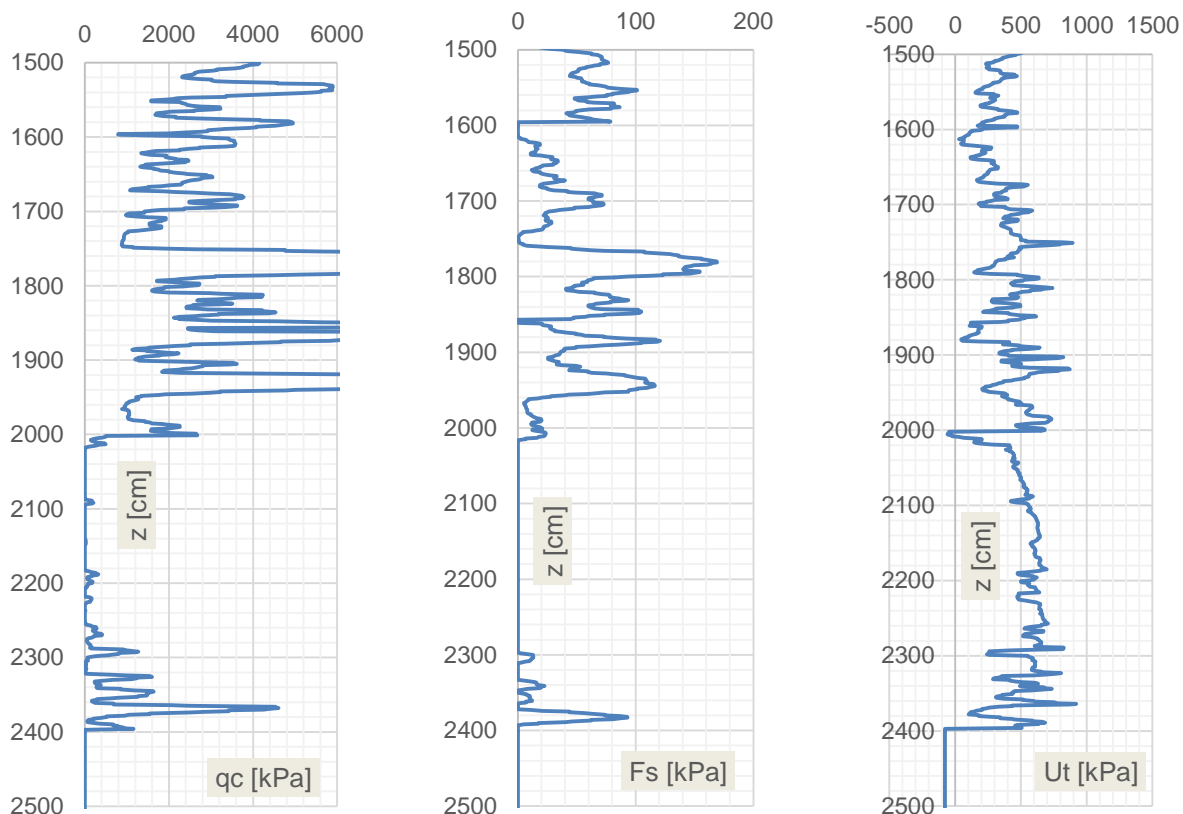
дренирања (Campanella, R. G., Gillespie, D., and Robertson, P. K. 1982), (Campanella, R. G., et al. 1985), (Olson, S.M., and Stark, T.D. 2003), (Robertson, P.K. 2010), (Robertson, P.K. 2016), (Robertson, P.K., 2020), одређене су вредности $S_{u(\text{yield})}/\sigma'_v$ и $S_{u(\text{liq})}/\sigma'_v$. За даље анализе усвојене су следеће вредности $S_{u(\text{yield})}/\sigma'_v = 0,21$ и $S_{u(\text{liq})}/\sigma'_v = 0,04$.

Вредности преостале (резидуалне) чврстоће ликвидираних локалних материјала $S_u(\text{liq})/S'_u$ одређене су на основу података о ефективним вертикалним напонима, а усвојене су вредности систематизоване у табели 1.

3.2 СТАТИЧКА АНАЛИЗА

Почетно стање напона пре почетка надвишења одређује се апроксимацијом дистрибуције порног притиска према измереним подацима пиезометрима, анализом типа 'in situ', чиме се симулира почетно стање укупних напона (почетно стање за следећу фазу оптерећења) и ефективни напони.

Са почетним стањем напона хидројаловишта за таложно језеро на koti од 984 мнм, симулирано је надвишење у 7 фаза оптерећења, за следеће коте у језеру: 987,5, 990,0, 992,5, 995,0, 997,00 мнм, 1.000,0 и 1.002,5 мнм, тако да је круна бране од циклонираниог песка увек 2,5 м виша од седиментног језера. Свака етапа (слој) седиментног језера и пешчане бране висине 2,5 м има трајање од 180 дана и израчунат је анализом консолидације у



Слика 6. (1) qc - CPT cone resistance, (2) Fs - CPT sleeve friction, (3) Ut - Total pore pressure during penetration, measured behind the tip

Табела 1. Консолидовани недренирани параметри чврстоће на смицање

		Static	Initial	Dynamic	Dynamic
fi_l	zone	Su/S'y	S'y	Su(liq)/S'y	Su(liq)
o			kPa		kPa
10	shallow lagoon	0.19	300	0.04	12
10	deep lagoon	0.21	600	0.04	24

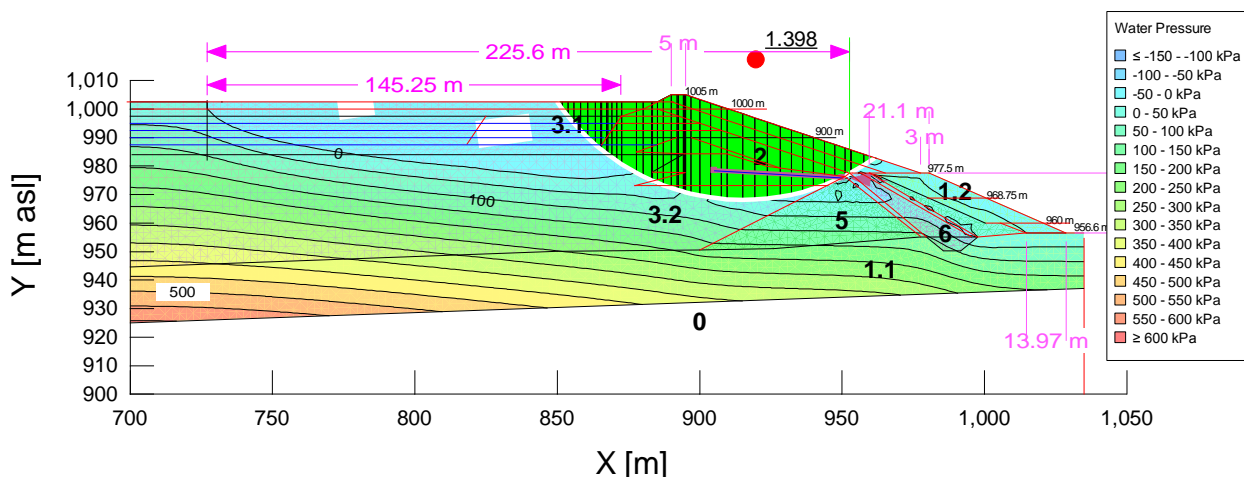
10 корака оптерећења са експоненцијалним порастом, јер је дисипација вишка порног притиска најинтензивнија у почетни период. Изградња алувијумског насипа дуж ваздушне падине ретенционе бране почиње након достизања коте круне пешчане бране на 1.000,0 m нм. Симулиран је алувијумски насип у 3 етапе оптерећења до кота 960,0, 968,75 и 977,5 мнм у трајању од 15, 30 и 30 дана сваки (или укупно 75 дана), уз анализу консолидације у 5 корака оптерећења са експоненцијалним растом. На крају сваке етапе у

фази изградње одређују се кумулативне вредности хоризонталних и вертикалних помака и ефективних нормалних вертикалних напона, које треба да буду у поређењу са измереним вредностима из техничког посматрања.

Финално за етапу бр. 7 фазе изградње надвишења проверавају се: критичне клизне површине (са минималним фактором стабилности), за први прираст оптерећења (одмах након примене оптерећења од 2,5 m) и за последњи прираст

оптерећења (са дисипацијом дела вишка порног притиска после 180 дана) и у случају земљотреса, применом псеудостатичке методе, слика 7, са

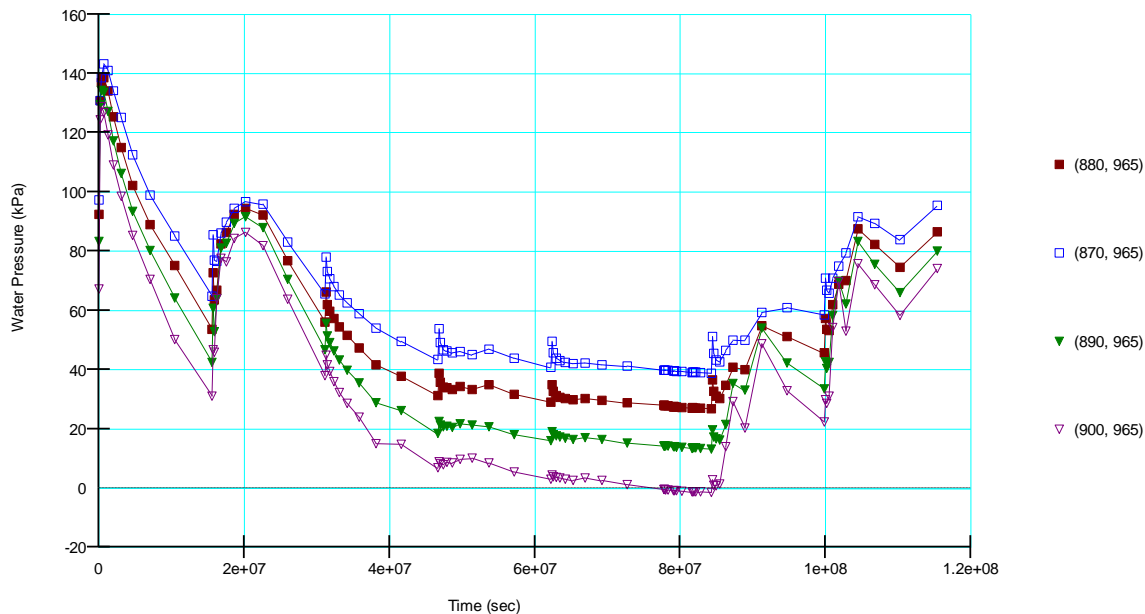
кофицијентом сеизмичности $K_{sx} = 0,10$ и $K_{sy} = -0,07$.



Слика 7. Критична клизна површина у последњем инкременту оптерећења после 180 дана и под дејством земљотреса (псеудостатског), седиментно језеро на надморској висини од 1.002,5 мнм

На следећој слици 8 дат је развој и дисипација порног притиска консолидације на коти 965 м нм, за растојање X модела од 880 м до 900 м, односно у критичној зони седиментног језера, испод циклонираних пешчане бране изнад 1.005 мнм. Ова зависност је симулирана током 7 етапа изградње

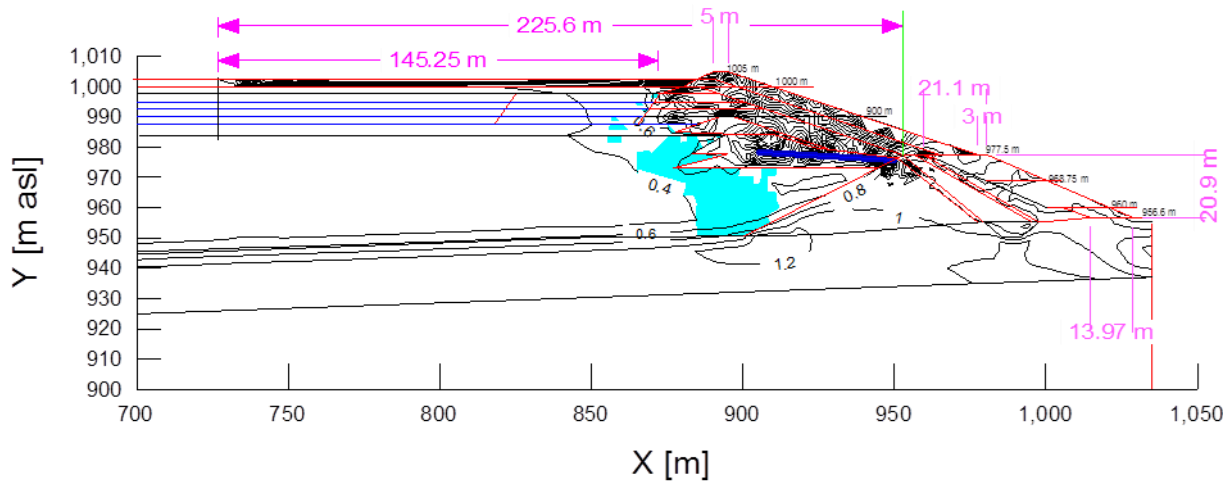
хидројаловишта након 180 дана, односно у периоду од $7 \cdot 180 = 1.260$ дана и 75 дана за изградњу алувијумског насипа на ваздушној страни каменоземљане бране, односно за укупан период од 1.335 дана (115.344.000 секунди или 3,66 година).



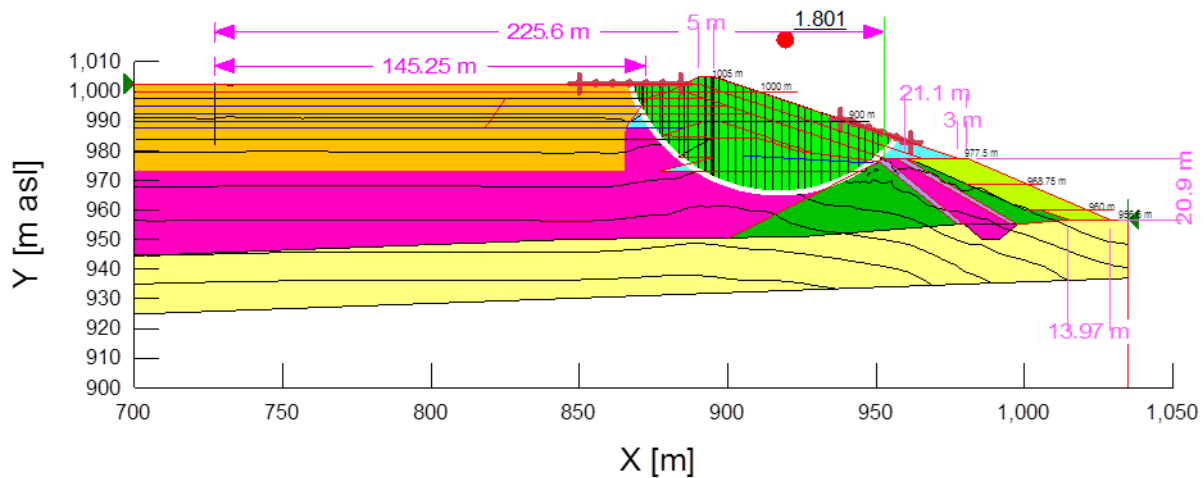
Слика 8. Развој (повећање) и дисипација (смањење) консолидационог порног притиска у таложном језеру на коти од 965 мнм, у зони испод надвишења циклонираним песком

Зоне у седиментном језеру са вредностима $(q/p') > (0,42-0,44)$ налазе се изнад „површине лома“ и ликвидациране су (слика 9). У продужетку је критична клизна површина за косину ретенционе

броне (слика 10) у фази пред земљотресом, са чврстоћом на смицање у ликвидацираним зонама (у условима статичке ликвидације).



Слика 9. Расподела коефицијента q/p' [-] са ликвидацираним зонама, за почетно (пред земљотресно) стање напона, када је муљ јаловине подложен ликвидацији

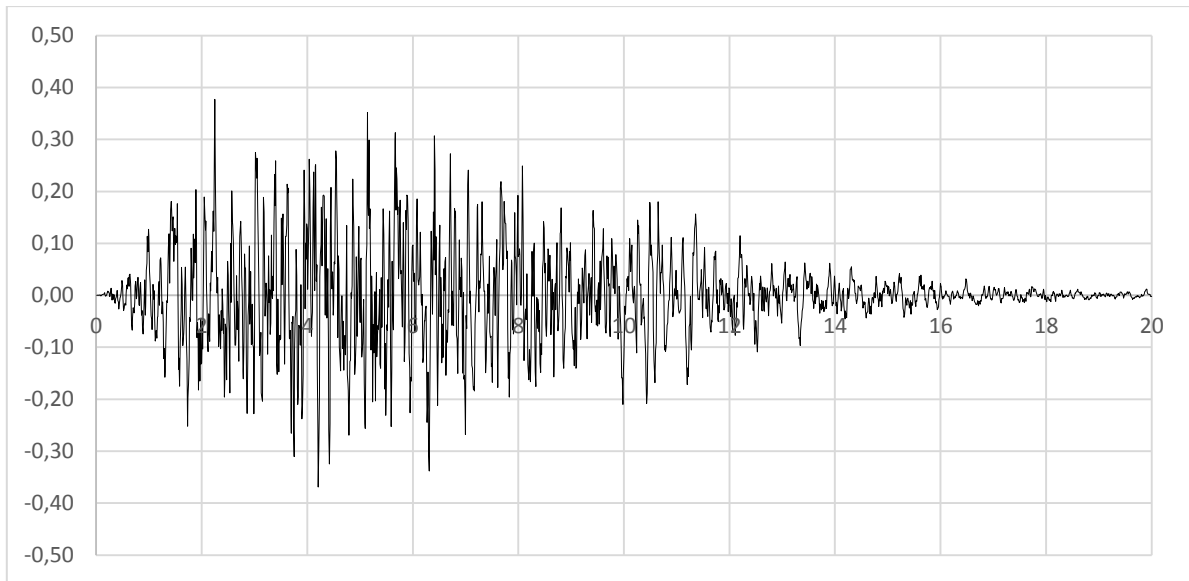


Слика 10. Критична клизна површина у фази пре земљотреса, са чврстоћом на смицање у ликвидацираним зонама (статичка ликвидација)

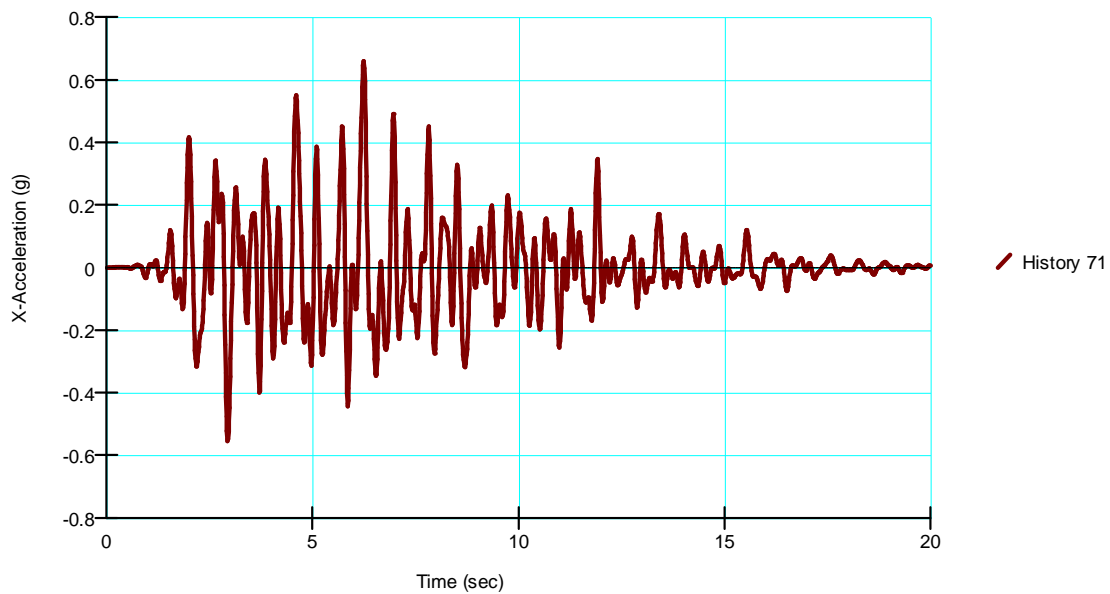
3.3. ДИНАМИЧКА АНАЛИЗА

Динамички одговор геосредине, током Safety Evaluation Earthquake (SEE) са $PGA=0,36\text{ g}$ и $PGA_y = 0.25\text{ g}$, трајањем $t = 20\text{ s}$, са синтетичким акцелерограмом T=10,000_1 (слика 11), дат је на сликама 12 и 13. Визуелна провера да ли је

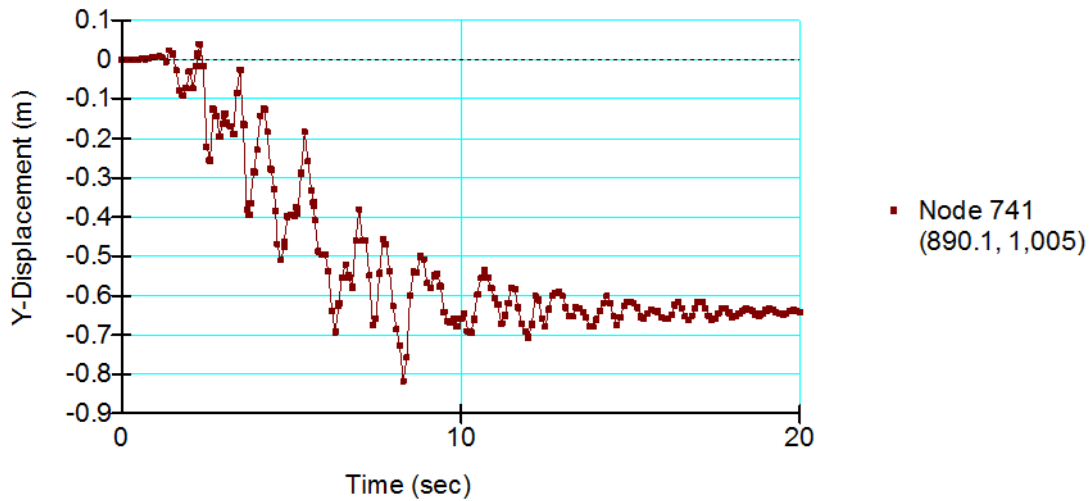
динамички одговор исправан је дијаграм релативних хоризонталних померања. Стално вертикално померање, изазвано инерцијским силама током побуде, релевантано за процену сеизмичке отпорности јаловишне бране на 1.005 мнм је слегање у круну, које износи 65 cm.



Слика 11. Временска историја (акцелерограм) хоризонталне компоненте убрзања за SEE T-10,000-1 са $t_3 = 20$ s, $PG_{Ax} = 0,36$ g (побуда)



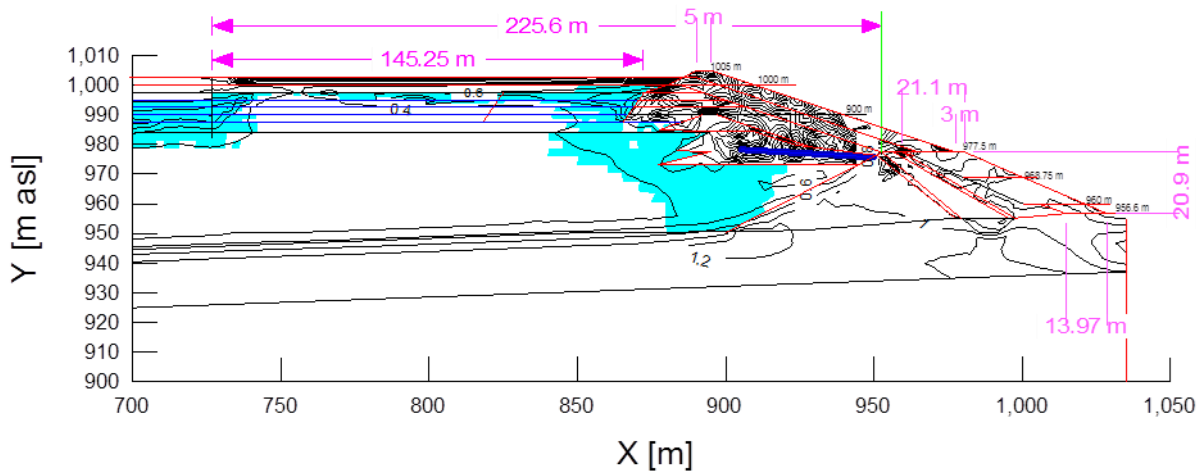
Слика 12. Апсолутна убрзања $a[g] \div t[s]$ у хоризонталном правцу, у круни ретенционе бране Тораница "71" надвишене на кату 1,005 мнм (одговор)



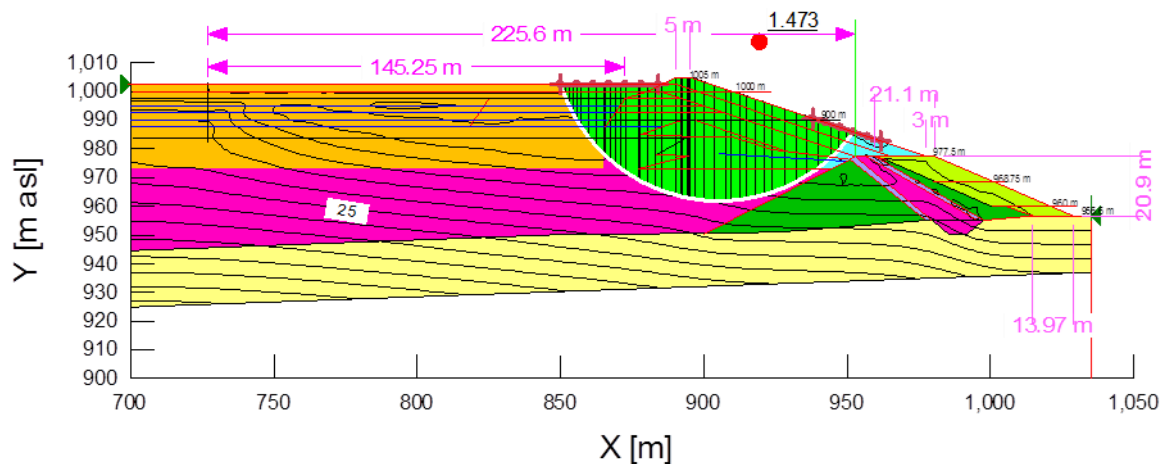
Слика 13. Трајно вертикално слегање од 65 см утврђено ДД методом (динамичком деформацијом) у узводној ивици круне бране на коти од 1.005 мнм

Током земљотреса долази до повећања порног притиска, што ствара зону ликовификације након земљотреса (слика 14). За стање динамичке ликовификације добијена је минимална стабилност косине ретенционе бране Тораница са круном на 1,005 мнм у фази после земљотреса (слика 15).

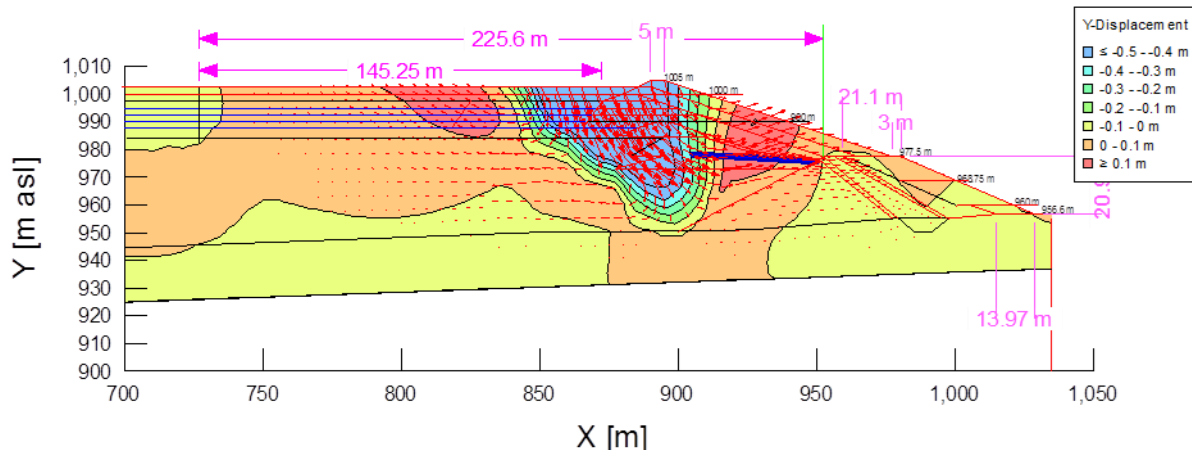
Појава ликовификације ће проузроковати прераспделу ефективних напона, што ће резултирати постпотресним померањима у геоокружењу, хоризонтално и вертикално, слика 16, са слегањем у круну око 0,5 м.



Слика 14. Распдела коефицијента q/p' [-] са ликовифицираниом зоном, за стање напона на крају дејства земљотреса (динамичка ликовификација)



Слика 15. Критична клизна површина косине, у фази после земљотреса, са регуларном дужином плаже од 150 m



Слика 16. Дистрибуција додатних вертикалних Y померања и вектора померања XY после дејства земљотреса, са дисипацијом вишка порног ликвификационог притиска

4. ЗАКЉУЧАК

Општи закључак је да је надоградњом узводне (ретенционе) бране хидројаловишта Тораница 1, према усвојеној геометрији и распореду локалних материјала, обезбеђена задовољавајућа статичка стабилност и сеизмичка отпорност, према важећим прописима за пројектовање. То је закључено на основу следећих чињеница.

За критичну површину клизања низводне косине у фази пре земљотреса, са чврстоћом на смицање у ликвифицираним зонама (статичка ликвификација),

добија се висок фактор стабилности од 1,801, значајно већи чак и од дозвољеног за трајну стабилност са Фдоз = 1.5.

Трајно вертикално померње, изазвано инерционим силама током побуде, које је релевантано за оцену сеизмичке отпорности бране са круном на 1.005,0 мнм је слегање у круни од -0,65 m, израчунато методом Динамичке Деформације (ДД).

Током земљотреса долази до повећања порног притиска, што ствара проширену зону ликвификације након земљотреса. За стање динамичке

ликвифакције добијена је минимална стабилност косине ретенционе бране Тораница 1 са круном на 1.005 мнм. Она износи $\Phi = 1,473$ за критичну клизну површину, односно већа је од дозвољене за инцидентно екстремно оптерећење $\Phi_{\text{доз}} = 1,1$.

Појава ликвифакције ће проузроковати прераспodelу ефективних напона, што ће резултирати постпотресним померањима у геоокружењу, како хоризонталним тако и вертикалним, са вертикалним слегањем у круни на коти 1.005 мнв од 50 цм. Укупно трајно слијегање у круну износи $65 + 50 = 115$ см. Они су нижи од заштитне висине од нормалног водостаја до круне бране од 2,5 м, односно не постоји опасност од наглог и неконтролисаног пражњења јаловинског муља из таложног језера.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Campanella, R. G., et al. 1985. Recent Developments in In-situ Testing os Soils, XI ICSMFE San Francisco
- [2] Campanella, R. G., Gillespie, D., and Robertson, P. K. 1982. "Pore pressures during cone penetration testing." Proc., 2nd European Symp. on Penetration Testing, ESPOT II, Balkema, Rotterdam, The Netherlands, 507–512
- [3] Olson, S.M., and Stark, T.D. 2003. Yield strength ratio and liquefaction analysis of slopes and embankments. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 129(8): 727–737.
- [4] Petkovski L., 2022.11 "Embankments above existing waste lagoons – geo environments with the highest potential hazard ", „Насипи изнад постојећих таложних језера – геосредине са највећим потенцијалним опасностима“, UDK: 627.824, Originalni naučni rad, VODOPRIVREDA, ISSN 0350-0519, Vol. 54 (2022), No. 317-318, p. 109-121, Beograd, Srbija
- [5] Petkovski L., Mitovski S., 2018.04 "Numerical analysis of displacements in the post-exploitation period of tailings dams with a combined construction method", Topic - Tailings Dams, USSD 38th Annual Meeting and Conference, A balancing Act: Dams, Levees and Ecosystems, April 3- May 4, 2018, Miami, Florida, USA, CD Proceedings
- [6] Petkovski L., Mitovski S., 2018.07, "Assessment of seismic resistance of combined tailings dams", 26. Congress on Large Dams, ICOLD, 1–7 July 2018, Vienna, Austria, CD Proceedings Q.101-R.58, p.978-991
- [7] Petkovski L., Mitovski S., 2019.05, "Application of SPT Results On Liquefaction Phenomenon Modeling Of Tailings Dam", 3-rd International Symposium on Dams and Earthquakes, organized by WGDE-EC-ICOLD and PCOLD, ISBN: 978-972-49-2308-6 Proceedings, p.209-220, (6-8).05.2019, Lisbon, Portugal
- [8] Petkovski L., Mitovski S., 2019.09 "An analysis of the waste lagoon water level influence on the liquefaction resistance of the tailings dams", 11th ICOLD European Club Symposium, "The future of Dams (in Europe): Prospects and Challenges in a changing Environment", CD Proceedings - Session 8: Advances in dam engineering: modelling, 2-4 October 2019, Chania, Crete, Greece,
- [9] Robertson, P.K. 2010. Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 136(6): 842–853.
- [10] Robertson, P.K. 2016. Cone penetration test (CPT)-based soil behaviour type (SBT) classification system — an update. Canadian Geotechnical Journal, 53(12): 1910–1927.
- [11] Robertson, P.K., 2020, Evaluation of flow liquefaction and liquefied strength using the cone penetration test: an update, Canadian Geotechnical Journal. 00: 1–5 (0000)
- [12] Геинг - Скопје, 2018.09.12, Основен проект за надвишување на ретенциона и песочна брана од 986.5 мнв до 1,000.0 мнв на хидројаловиште Тораница - К. Паланка, оговорен проектант Наталија Алтановска Божиновска
- [13] Геинг - Скопје, 2018.09.12, Основен проект за надвишување на ретенциона и песочна брана од 986.5 мнв до 1,000.0 мнв на хидројаловиште Тораница - К. Паланка, оговорен проектант Н. Алтановска Божиновска и други
- [14] Градежен факултет – Скопје, 2018.09, Иновирана анализа на сеизмичката отпорност на јаловиштето Тополница, за променлива kota

на нормално ниво во езерото од 649.0 до 652.0 mnn, со проценка за складирање на максимална количина јаловина во езерото, (Анекс бр. 4 на Изведбениот проект на јаловиштето Тополница, Бучим, со круна 654.0 mnn), Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други

- [15] ДИПКО – Скопје, 2022.08.30, Проект за надвишување на ретензионата брана од кота 993.5 до кота 1,000.0 мнв на хидројаловиштето на рудникот Тораница, К. Паланка (Анекс бр.1 на Основен проект за надвишување на ретензиона и песочна брана од 986.5 до 1,000 мнв на хидројаловиште Тораница–прелиминарна анализа на стабилност), Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
- [16] ДИПКО – Скопје, 2023.03.16, Извештај од геотехнички теренски и лабораториски испитувања на хидројаловиште бр.1 на рудникот Тораница, К. Паланка, одговорен проектант Ј.Б. Папиќ и други
- [17] ДИПКО – Скопје, 2023.05.29, Проект за надвишување на ретензионата брана од кота

993.5 до кота 1,000.0 мнв на хидројаловиштето на рудникот Тораница, К. Паланка (Анекс бр.2 на Основен проект за надвишување на ретензиона и песочна брана од 986.5 до 1,000 мнв на хидројаловиште Тораница - детална анализа на напрегања, деформации и стабилност), Љ.Петковски (одговорен проектант) и други

- [18] ИЗИИС - Скопје, 2020.10, Студија за сеизмички hazard за профилот САСА-2, Извештај 2020-59, Д.Дојчиноски (Одговорен проектант) и други
- [19] Техника 20 – Скопје, 2022.02.21, Геотехнички испитувања и Идеен и Основен проект за јаловиште бр. 2 на рудникот Тораница, К. Паланка, Дел 1. Геотехнички елаборат, одговорен проектант И. Пешевски и други
- [20] ХЕИ – Скопје, 2023.10.01, Стручно мислење за надвишување до кота 1,005 мнв на браните на хидројаловиштето Тораница бр. 1, К. Паланка, Љ.Петковски (одговорен проектант) и други.

STABILITY ANALYSIS OF A DIVERTING COMBINED DAM, A ROCK-EARTH DAM HEIGHTENED WITH A TAILINGS DAM

by

Ljupcho PETKOVSKI, PhD, CEng, Prof.
Faculty of Civil Engineering in Skopje,
University Sts Cyril and Methodius, RN Macedonia

Summary

The need to provide an additional volume for depositing tailings material, necessary for the regular operation of mines in conditions of spatial limitation, actualizes the upgrade of the existing tailings storage facilities. The heightening of the existing tailings dams, with the construction of a new tailings sand dam above the existing waste lagoon (a method similar to the upstream advancement of tailings dam), is a heterogenic geo environment that is susceptible to liquefaction during static and dynamic (cyclic) loading and therefore they are the civil engineering structures with the highest stability risk.

This heightening is characterized by detailed geotechnical in-situ investigations and sophisticated structural analyses. They are illustrated in this article by the results of the stability investigation (in static and dynamic conditions) of the heightening of the existing upstream diverting rockfill dam with clay screen, with tailings sandy dam above the tailings deposition lake of the tailings storage facility Toranica 1, Kriva Palanka, Republic of North Macedonia.

Key words: tailings dams, waste lagoons, heightening, liquefaction