



Здружение Македонски комитет за големи брани
Macedonian Committee on Large Dams

Зборник на трудови
Proceedings

ВТОРА КОНФЕРЕНЦИЈА ЗА ХИДРОЈАЛОВИШТА

SECOND CONFERENCE ON TAILINGS STORAGE FACILITIES

21.10÷22.10. 2022 год.
21.10÷22.10. 2022

Штип, Р.С. Македонија
Shtip, R.N. Macedonia

ОРГАНИЗАТОР

Здружение Македонски комитет за големи брани

ORGANIZED BY

Macedonian Committee on Large Dams

ИЗДАВАЧ

Здружение Македонски комитет за големи брани

PUBLISHED BY

Macedonian Committee on Large Dams

ЗА ИЗДАВАЧОТ

Проф. д-р Љупчо Петковски

Претседател на Здружение Македонски комитет
за големи брани**FOR THE PUBLISHER**

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD

President of Macedonian Committee on
Large Dams**ТЕХНИЧКА ОБРАБОТКА**

Стевчо Митовски, Фросина Пановска

TECHNICAL PREPARATION BY

Stevcho Mitovski, Frosina Panovska

ЛЕКТУРА

Тања Стевановска-Цветковска

PROOFREADER

Tanja Stevanovska-Cvetkovska

ПЕЧАТЕЊЕ

Промедиа - Скопје

PRINTED BY

Promedia - Skopje

ТИРАЖ

50 примероци

PRINTING RUN

50 copies

ФОТОГРАФИЈА НА НАСЛОВНА СТРАНАХидројаловиште Саса 3-2, поглед од узводна
страна**COVER PHOTO**Tailings dam Sasa 3-2, view from upstream
side

© Сите права се заштитени. Публикацијата не смее да биде преведувана или копирана во целина или во делови без писмена дозвола на издавачот.

© All rights reserved. The publication can not be translated or copied at full or any part of it without written permission from the publisher.

CIP - Каталогизација во публикација

Национална и универзитетска библиотека "Св. Климент Охридски", Скопје

627.8:622.7'17(062)

КОНФЕРЕНЦИЈА за хидројаловишта (2 ; 2022 ; Штип)

Втора конференција за хидројаловишта : зборник на трудови :

21.10-22.10.2022 год. Штип, Р.С. Македонија / [уредници Стевчо Митовски,

Фросина Пановска] = Second conference on tailings storage facilities :

proceedings : 21.10-22.10.2022 Shtip, R. N. Macedonia / [editors Stevcho

Mitovski, Frosina Panovska]. - Скопје : Здружение Македонски комитет за

големи брани ; Skopje : Macedonian committee on large dams, 2022. - 142

стр. : илустр. ; 29 см

Библиографија кон трудовите

ISBN 978-608-4953-01-2

а) Хидројаловишта -- Собири

COBISS.MK-ID 58382853

РЕДАКЦИСКИ ОДБОР / EDITORIAL BOARD

Проф. д-р Љупчо Петковски, Претседател на ЗМКГБ

Градежен факултет, Универзитет Св. Кирил и Методиј во Скопје, Р.С. Македонија

Prof. Ljupcho Petkovski, PhD, President of MACOLD

Civil Engineering Faculty, Ss Cyril and Methodius University in Skopje, R.N. Macedonia

Проф. д-р Емилија Беднарова, Претседател на Словачкиот комитет за големи брани

Технички Универзитет во Братислава, Словачка

Prof. Emilia Bednarova, PhD, President on Slovak Committee on Large Dams

Slovak Technical University in Bratislava, Slovakia

Проф. д-р Хасан Тосун

Факултет за инженерство и архитектура, Универзитет во Османгази, Ескисехир, Турција

Prof. Hasan Tosun, PhD

Faculty of Engineering and Architecture, Osmangazi University, Eskisehir, Turkey

Проф. д-р Алтан Абдуламит, Претседател на Романскиот комитет за големи брани

Технички Универзитет во Букурешт, Романија

Prof. Altan Abdulamit, PhD, President on Romanian Committee on Large Dams

Technical University in Bucharest, Romania

Проф. д-р Џорџ Дуњас, Претседател за Здружението за големи брани во Грција

Империјал Колеџ Лондон, Англија; Здружение за големи брани во Грција

Prof. George Dounias, PhD, President on Greek Committee of Large Dams

Imperial College of Science and Technology, London, UK; Greek Committee of Large Dams

Доц. д-р Андреј Крижановски

Факултет за градежништво и геодезија, Универзитет во Љубљана, Словенија

Assoc. prof. Andrej Kryžanowski, PhD

Faculty of engineering and geodesy, University in Ljubljana, Slovenia

Проф. д-р Тина Дашиќ

Градежен факултет, Универзитет во Белград, Србија

Prof. Tina Dasic, PhD

Civil Engineering Faculty, University of Belgrade, Serbia

Проф. д-р Димитар Кислиаков, Претседател на Бугарскиот комитет за големи брани

Универзитет по архитектура, градежништво и геодезија, Бугарија

Prof. Dimitar Kisliakov, PhD, President on Bulgarian Committee of Large Dams

University of Architecture, Civil engineering and Geodesy, Bulgaria

Проф. д-р Зекирија Идризи

Универзитет Мајка Тереза, Р.С. Македонија

Prof. Zekirija Idrizi, PhD

Mother Teresa University, R.N. Macedonia

Проф. д-р Благоја Голомеов

Факултет за технички и природни науки, Универзитет Гоце Делчев, Штип, Р.С. Македонија

Prof. Blagoja Golomeov, PhD

Faculty of technical and natural sciences, University Goce Delchev, Shtip, R.N. Macedonia

Проф. д-р Вилос Илиос

Технички факултет, Универзитет Св. Климент Охридски во Битола, Р.С. Македонија

Prof. Vilos Ilios, PhD

Technical faculty, University Ss Clement of Ohrid, R.N. Macedonia



НАДГРАДБА НА ПОСТОЈНИ ТАЛОЖНИ ЕЗЕРА – ОБЈЕКТИ СО НАЈВИСОК РИЗИК ЗА СТАБИЛНОСТА НА ЈАЛОВИШНИТЕ БРАНИ

Љупчо Петковски¹, Стевчо Митовски², Фросина Пановска³

Резиме

Надградбата на таложните езера кај постојните хидројаловишта, од аспект на стабилноста на хетерогената геосредина, има големи сличности со јаловишните брани со узводен метод на градба. Јаловишна брана над таложно езеро или јаловишна брана со узводен метод на градба е подложна на ликвидација при статичко и динамичко (циклично) оптоварување и затоа претставува хидроградежен објект со највисок ризик по однос на стабилноста. Потребата за обезбедување дополнителен волумен за депонирање јаловиштен материјал, неопходен за регуларно функционирање на рудниците во услови на просторно ограничување, ја актуализира надградбата на постојните таложни езера. Оваа надградба се карактеризира со детални геотехнички истраги и софистицирани конструкциски анализи, кои се илустрирани со резултати од истражувањето на стабилноста на насип од суво одлагање над таложното езеро Саса 2, М. Каменица.

Клучни зборови: јаловишни брани, таложни езера, надградба, конструкциска анализа, ликвидација

UPGRADE OF EXISTING TAILINGS PONDS – STRUCTURES WITH HIGHEST STABILITY RISK ON TAILINGS DAMS

Ljupcho Petkovski¹, Stevcho Mitovski², Frosina Panovska³

Summary

The upgrade on tailings ponds at the existing tailings storage facilities, from stability aspects of a heterogenic geo environment, has many similarities with the tailings dams with upstream construction method. The tailings dam above tailings pond, i.e. tailings dam with upstream construction method, is susceptible on liquefaction during static and dynamic (cyclic) loading and therefore it is a civil structure with highest stability risk. 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 sedimentation lakes. This upgrade is characterized by detailed geotechnical investigations and sophisticated structural analyses, which are illustrated by the results of the stability investigation of a dry stacking embankment above the tailings pond Sasa 2, M. Kamenica.

Key words: tailings dams, waste lagoons, upgrade, structural analysis, liquefaction

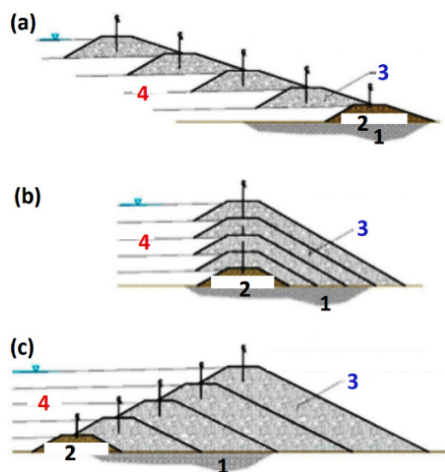
¹ Prof. PhD, CEng, FCE, SCMU, Skopje, RN Macedonia, petkovski@gf.ukim.edu.mk

² Assoc. Prof. PhD, CEng, FCE, SCMU, Skopje, RN Macedonia, smitovski@gf.ukim.edu.mk

³ Assist. MSc, CEng, FCE, SCMU, Skopje, RN Macedonia, fpanovska@gf.ukim.edu.mk

1. ПОТРЕБА ОД НАДГРАДБА НА ПОСТОЈНИТЕ ТАЛОЖНИ ЕЗЕРА

Во фаза на користење на хидројаловиштето, флотациската јаловина со хидротранспорт (најчесто гравитационен пулповод) се спроведува до круната на јаловишната брана. Таму, со циклонирање се раздвојува на две фракции. Со покрупната или сува фракција (циклониран песок) се гради јаловишната брана, а поситната или течна фракција (циклонирана кал) се одлага во таложното езеро. Според начинот на напредување или градба на јаловишните брани се разликуваат три методи: низводен, централен и узводен (слика 1.1).



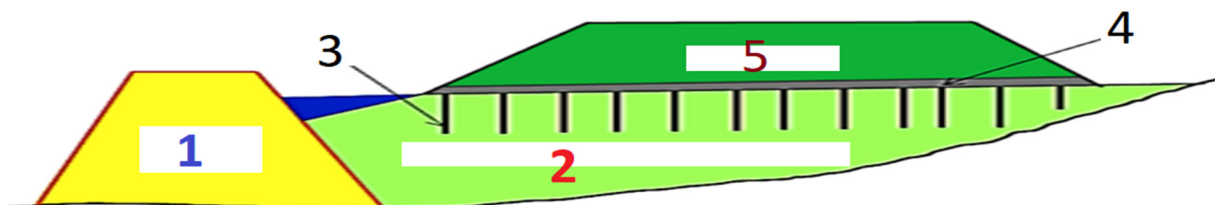
Сл. 1.1. Методи за градба на јаловишни брани: (а) узводен, (в) централен, (с) низводен. 1 – основа, 2 – иницијална брана, 3 – циклонирани песок, 4 – циклонирани кал

Досегашната практика потврдила дека најголема стабилност на јаловишната брана се постигнува со низводниот метод на напредување. Во тој случај, круната на браната се поместува низводно, а циклонираниот песок се одлага во коси слоеви по низводната косина над насип од јаловишниот песок. Најмала стабилност на хетерогената геосредина се добива со узводен метод на фазно напредување. Тогаш, во секоја следна фаза, круната на песочната брана се поместува узводно, односно песочните брани се фундираат над исталожена јаловишна кал.

Хетерогената геосредина - јаловишна брана над таложно езеро или јаловишна брана со узводен метод на градба е подложна на ликвидација при статичко и динамичко (циклично) оптоварување. Статичка ликвидација (Petkovski L., Mitovski S., 2019.05) е можна: (а) со дополнително надворешно оптоварување кое условува пораст на напрегањето на смолкнување, при што состојбата на напрегање во $(q-p')$ дијаграмот се придвижува „нагоре“ до пресек со површината на колапс и/или (б) со дополнително водозаситување и смалување на ефективните нормални напрегања, при што состојбата на напрегање во $(q-p')$ дијаграмот се придвижува „налево“ до пресек со површината на колапс. Динамичка ликвидација (Petkovski L., Mitovski S., 2018.07) се јавува при дејство на земјотрес, каде што цикличното товарење предизвикува континуирано зголемување на порниот притисок, што условува смалување на ефективните напрегања, при што состојбата на напрегање во $(q-p')$ дијаграмот се придвижува „налево“ до пресек со површината на колапс. При појава на ликвидација доаѓа до разурнување на структурата на гранулите и јакоста на смолкнување на материјалот се намалува до steady-state strength. Затоа, јаловишните брани со узводен метод на градба се третираат како хидроградежни објекти од највисок ризик и не се препорачуваат во сеизмички активни региони. Во некои земји со висока сеизмичност, на пример во Чиле и во Перу, градбата на јаловишни брани со узводно напредување е забранета со закон.

Надградбата на таложните езера кај постојните хидројаловишта, од аспект на стабилноста на хетерогената геосредина, има големи сличности со јаловишните брани со узводен метод на градба. Клучната разлика се состои во фактот дека завршил периодот со хидротранспорт на пулпата и таложното езеро на хидројаловиштето е оформено со завршната кота. За функционирањето на рудникот во натамошниот период, доколку нема простор за ново таложно

езеро, односно нема хидротранспорт на јаловината, тогаш за пулпата од погонот флотација се применува метод со пресување и филтрирање, со што се добива „сува јаловина“. Доколку горната површина на постојното јаловиште се користи како основа за насип од суво одлагање (dry stacking), тогаш поради постоење на вишок од порен притисок (excess pore pressure) во внатрешноста на езерото од слабо водопропустлива јаловишна кал, стандардното решение е со мерки за дисипација на порниот притисок, [слика 1.2](#).



Сл. 1.2. Надградба на постојно таложно езеро со јаловина на суво одлагање. 1 – постојна брана, 2 – постојно таложно езеро на хидројаловиште, 3 – вертикални дренажи за дисипација на вишок на порен притисок (wick drain), 4 – дренажен килим (granular bedding), 5 – суво одлагање (dry stack)

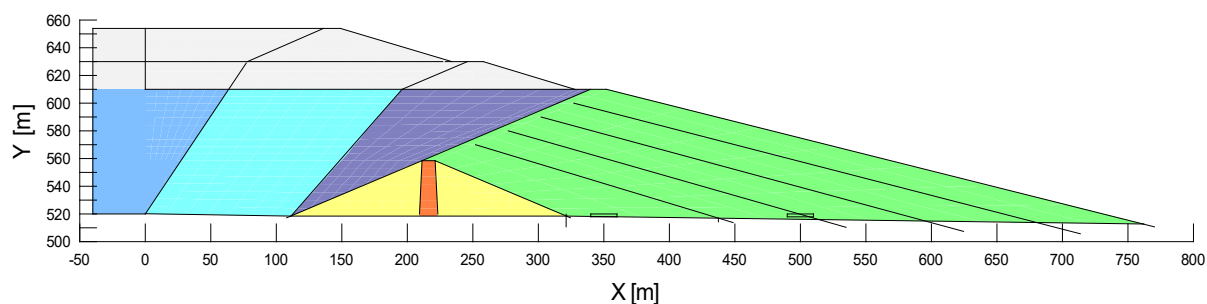
Се поставува логично прашање – од каде произлегува потребата на рударските компании да иницираат решенија со надградби над постојните таложни езера? Очигледно е дека тие се насипни конструкции со највисок ризик и за потврда на нивната стабилност, неопходни се детални геотехнички истражувања и софистицирани конструкциски (статички, филтрациони, динамички) анализи, односно големи финансиски вложувања. Објаснувањето, според нас, е следно. Од една страна, просторот за опстанок, развој и растеж на рударските компании, кои се есенцијални за егзистенцијата на населението во одделни региони (кои се потпираат на рударскиот комплекс), поради наметнувањето на сè построги еколошки и социолошки критериуми, станува сè поограничен. Од друга страна, добивање дозвола за проширување на концесиониот простор (или зголемување на индустрискиот опфат) од огромен број агенции/институции, во држави кои се силно бирократизирани и, за жал, корумпирани, за рударските компании се пролонгира во долгогодишен исцрпувачки административен процес со крајно неизвесен исход. Затоа, рударските компании сè почесто се одлучуваат за решенија за ризични хидроградежни објекти, односно насипни конструкции над постојните таложни езера.

2. ПРИМЕРИ ЗА НАДГРАДБА НА ПОСТОЈНИТЕ ТАЛОЖНИ ЕЗЕРА ВО МАКЕДОНИЈА

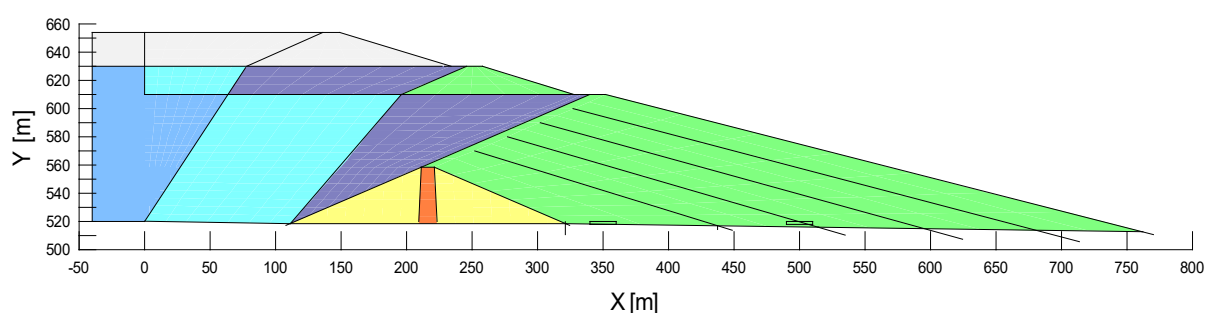
Примери за надградби на постојните таложни езера (или хидроградежни објекти со висок ризик) постојат и во Р. С. Македонија, од кои ќе издвоиме три на рударските компании „Бучим“ – Радовиш, „Булмак“ – Пробиштип и „Саса“ – М. Каменица.

Хидројаловиштето Тополница на рудникот за бакар „Бучим“, Радовиш, се користи од 1979 година. Во изминатиот период во Тополница е одложена јаловина во количина од над 130 М-м³ и е акумулирана вода од околу 9.0 М-м³. Оваа јаловишна брана се карактеризира со фазна изведба и со комбиниран метод на градба, со низводно напредување во прва фаза и со узводно напредување при надвишувањето од втора фаза, реализирано во две етапи ([Petkovski L., Mitovski S., 2018.04](#)). Изградбата на песочната брана во почетната фаза, до кота 610 м.н.в. (I фаза), се изведувала во коси слоеви, со напредување во низводен правец од иницијалната брана ([слика 2.1](#)), со кота во основата на 518.5 и кота на круна 558.5 м.н.в. Потоа, градбата на песочната брана до кота 630 м.н.в. (II фаза, етапа 1), поради близината на с. Тополница до низводната ножица на браната, се изведувала со насипување во узводен правец ([слика 2.2](#)). Во крајната фаза, усвоена е круна на песочната брана до кота 654.0 м.н.в. (II фаза, етапа 2), со напредување во узводен правец, [слика 2.3](#), ([Градежен факултет – Скопје, 2018.09](#)). Хидројаловиштето Тополница, со височина на браната 2-2 над основата кај иницијалната брана од $H_0 = 654.0 - 518.5 = 135.5$ m, е една од највисоките јаловишни брани во Европа. Финалната височина на јаловишната брана 2-2,

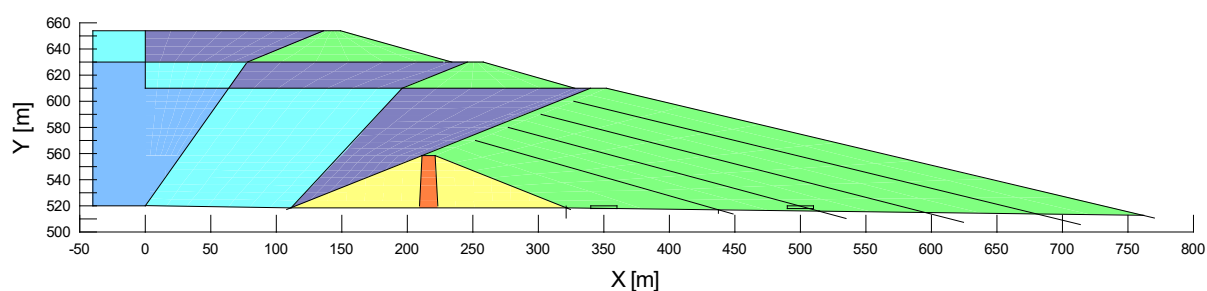
од круната до низводната ножица, изнесува $H_2 = 654.0 - 512.8 = 141.2$ m, со што браната Тополница претставува највисока брана во Р. С. Македонија (Petkovski L., Mitovski S., 2019.09).



Сл. 2.1. Изведба на хидројаловиштето до кота 610 м.н.в., (I фаза)

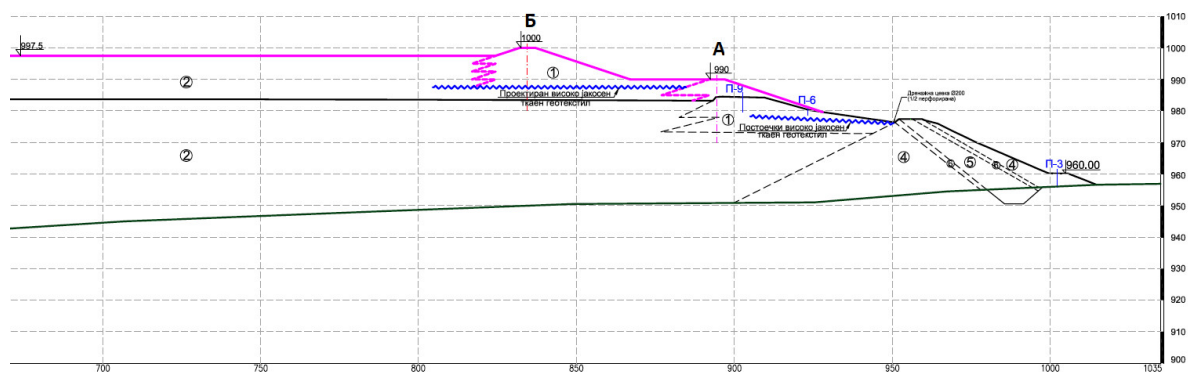


Сл. 2.2. Изведба на хидројаловиштето до кота 630 м.н.в., (II фаза, етапа 1)

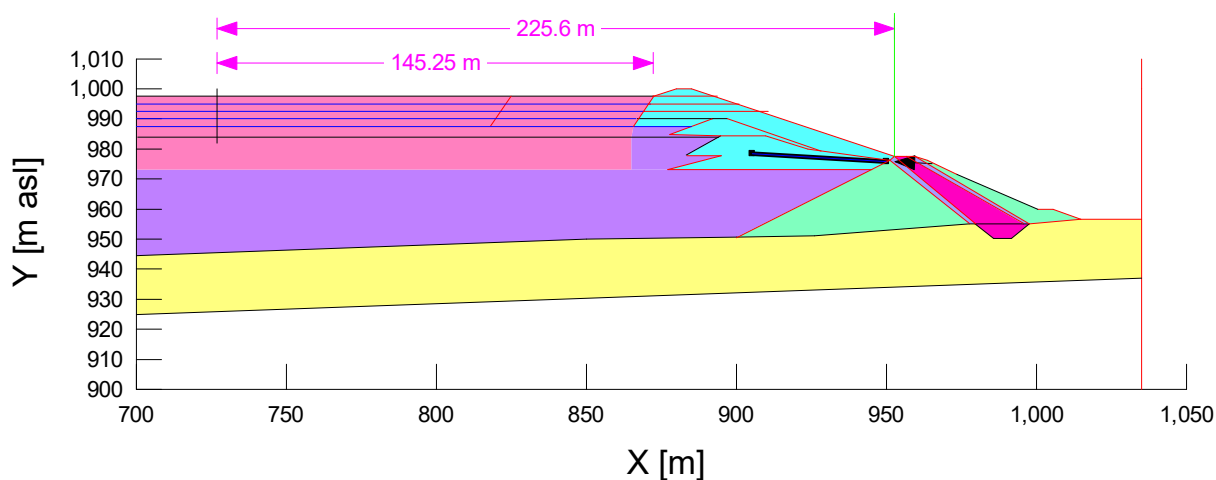


Сл. 2.3. Изведба на хидројаловиштето до кота 654 м.н.в., (II фаза, етапа 2)

Рудникот „Тораница“, Кр. Паланка (Булмак) моментно работи со производство на руда од околу 320,000 t/god, а за потребите на тоа производство во функција е постојното јаловиште. Таложното езеро на јаловиштето било оформено со узводна и низводна брана. Узводната (или ретензиона) брана е конвенционална брана (камено-земјена со глинен екран) со круна на 977.5 м.н.в. Низводната брана е јаловишна брана со низводна градба од циклонирани јаловиштен песок. Постојното јаловиште Тораница е надвишувано два пати. Првото надвишување било до кота на круна 900.0 м.н.в. Ретензионата брана била надвишена со јаловишна брана со централен метод на градба, но со круна поместена од конвенционалната брана, односно фундирана врз таложното езеро, на позиција „А“ (слика 2.4). Второто надвишување, кое е во фаза на изведба, беше проектирано до кота 1,000 м.н.в., во согласност со најновата техничка документација за јаловиштето на рудникот „Тораница“, (Геинг - Скопје, 2018-09-12). Со овој проект беше предвидено ретензионата брана да биде надвишена со јаловишна брана со круна на 1,000 м.н.в. од циклонираниот песок со централен метод на градба, фундирана врз таложното езеро, на позиција „Б“. Во тек е изработка на алтернативно решение за надвишувањето на узводната брана до кота 1,000 м.н.в. (ДИПКО – Скопје, 2022.08.30), слика 2.5, со местоположба во близина на „А“.



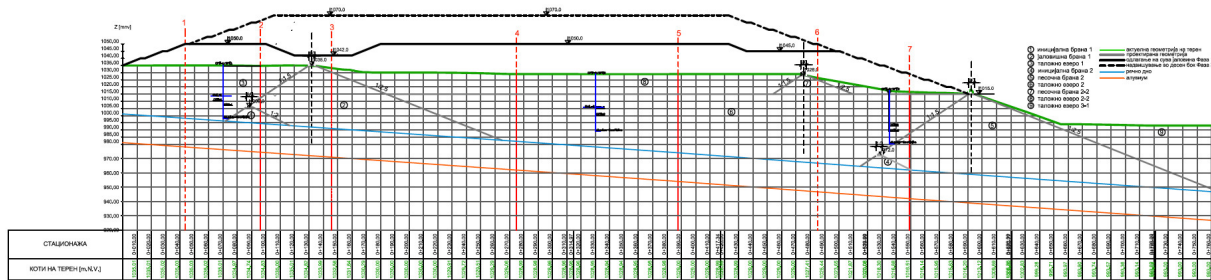
Сл. 2.4. Скица на надвишување на узводна (ретензиона) брана на хидројаловиштето Тораница, според прилог 3 од Основен проект од 2018.09.[12](#)[P1]



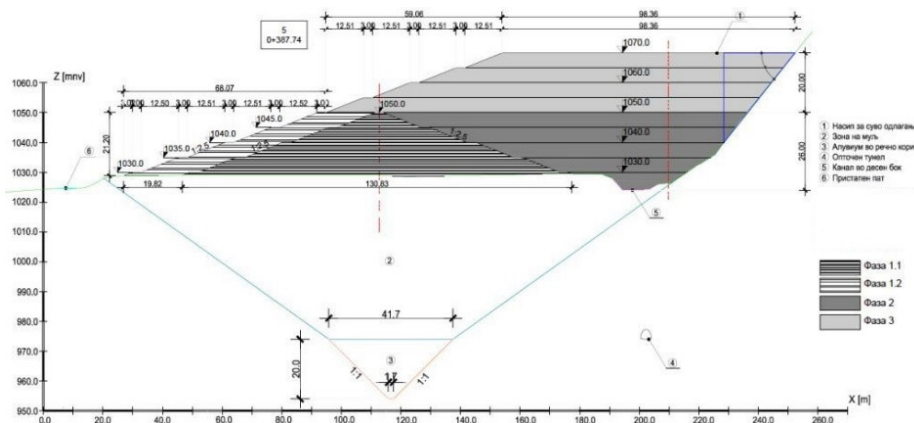
Сл. 2.5. Скица на надвишување на узводна (ретензиона) брана на хидројаловиштето Тораница, според Анекс 1 на Основен проект од 2022.08.[30](#)[P2]

Во досегашниот период на користење на хидројаловиштата на рудникот „Саса“ во М. Каменица, тие биле наменети за одлагање на флотациската јаловина добиена со технолошкиот процес на флотација на минералите олово и цинк. Таа со хидротранспорт била спроведувана до круните на браните на јаловиштата во каскаден систем по Каменичка Река: 1, 2, 3-1, 3-2 и 4 (во периодот кога тие биле активни), од каде што со циклонирање била раздвоена на две фракции. Со покрупната сува фракција (песок) биле градени низводните брани, а поситната течна фракција била одлагана во таложните езера. Според моментната состојба на хидројаловиштето, активно е јаловиштето 4, кое ќе се формира со изведбата на комбинирана јаловишна брана 4, со крајна кота на круна на браната на 952.0 м.н.в. и таложно езеро со максимално работно ниво на 950.0 м.н.в..

Потребата за обезбедување дополнителен волумен за депонирање јаловиштен материјал, неопходен за регуларно функционирање на рудникот „Саса“ во идниот период, беше анализирана повеќе пати од стручниот тим на рудникот „Саса“. Во јули 2019 година беше согледана првата можност за одлагање јаловина врз постојните таложни езера, ([Градежен факултет – Скопје, 2019.07.23](#)). Во јули 2020 година се актуализира можноста за суво одлагање на јаловината, со волумен од најмалку 2.25 М-м3, по површината на таложното езеро 2 и дел над јаловиште 1. Таложното езеро 2 било оформено со јаловишната брана 2, изградена со низводен метод на градба и со круна на 1,015.0 м.н.в.. Узводно од браната 2, пред околу 3-4 децении била изведена јаловишна брана 2-2 со височина од 13.0 m, со што се постигнала кота на таложното езеро 2, на 1,028.0 м.н.в., узводно од браната 2-2. Репрезентативните надолжен и напречен пресек на геосредината се според Идејното решение ([Градежен факултет – Скопје, 2020.06.26](#)), каде што насипот од суво одлагање беше усвоен во хоризонтални слоеви од 5.0 м, со берми од 3.0 м, наклон 1:2.5 и крајна кота на круна на насипот на 1,070 м.н.в. ([слики 2.6. и 2.7.](#)).



Сл. 2.6. Репрезентативен надолжен пресек, скица на насипот од суво одлагање Саса 2, според Идејното решение 2020.06.26



Сл. 2.67. Репрезентативен напречен пресек, профил бр.5, (со скица на насипот од суво одлагање според Идејното решение 2020.06.26

Во натамошниот текст од рефератов е даден приказ на клучните поставки и заклучоци од конструкциската анализа на насипот на суво одлагање над јаловишно езеро Саса 2, односно статичка и филтрациона анализа ([ДИПКО – Скопје, 2021.09.27](#)) и динамичка анализа ([ДИПКО – Скопје, 2021.09.28](#)).

3. КОНСТРУКЦИСКА (СТАТИЧКА И ДИНАМИЧКА) АНАЛИЗА НА НАСИПОТ НА СУВО ОДЛАГАЊЕ НАД ЈАЛОВИШНО ЕЗЕРО САСА 2

3.1 ОСНОВНИ ВЛЕЗНИ ПОДАТОЦИ ЗА КОНСТРУКЦИСКА АНАЛИЗА

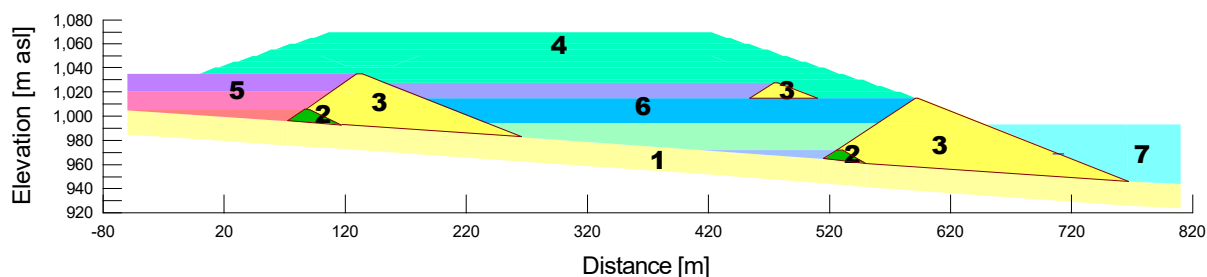
Конструкциската (статичка и динамичка) анализа на насипот на суво одлагање над јаловишно езеро Саса 2 ([слика 3.1](#)) е направена според најновите препораки на ICOLD, односно со еден математички модел за различни фази од оптоварувањето, каде што секоја следна фаза е со иницијална состојба на напрегања утврдена со претходната фаза.

Материјалот во таложното езеро 1 во статичката анализа е моделиран со три зони:

- ✓ од терен на 1,035 м.н.в. (круна на песочна брана 1) до 1,021 м.н.в.,
- ✓ од 1,021 м.н.в. до 1,006 м.н.в. (круна на иницијална брана 1),
- ✓ од 1,006 м.н.в. до контакт со алувиум (уздонна ножица на иницијална брана 1 на кота 995.9 м.н.в.).

Материјалот во таложното езеро 2, во статичката анализа е моделиран со четири зони:

- ✓ 2-1 од терен на 1,028 м.н.в. (круна на песочна брана 2-2) до 1,015 м.н.в. (круна на песочна брана 2-1),
- ✓ 2-2 од 1,015 м.н.в. до 994 м.н.в.,
- ✓ 2-3 од 994 м.н.в. до 972 м.н.в. (круна на иницијална брана 2),
- ✓ 2-4 од 972 м.н.в. до контакт со алувиум (уздонна ножица на иницијална брана 2 на 964.5 м.н.в.).



Сл. 3.1. Репрезентативен надолжен пресек, според Идејното решение од 2020.06.26. (1) песок и чакал (алувиум), (2) шкрилци (иницијална брана), (3) песок - цикониран (брани 1, 2-1, 2-2), (4) суво одлагање - насип, (5) кал 1 - циклонирана (езеро 1), (6) кал 2 - циклонирана (езеро 2), (7) кал 3 - циклонирана (езеро 3-1)

Според најновите геотехнички испитувања за хидројаловиштата 1, 2 и 3-1, како и за материјалот од сувото одлагање, систематизирани во (Геинг Кук - Скопје, 2020.09.29), (DIPKO, Skopje, 2020-11-25), (Knight Piésold, London, 2021-05-12), со поголем број на SPT и CPT тестови, на избрани локации, добиени се следните клучни податоци:

- Порниот притисок во таложните езера 1 и 2 е околу 50 % од хидростатичкиот.
- Вредностите на коефициентот на консолидирана недренирана јакост на смолкнување $Su(yield)/\sigma'v_0$, добиени со CPT се:
 - За таложно езеро 2, на површина е 0.21, на длабочина од 30 м е 0.24 и на длабочина од 45 м е 0.26.
 - За таложно езеро 1, на површина е 0.21 и на длабочина од 30 м е 0.23.
- Во услови на ликвидација вредностите за коефициентот $Su(liq)/\sigma'v_0$, добиени со CPT се:
 - За таложно езеро 2, на површина е 0.04, на длабочина од 30 м е 0.12.
 - За таложно езеро 1, на површина е 0.10, на длабочина од 20 м е 0.05.
- Во услови на ликвидација, параметрите за определување на коефициентите на резидуалната јакост на смолкнување $Sr/\sigma'v_0$, добиени со SPT се:

	BH1, TSF-1		BH2, TSF-2		BH3, TSF-2	
h [m blg]	7.0	21.0	6.4	23.4	12.0	25.6
FC, passing 0.075 mm [%]	48	65	65.0	91.0	23.0	35.0
N1(60-sr)	14	20	13	19	15.5	27

5. За максимална збиеност (највисока јакост) на насипот од суво одлагање, според податоци од лабораторијата на Градежен факултет во Скопје, систематизирани на 27.4.2021 г., оптималната влажност изнесува 10.9 %, со која се добива максимална сува волуменска тежина од 21.5 kN/m³.

3.2 МЕРКИ ЗА ПОДОБРУВАЊЕ НА СТАБИЛНОСТА И УСВОЕНА ФОРМА НА ГЕОСРЕДИНАТА

Критериум за оптимизација на формата на насипот од сува јаловина е максимизација на волуменот со задоволување на критериумите за привремена и трајна статичка стабилност и прифатлива сеизмичка отпорност на хетерогената геосредина. Во моделирањето, за исполнување на оптимизациониот критериум постапно беа применувани и проверувани мерки за подобрување на стабилноста.

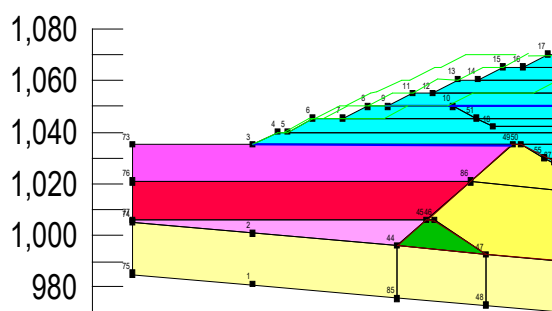
Прва мерка за подобрување на стабилноста на геосредината е поставување дренажни килими на контактот на насипот со сува јаловина со постојните таложни езера 1 и 2 (на кота 1,035 м.н.в. узводно од брана 1, на кота 1.028 м.н.в. узводно од брана 2-2 и на кота 1,015 м.н.в. узводно од брана 2-1) и во внатрешноста на новиот насип од сува јаловина - на кота 1,050 м.н.в. Со оваа мерка практично се елиминира порниот натпритисок во насипот од сува јаловина во текот на

градба и се намали истиот во таложните езера. Оваа мерка има најзначајно влијание во подобрувањето на стабилноста и задржана е во сите натамошни варијанти.

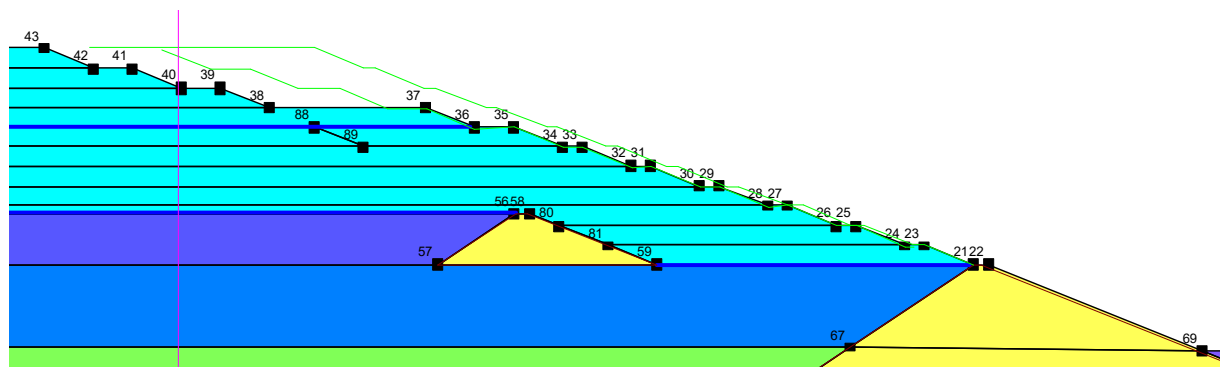
Втора мерка за подобрување на стабилноста на геосредината која беше разгледувана беше изведба на бетонски колови во критичните зони на подножично лизгање, со следни параметри: оскино растојание $L = 1.0$ м, дијаметар $d = 0.6$ м, длабочина $H = 25$ м, модул на еластичност $E = 20.0$ GPa, напречен пресек $F = 0.471$ m², момент на инерција $I = 0.0064$ m⁴. Како што се очекуваше, штом коловите не се анкерувани во крута средина, не се доби подобрување на стабилноста. Со моделот се потврди дека ваква мерка за предметната геосредина има занемарливо влијание и затоа не беше разгледувана во натамошните варијанти.

Трета мерка за подобрување на стабилноста на геосредината која беше разгледувана беше земање предвид на јакоста на затегнување на геотекстилот со кој треба да се обвиткаат дренажните килими. Со примена на спојни елементи беше моделиран геокомпозит (геотекстил споен со геомрежа) со следни параметри: дебелина $d = 4$ мм, модул на еластичност $E = 1.0$ GPa, напречен пресек $F = 0.008$ m² (за два слоја геокомпозит). Како што се очекуваше, геокомпозитот може да обезбеди порамномерни слегнувања (ирелевантно кај насипот од сува јаловина), меѓутоа, не може да ја подобри глобалната сигурност против подножично свлекување. Со моделот се потврди дека ваква мерка за предметната геосредина има занемарливо влијание на стабилноста и затоа не беше разгледувана во натамошните варијанти.

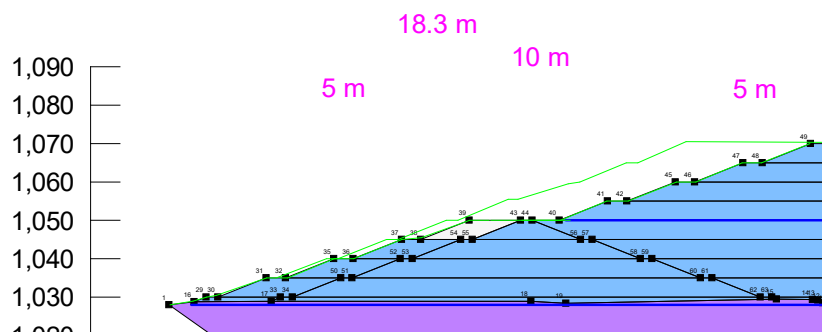
Четврта мерка за подобрување на стабилноста на геосредината која беше разгледувана беше смалување на товарот во активната зона на критичните површини на лизгање. Тоа единствено може да се постигне со зголемување на бERMите во одделните етапи при градба на насипот од сува јаловина, што неминовно ќе предизвика смалување на волуменот на сувото одлагање. Оваа мерка беше разгледувана во поголем број варијанти, со постапно зголемување на широчините на бERMите, но и со истовремена проверка на статичката стабилност и на сеизмичката отпорност (на надолжниот и напречниот модел), со цел да се определи максималниот волумен на насипот од сува јаловина што ги задоволува критериумите за конструкциска стабилност. На тој начин е обликувана формата на насипот со сува јаловина (слики 3.2.1-3.2.3) за кој во следните поглавја се презентирани резултатите од анализа на конструкциската стабилност.



Сл. 3.2.1. Узводна косина на насипот од сува јаловина (кај надолжниот пресек)



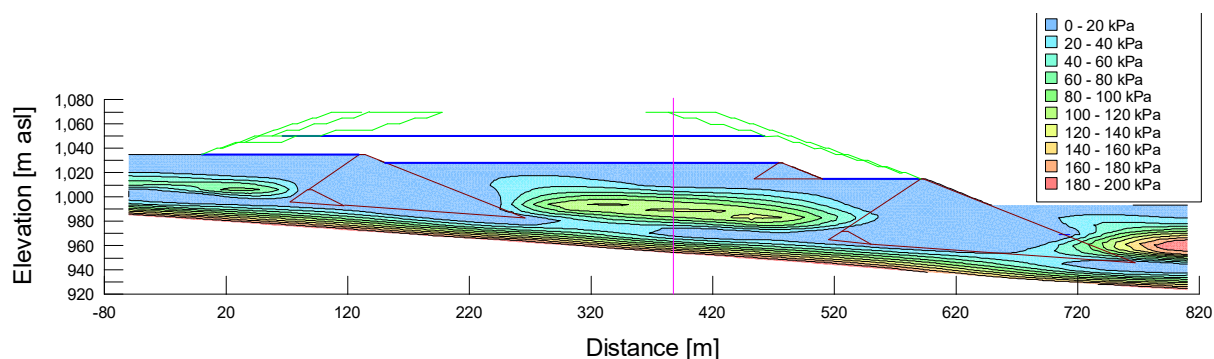
Сл. 3.2.2. Низводна косина на насипот од сува јаловина (кај надолжниот пресек)



Сл. 3.2.3. Лева косина на насипот од сува јаловина (кај напречниот пресек)

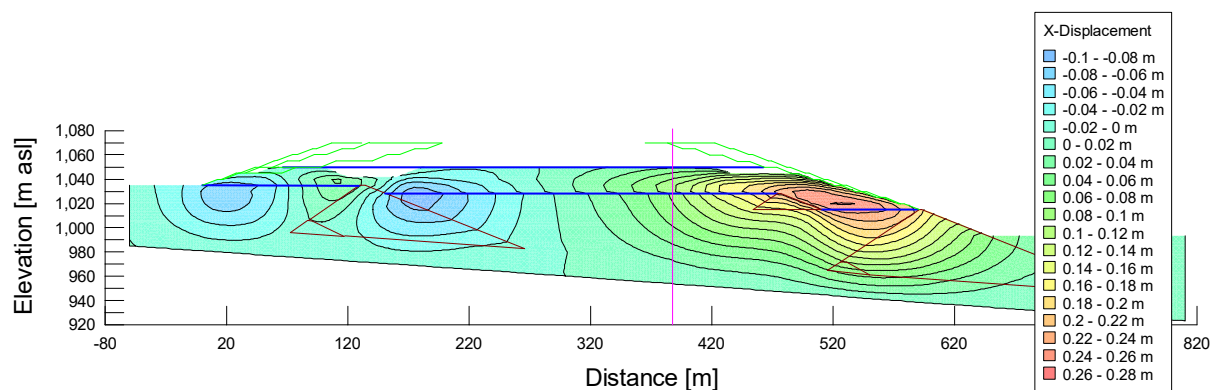
3.3 РЕЗУЛТАТИ ОД СТАТИЧКАТА АНАЛИЗА

Иницијалната состојба на напрегања пред почетокот на сувото одлагање е определена со апроксимација на дистрибуцијата на порниот притисок (слика 3.3.1), со тип на анализа „Insitu“, со што е симулирана почетната состојба на тотални напрегања (иницијална состојба за следна фаза на товарење) и ефективни напрегања.

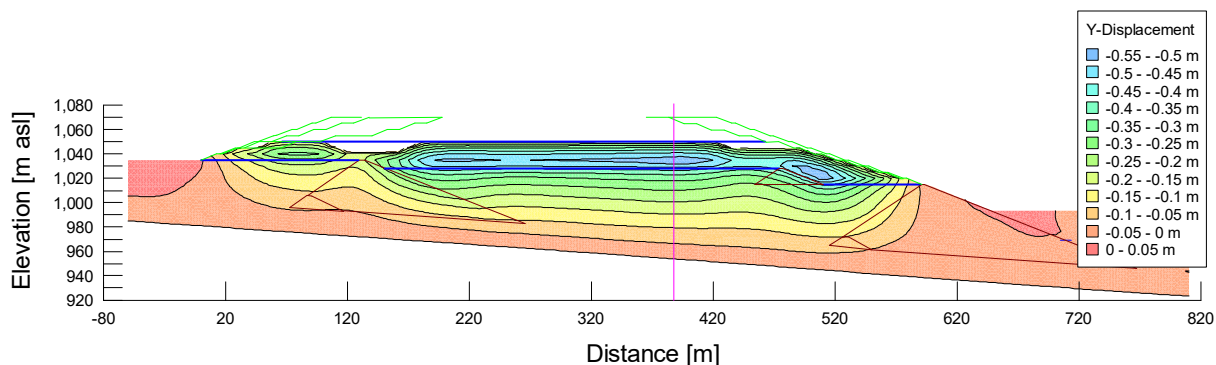


Сл. 3.3.1. Апроксимирана почетна состојба за порниот притисок во хидројаловиштата 1, 2 и 3-1

Градбата на насипот од сува јаловина во фаза 1-1 со времетраење од 2.05 години е моделирана во 7 етапи (или товарни инкременти) со времетраење од 9,226,341 сек, симулирани со 10 пресметковни чекори со експоненцијален временски прираст. Оваа анализа е направена со примена на консолидациска анализа на здружен механички и филтрационен одговор во временски домен, односно тип на анализа „Coupled Stress/PWP“. На крајот од оваа фаза се определени кумулативните вредности на хоризонталните и на вертикалните поместувања (слики 3.3.2 и 3.3.3), порниот притисок и ефективните нормални вертикални напрегања.



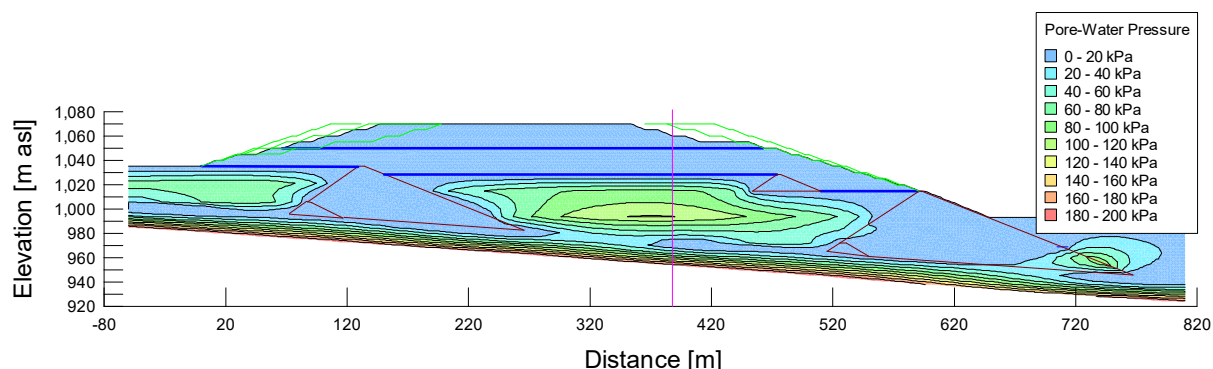
Сл. 3.3.2. Хоризонтални кумулативни поместувања на крај на фаза 1-1, во јаловиштата 1, 2 и 3-1



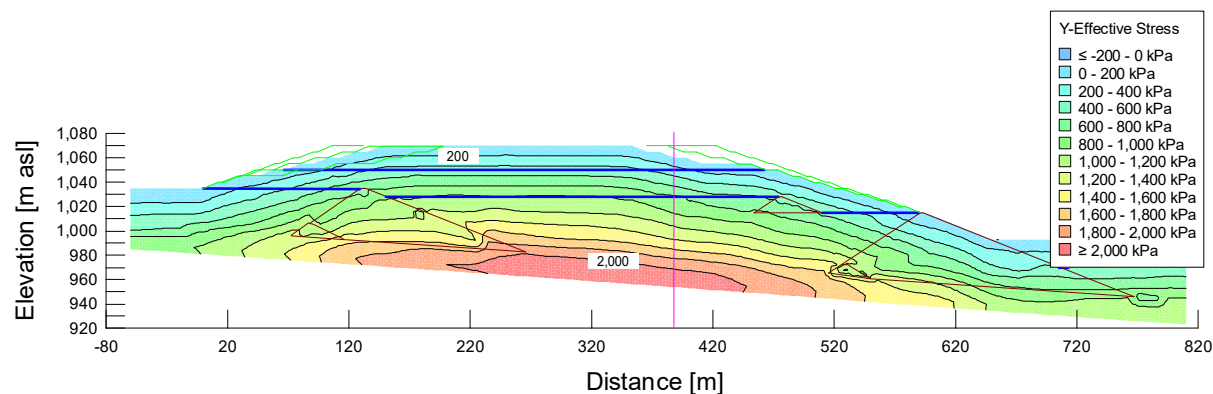
Сл. 3.3.3. Вертикални кумулативни поместувања на крај на фаза 1-1, во јаловиштата 1, 2 и 3-1

Завршно за фаза 1-1, проверена е стабилноста на узводната и низводната косина на насипот со сува јаловина, со метод на конечни елементи (МКЕ), односно со реализирани напрегање од анализа на состојбата на напрегања и деформации. Порастот на стабилноста со дисипацијата на порниот притисок во последната етапа од фаза 1-1 е следна: за низводна косина од 1.429 на 1.437, и за узводна косина од 1.341 на 1.414.

По симулирање на градбата од фаза 1-1, моделирани се фазите 1-2 со времетраење од 0.59 години и 2 со времетраење од 3.49 години, кои не се видливи во моделот за надолжниот пресек. Градбата на насипот од сува јаловина во фаза 3 со времетраење од 3.87 години е моделирана во 6 етапи (или товарни инкременти) со времетраење од 20,336,977 sec, симулирани со 10 пресметковни чекори со експоненцијален временски прираст. На крајот од оваа фаза се определени кумулативните вредности на хоризонталните и вертикалните поместувања, порниот притисок (слика 3.3.4) и ефективните нормални вертикални напрегања (слика 3.3.5).



Сл. 3.3.4. Порен притисок на крај на фаза 3, во хидројаловиштата 1, 2 и 3-1



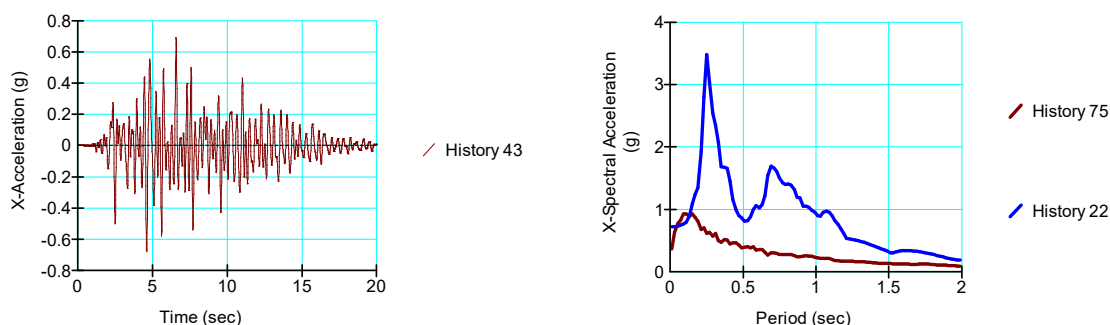
Сл. 3.3.5. Ефективни нормални вертикални напрегања на крај на фаза 3, во јаловишта 1, 2 и 3-1

Порастот на стабилноста (изразен преку факторот на сигурност против лизгање на косината), со дисипацијата на порниот притисок во последната етапа од фаза 3 е следен: за низводна косина од 1.379 на 1.383, и за узводна косина од 1.323 на 1.330.

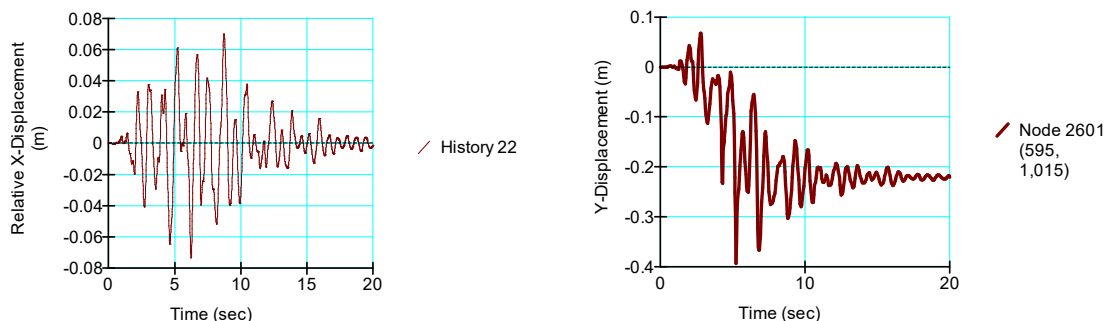
3.4 РЕЗУЛТАТИ ОД ДИНАМИЧКАТА АНАЛИЗА

Изборот на параметрите на проектните земјотреси и усвојувањето на динамичките параметри се преземени од соодветна сеизмолошка подлога (ИЗИИС - Скопје, 2020.10). Вообичаената процедура за анализа на динамичкиот одговор на насипни брани за водни акумулации е таа да се спроведи со барем три различни акцелерограми, за два нивоа на сеизмичка побуда: (1) основен оперативен земјотрес - OBE (Operating Basis Earthquake) и (2) земјотрес за проценка на сигурноста - SEE (Safety Evaluation Earthquake). Во предметната анализа на насип со суво одлагање, каде што со евентуално оштетување во круната на истиот, нема опасност од нагло и неконтролирано празнење на езеро, усвоена е поедноставена процедура, со по еден синтетички акцелерограм за три нивоа на побуди, каде што, всушност, во анализите е додаден и основен проектен земјотрес - DBE (Design Basis Earthquake), со период на повторување $T = 475$ години, кој се користи за значајни градежни објекти кои не предизвикуваат потенцијална опасност за околината.

Динамичкиот одговор на геосредината, во тек на SEE со $PGA = 0.36\text{ g}$ и $PGA_y = 0.25\text{ g}$, времетраење од $t = 20\text{ s}$, со синтетички акцелерограм T=10,000_1, е даден на [сликите 3.4.\(1,2\)](#). Визуелната контрола дека динамичкиот одговор е коректен е дијаграмот на релативните хоризонтални поместувања. Трајното вертикално поместување, предизвикано од инерцијалните сили во текот на побудата, кое е меродавно за процена на сеизмичката отпорност на браната 2-1 со круна на 1,015 м.н.в. е слегнувањето во круната и изнесува 22 см.



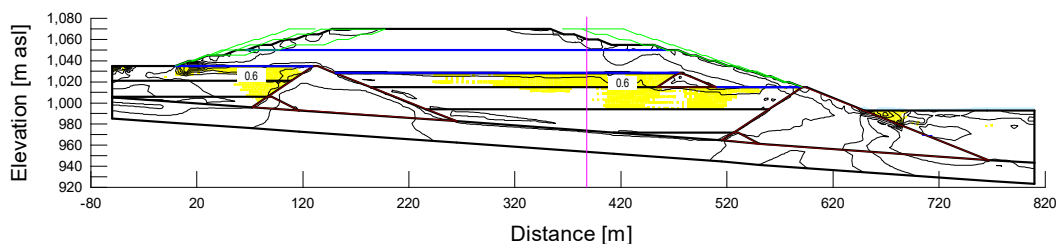
Сл. 3.4.1. Апсолутни забрзувања $a[g] \div t[s]$ во хоризонтален правец, низводна круна на насип од сува јаловина (лево). Спектар на одговор на забрзувања $S_a[g] \div T[s]$ за $DR = 0.05$, во карпестата основа (побуда) и во круната на брана 2-1 (одговор) (десно)



Сл. 3.4.2. Релативни поместувања, хоризонтални $x[m] \div t[s]$, во круната на браната 2-1 (лево). Перманентни вертикални поместувања, по метод на динамичка деформација, $Y[m] \div t[s]$, во круна на брана 2-1 (десно)

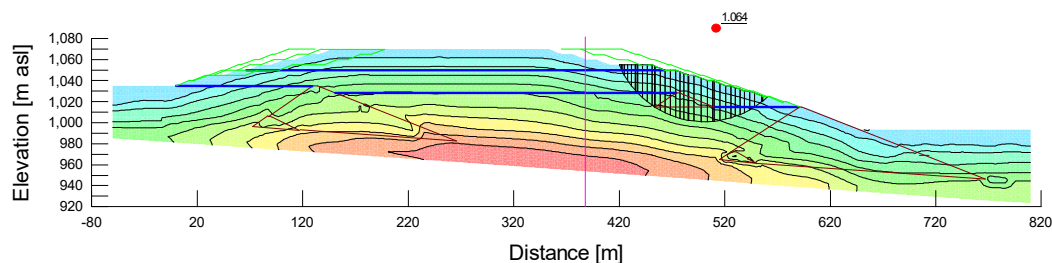
За време на земјотресот доаѓа до пораст на порниот притисок, со што се создава зона со ликвифакција после дејство на земјотресот ([слика 3.4.5](#)). Појавата на ликвифакција ќе предизвика

редистрибуција на ефективните напрегања, која ќе резултира со постземјотресни поместувања во геосредината.



Сл. 3.4.5. Распределба на коефициентот q/p' [-] со ликвидифицирана зона, за состојба на напрегања на крај од дејството на земјотресот

Во продолжение е дадена критичната површина на лизгање за низводната косина во постземјотресна фаза (слика 3.4.6).



Сл. 3.4.6. Критична површина на лизгање за низводна косина, во постземјотресна фаза

4. ЗАКЛУЧОК

Од прегледот на резултатите цениме дека статичката и динамичката стабилност на насипот со суво одлагање со дефинираната форма (големини на берми на соодветните коти) се задоволени, при што ги истакнуваме следните заклучоци:

1. Изведбата на двете потфази 1-1 и 1-2 мора да се реализира во една фаза 1, со насипување во хоризонтални слоеви зашто издвоена изведба на фаза 1-1 нема задоволителна привремена стабилност на левата косина.
2. Доколку при градба на споените фази 1-1 и 1-2 (односно фаза 1) се забележи привремена нестабилност кон десната косина, тогаш истовремено да се насипуваат фазите 1 и 2.
3. Псевдостатичката стабилност при дејство на силен земјотрес не е задоволена за ниту една косина (низводна, узводна и лева) на насипот со сува јаловина. Затоа, сеизмичката отпорност на геосредината мора да биде истражена и потврдена со динамичка анализа во временски домен со земање предвид на феноменот на ликвидација.
4. Максималното забрзување во круната на 1,015 м.н.в. на браната 2-1 (определено со анализа на надолжниот пресек) е 0.23 g (за OBE), 0.41 g (за DBE) и 0.70 g (за SEE).
5. Максималното забрзување во круната на 1,070 м.н.в. на насипот од суво одлагање (определено со анализа на напречниот пресек) е 0.22 g (за OBE), 0.40 g (за DBE) и 0.45 g (за SEE).
6. Трајното вертикално поместување, предизвикано од инерцијалните сили во текот на побудата, кое е меродавно за процена на сеизмичката отпорност на браната 2-1 со круна на 1,015 м.н.в. (определено со анализа на надолжниот пресек) е слегнувањето во круната, и изнесува 0 cm (за OBE), 0 cm (за DBE) и 22 cm (за SEE),
7. Со динамичкиот одговор на репрезентативните пресеци (надолжен и напречен), за ниво на сеизмичка побуда OBE со $PGA = 0.07$ g со период на повторување $T = 145$ години доаѓа до ликвидација во таложните езера Саса 1 и Саса 2.

8. Минималните вредности на коефициентот на сигурност во постземјотресната фаза (определено со анализа на надолжниот пресек) се $F_s = 1.064 \leq F = 1.1$ (за низводната косина) и $F_s = 1.237 > F = 1.1$ (за узводната косина) за OBE, DBE и SEE.

5. КОРИСТЕНА ЛИТЕРАТУРА

1. DIPKO, Skopje, 2020-11-25, The Geotechnical Investigation Report from SPT and CPTu performed at Sasa tailings dams, Jovan B. Papic (responsible researcher)
2. Knight Piésold, London, 2021-05-12, File No.: LO501-00057/05-03, CPT ground investigation on TSF 1 and TSF 2 at the Sasa Lead and Zinc Mine in North Macedonia, Joel Slater (responsible researcher)
3. 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
4. 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
5. 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
6. 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,
7. Геинг - Скопје, 2018-09-12, Основен проект за надвишување на ретензиона и песочна брана од 986.5 мнв до 1,000.0 мнв на хидројаловиште Тораница - К. Паланка, оговорен проектант Наталија Алтановска Божиновска
8. Геинг КуК - Скопје, 2020.09.29. Елаборат од дополнителни геотехнички истражни работи и лабораториски испитувања на Хидројаловиште 2 – Рудник САСА, С.Георгиевски (одговорен истражувач)
9. Градежен факултет – Скопје, 2018.09, Иновирана анализа на сеизмичката отпорност на јаловиштето Тополница, за променлива кота на нормално ниво во езерото од 649.0 до 652.0 мнв, со проценка за складирање на максимална количина јаловина во езерото, (Анекс бр. 4 на Изведбениот проект на јаловиштето Тополница, Бучим, со круна 654.0 мнв), Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други
10. Градежен факултет – Скопје, 2019.07.23, Техничко решение за суво одлагање на јаловина над таложните езера, со прелиминарна проценка на стабилноста на јаловишните брани на рудникот Саса, М. Каменица, Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други
11. Градежен факултет – Скопје, 2020.06.26, Идејно решение за дополнителен волумен за суво одлагање на јаловина кај хидројаловиштата 2 и 3-2 на рудникот Саса, М. Каменица, Љ.Петковски, (Одговорен проектант), и други
12. ДИПКО – Скопје, 2021.09.27, Основен проект за суво одлагање над јаловиште 2 и дел над јаловиште 1 на рудникот Саса, М. Каменица, Книга 2. Статичка анализа на суво одлагање над јаловиште 2, Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
13. ДИПКО – Скопје, 2021.09.28, Основен проект за суво одлагање над јаловиште 2 и дел над јаловиште 1 на рудникот Саса, М. Каменица, Книга 3. Динамичка анализа на суво одлагање над јаловиште 2, Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
14. 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), Љ.Петковски (одговорен проектант) и други
15. ИЗИИС - Скопје, 2020.10, Студија за сеизмички hazard за профилот САСА-2, Извештај 2020-59, Д.Дојчиноски (Одговорен проектант) и други