

UNIVERZITET U BEOGRADU
RUDARSKO-GEOLOŠKI FAKULTET

Dragana D. Nišić

**RAZVOJ MODELA ZA PROCENU RIZIKA
NA DEPONIJAMA INDUSTRIJSKOG
OTPADA MINERALNOG POREKLA**

Doktorska disertacija

Beograd, 2018

UNIVERSITY OF BELGRADE
FACULTY OF MINING AND GEOLOGY

Dragana D. Nišić

**THE DEVELOPMENT OF A RISK
ASSESSMENT MODEL FOR
INDUSTRIAL MINERAL WASTE
DISPOSAL FACILITIES**

Doctoral Dissertation

Belgrade, 2018

Mentor:

Dr Nikola Lilić, redovni profesor

Zaštita na radu i zaštita životne sredine

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Članovi komisije:

Dr Dinko Knežević, redovni profesor

Zaštita na radu i zaštita životne sredine

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Ranka Stanković, vanredni profesor

Matematika i informatika

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Igor Miljanović, redovni profesor,

Računarstvo i sistemsko inženjerstvo

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet

Dr Marko Ivetić, redovni profesor u penziji

Mehanika fluida i hidraulika

Univerzitet u Beogradu, Građevinski fakultet

Ova doktorska disertacija je nastala kao rezultat projekta tehnološkog razvoja TR33039 „Unapređenje tehnologije površinske eksploatacije lignita u cilju povećanja energetske efikasnosti, sigurnosti i zaštite na radu“.

RAZVOJ MODELA ZA PROCENU RIZIKA DEPONIJA INDUSTRIJSKOG OTPADA MINERALNOG POREKLA

REZIME

Deponije industrijskog otpada mineralnog porekla spadaju među najveće geotehničke građevine na svetu, pa upravljanje njihovim rizikom tokom čitavog eksploatacionog veka predstavlja izazov. Učestali udesi na deponijama godinama unazad svedoče o tome da je njihov rizik u konstantnom porastu. Uprkos tome, u svetskoj literaturi rizik ovih objekata je površno analiziran uz često poistovećivanje sa akumulacijama vode.

Istraživanja u ovom radu se zasnivaju na razvoju modela za procenu rizika, namenjenom, u prvom redu, deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla, uz svest o jasnim razlikama između reoloških karakteristika mešavine čvrste i tečne faze i samo tečne faze. Razmotreni su osnovni aspekti ranjivosti deponija, a na osnovu zabeleženih udesnih situacija iz prošlosti, definisane smernice za prognoziranje najčešćih scenarija udesa koji se mogu dogoditi. Predložene su procedure za pretpostavljanje najbitnijih karakteristika poplavnog talasa, kao i alati za procenu posledica.

Cilj disertacije je da se razvije model za procenu rizika, lak za upotrebu, a ipak dovoljno detaljan u analiziranju stabilnosti deponije da bi dao realne rezultate, koji se lako tumače. U disertaciji se potvrdila hipoteza da se deponije i akumulacije vode ne mogu tretirati istovetno prilikom procene rizika, kao i da je različito ponašanje različitih otpada, u slučaju narušavanja stabilnosti deponija i isticanja materijala u okruženje.

Model je testiran na konkretnim primerima, flotacijskom jalovištu „Veliki Krivelj“ i deponiji pepela i šljake termoelektrane „Nikola Tesla B“, kako bi se potvrdila primenjivost razvijenog modela. Razmatrane deponije, po svojoj veličini i značaju za privredu Srbije, zavređuju posebnu pažnju i realističnu procenu rizika. Na bazi preliminarne analize rizičnosti ova dva objekta, flotacijsko jalovište rudnika bakra „Veliki Krivelj“ u ovom trenutku predstavlja visokorizičan objekat, nasuprot deponiji pepela i šljake termoelektrane „Nikola Tesla B“, koja je stabilan objekat, a čiji nivo rizičnosti je mali. Testiranjem modela za procenu rizičnosti na ova dva ekstremna objekta

pokazan je opseg u kojem razvijeni model može raditi. Validacija razvijenog modela urađena je poređenjem sa rezultatima procene rizika po jednostavnom, kvalitativnom modelu, zasnovanom na analizi stabilnosti deponije, i ICOLD-ovom pristupu za procenu rizika. Dobijene vrednosti, odnosno, trendovi potvrđuju da razvijeni model daje realnu procenu stabilnosti deponije i ugroženosti okruženja.

Ideja vodilja, koja se proteže kroz model razvijen u ovoj doktorskoj disertaciji, je da rizik treba razumeti, a procenu uraditi tako da vlasnika upozori na moguće udes i očekivane posledice, a ne da ga uplaši, pa da u strahu od nepoznatog i nerazumljivog, nasumice preduzima zaštitne mere. Njegov efekat se ogleda u postignutim visokom nivou sigurnosti deponije i stvaranju uslova za efikasan plan delovanja u slučaju udesa.

Ključne reči: rizik, model za procenu rizika, deponija, akumulacija vode, nasip, stabilnost, poplavni talas, udes, posledice, verovatnoća

Naučna oblast:

Rudarsko inženjerstvo

Uža naučna oblast:

Zaštita na radu i zaštita životne sredine

UDK:

005.334:62-9

338.45:502/504:004

517.5:519.2/.87.628.54

622/.2/.765

624.13:628.4

65.012:669

(043.3)

THE DEVELOPMENT OF A RISK ASSESSMENT MODEL FOR INDUSTRIAL MINERAL WASTE DISPOSAL FACILITIES

Abstract

Industrial mineral waste disposal facilities are among the largest geotechnical structures in the world and management of their risk is a challenge throughout the entire lifecycle. Frequent failures have been testifying for years on their constantly increasing risk. Nevertheless, in world literature, the risk of these objects is superficially analyzed with common practice to treat waste disposal facilities and water accumulations equal.

The research in this dissertation is based on the development of a risk assessment model, designed primarily for industrial mineral waste disposal facilities, with the awareness of clear differences between the rheological properties of solid-liquid mixture and liquid phase. Basic aspects of the vulnerability of waste disposal facilities have been considered, and the guidelines for prediction of the most common failures scenarios have been defined, based on the recorded failures in the past. Procedures for assuming the most important characteristics of the flood wave were proposed, as well as the tools for the estimation of consequences.

The aim of the dissertation is to develop a risk assessment model that is easy to use, yet sufficiently detailed in the stability analysis of the waste disposal facility, so it can give realistic results, which can be easily interpreted. The hypothesis have been confirmed in this dissertation. Waste disposal facilities and water accumulations can not be treated in the same way when assessing the risk, as well as different types of waste behave differently, in case of stability disturbance of the waste disposal facilities and material discharge into the environment.

The model was tested on concrete examples of the waste disposal facilities, the flotation tailings disposal facility "Veliki Krivelj" and the thermal power plant "Nikola Tesla B" ash disposal facility, in order to confirm the applicability of the model. The considered disposal facilities, by their size and importance for the economy of Serbia, deserve special attention and realistic risk assessment. Based on the preliminary risk analysis of these two facilities, the flotation tailings disposal facility "Veliki Krivelj" is a high-risk object at the

moment, opposite to the thermal power plant "Nikola Tesla B" ash disposal facility, which is a stable object, and whose risk level is low. Model testing on these two extreme objects demonstrated the extent to which developed model can work. Validation of the developed model was done by comparing the results of risk assessment with a simple, qualitative model, based on the waste disposal facility stability analysis, and with ICOLD risk assessment approach. The obtained results and trends confirm that the developed model provides a realistic assessment of the waste disposal facility stability and vulnerability of the environment.

The guiding idea, which extends through the model developed in this doctoral dissertation, is that the risk should be understood, and the assessment should be done to warn the owner of the possible failures and expected consequences, not to scare and encourage him to take protective measures randomly, in the fear of an unknown and incomprehensible. Its impact is reflected in the achieved high level of waste disposal facility safety and the creation of conditions for an effective emergency response plan.

Key words: risk, risk assessment model, waste disposal facilities, water accumulation, embankment, stability, flood wave, failure, consequences, probability

Scientific field:

Mining Engineering

Scientific subfield:

Environmental and Safety Engineering

UDC:

005.334:62-9

338.45:502/504:004

517.5:519.2/.87.628.54

622/.2/.765

624.13:628.4

65.012:669

(043.3)

Sadržaj:

1. UVOD.....	1
1.1. Predmet i cilj istraživanja	2
1.2. Naučne hipoteze istraživanja	4
1.3. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja	5
2. PREGLED LITERATURE	7
2.1. Teorijske osnove rizika	7
2.2. Procena rizika	8
2.3. Tehnike za procenu rizika.....	13
2.4. Deponije industrijskog otpada mineralnog porekla kao rizični objekti	19
2.5. Pregled dosadašnjih istraživanja	24
2.6. Razlike između deponija kao akumulacija vode i kao akumulacija čvrste i tečne faze.....	30
2.7. Sistemi za klasifikaciju deponija prema rizičnosti.....	35
3. UDESI NA DEPONIJAMA INDUSTRIJSKOG OTPADA MINERALNOG POREKLA.....	44
3.1. Lekcije naučene iz zabeleženih udesa na deponijama	46
3.2. Scenario udesa	49
3.2.1. Nivo održavanosti deponije.....	57
3.2.2. Potencijal likvefakcije	60
3.2.3. Seizmički hazard	70
3.2.4. Potencijal plavljenja	71
3.2.5. Otpornost na eroziju	74
3.3. Procena verovatnoće udesa	75
3.3.1. Procena godišnje verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti kosina	76

3.3.2. Procena ukupne verovatnoće udesa.....	81
4. POSLEDICE UDESA	84
4.1. Analiza poplavnog talasa	85
4.1.1. Faktori koji utiču na tok materijala	86
4.1.2. Mehanizam tečenja.....	96
4.1.3. Tip toka	97
4.1.4. Modeliranje poplavnog talasa	100
4.1.4.1. Količina isteklog materijala.....	101
4.1.4.1.1. Princip „1/3“	102
4.1.4.1.2. Princip „65% čvrstog“	109
4.1.4.1.3. Predloženi princip „faznog isticanja“	111
4.1.4.2. Rastojanje koje pređe istekli materijal.....	117
4.1.4.3. Ostale karakteristike poplavnog talasa	122
4.2. Procena posledica	122
4.2.1. Procena broja ljudskih žrtava	122
4.2.2. Procena ekonomskih posledica	127
4.2.3. Procena ekoloških posledica	133
4.2.4. Ukupna značajnost posledica	135
5. MODEL ZA PROCENU RIZIKA NA DEPONIJAMA INDUSTRIJSKOG OTPADA MINERALNOG POREKLA	138
6. STUDIJE SLUČAJA	149
6.1. Procena rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta “Veliki Krivelj” u Boru	149
6.1.1. Scenario udesa.....	153
6.1.1.1. Udes usled likvefakcije.....	153
6.1.1.2. Udes po scenariju seizmičke nestabilnosti	155
6.1.1.3. Udes po scenariju preliivanja	157

6.1.1.4. Udes po scenariju statičke nestabilnosti	158
6.1.1.5. Udes po scenariju unutrašnje erozije	160
6.1.2. Procena posledica	160
6.1.2.1. Procena količine isteklog materijala	161
6.1.2.2. Procena rastojanja	161
6.1.2.3. Broj ljudskih žrtava	164
6.1.2.4. Ekološke posledice	167
6.1.2.5. Ukupna značajnost posledica	169
6.1.3. Analiza i vrednovanje rizika	171
6.2. Procena rizika eksploatacije deponije pepela i šljake “Nikola Tesla B” u Obrenovcu	173
6.2.1. Scenario udesa	175
6.2.1.1. Udes usled likvefakcije	175
6.2.1.2. Udes po scenariju seizmičke nestabilnosti	176
6.2.1.3. Udes po scenariju prelivanja	178
6.2.1.4. Udes po scenariju statičke nestabilnosti	179
6.2.1.5. Udes po scenariju unutrašnje erozije	180
6.2.2. Procena posledica	181
6.2.2.1. Procena količine isteklog materijala	181
6.2.2.2. Procena rastojanja	181
6.2.2.3. Broj ljudskih žrtava	183
6.2.2.4. Procena ekonomskih posledica	184
6.2.2.5. Ekološke posledice	184
6.2.2.6. Ukupna značajnost posledica	185
6.2.3. Analiza i vrednovanje rizika	188

7. DISKUSIJA I VALIDACIJA RAZVIJENOG MODELA	190
8. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJI RAD	197
9. LITERATURA	202
BIOGRAFIJA.....	221

Spisak slika:

Slika 1. Struktura doktorske disertacije	5
Slika 2. Rizik kao funkcija verovatnoće i posledica.....	8
Slika 3. Proces procene rizika sa ključnim koracima i njihovim ishodima [14]	8
Slika 4. Prihvatljivost rizika, tzv. „šargarepa“ dijagram [24].....	12
Slika 5. Stablo događaja [30].....	15
Slika 6. Stablo otkaza [31].....	16
Slika 7. Procena rizika pomoću FMEA tehnike [32].....	17
Slika 8. Matrica rizika oblika 5x5 [13].....	18
Slika 9. Metode nadgradnje deponije: a) nastupna metoda, b) metoda centralne linije, c) odstupna metoda.....	21
Slika 10. Glavni elementi procene rizika na deponijama industrijskog otpada [52].....	26
Slika 11. Primer dijagrama za probablističku procenu rizika [54].....	28
Slika 12. Ključni rizici koji utiču na stabilnost deponije [55].....	29
Slika 13. Uprošćena skica deponije industrijskog otpada (gore) i brane za akumulaciju vode (dole).....	30
Slika 14. Proboj nasipa i isticanje akumuliranog materijala kod deponija (levo) i brana za akumulaciju vode (desno).....	34
Slika 15. Podela na male i visoke brane i kategorije opasnosti, modifikovano prema [68, 69].....	40
Slika 16. Šema razvoja breše u nasipu [110].....	55
Slika 17. Predložene kategorije erodibilnosti materijala [111]	56
Slika 18. Materijal u deponiji u normalnom stanju (a) i napregnutom stanju (b) [127].	61
Slika 19. Prikaz udesa usled likvefakcije i drugih udesa u zavisnosti od napona smicanja i otpora na penetraciju [128].....	61
Slika 20. Likvefakcijska čvrstoća smicanja.....	62

Slika 21. Skrining likvefakcije prema „Kineskom kriterijumu“ [145, 146].....	64
Slika 22. Modifikovani „Kineski kriterijum“ [147]	65
Slika 23. Procena podložnosti likvefakciji [148]	66
Slika 24. Postupak za skrining likvefakcije [150]	67
Slika 25. „Japanski kriterijum“ za utvrđivanje likvefabilnosti materijala u zavisnosti od granulometrijskog sastava i uniformnosti zrna [151, 152]: (a) kada je $Cu < 3,5$; (b) kada je $Cu > 3,5$	68
Slika 26. Bilans voda na hidrauličkoj deponiji [34, 166]	72
Slika 27. Povezanost udesa usled nekontrolisanja vode u deponiji.....	73
Slika 28. Funkcionalna zavisnost faktora sigurnosti i godišnje verovatnoće udesa, modifikovano prema [118]	78
Slika 29. Venov dijagram za procenu gornje granice ukupne verovatnoće [174].....	82
Slika 30. Količine isteklog materijala prema zabeleženim ljudskim gubicima prilikom udesa na deponijama industrijskog otpada [80]	84
Slika 31. Reološki modeli fluida [188, 189, 191, 192, 193].....	89
Slika 32. Vrednosti napona tečenja/smicanja u zavisnosti od koncentracije otpada, modifikovano prema [199]	91
Slika 33. Napon tečenja/smicanja različitih vrsta otpada, modifikovano prema [193]..	92
Slika 34. Presek kroz flotacijsko jalovište, jalovina iz procesa koncentracije sulfidnih minerala, modifikovano prema [90]	94
Slika 35. Promena tipa toka u zavisnosti od napona tečenja i udela čvrstog u hidromešavini, modifikovano prema [195]	98
Slika 36. Mehanizma tečenja i tip toka materijala u zavisnosti od potencijala likvefakcije i taložnog jezera, sublimirana razmatranja prema [210, 211]	99
Slika 37. Zone koje se mogu izdvojiti pri modeliranju poplavnog talasa	101
Slika 38. Procentualno istekle količine otpada u odnosu na deponovane količine prema veličini deponije	108

Slika 39. Odnos između zapremine taložnog jezera i zapremine isteklog materijala [211]	109
Slika 40. Slojevi otpada u deponiji.....	112
Slika 41. Uporedni prikaz isteklih količina hidromešavine u odnosu na ukupno odložene količine prema različitim principima.....	116
Slika 42. Maksimalno rastojanje poplavnog talasa pri visini nasipa 50 m i nagibu terena 1% prema alatu „Tailings Flow Slide Calculator“ [222].....	119
Slika 43. Rastojanje poplavnog talasa	120
Slika 44. Raspodela vremena u procesu evakuacije ugroženog ljudstva [232].....	125
Slika 45. Krive za različite upotrebne svrhe zemljišta u Nemačkoj [235]	129
Slika 46. Dijagram aktivnosti prema Leopoldovoj matrici [244].....	134
Slika 47. Procena rizika eksploatacije deponija industrijskog otpada.....	139
Slika 48. Brzina i vreme manifestovanja udesa na deponijama	140
Slika 49. Potencijal likvefakcije: A) ček-lista, B) modeli zasnovani na IP, w i LL C) „Japanski kriterijum“	142
Slika 50. Mehanizam tečenja materijala.....	144
Slika 51. Predlog načina razmatranja količina isteklog materijala kod deponija kapaciteta >10 Mm ³	145
Slika 52. Pojednostavljen model rastojanja istekle hidromešavine, modifikovano prema [223]	145
Slika 53. Princip usvajanja ljudskih žrtava prema Grejemovoj metodi	146
Slika 54. Model za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla	147
Slika 55. Hijerarhija koraka prilikom procene rizika prema razvijenom modelu	148
Slika 56. Flotacijsko jalovište „Veliki Krivelj“ sa okolinom	150
Slika 57. Specifične pojave na spoljašnjoj kosini brane 1: (A) bujna trava u vlažnoj zoni, (B) jaruga nastala tečenjem vode koja izbija usled nefunkcionisanja drenaže.....	152

Slika 58. Oštećeni deo kanala za gravitacijski transport pulpe	152
Slika 59. Raspored uzoraka iz brane 1A.....	154
Slika 60. Skrining potencijala likvefakcije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“: ček- lista (levo), „Japanski kriterijum” (desno).....	155
Slika 61. Seizmički hazard u u regionu flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ za povratni period od 475 godina [162]	156
Slika 62. Polje 1 flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ sa profilima na kojima je urađen proračun stabilnosti za statička i dinamička opterećenja [246].....	156
Slika 63. Epicentri najvećih zemljotresa u okolini flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ u periodu od 1456-2012. god. [253].....	157
Slika 64. Godišnja verovatnoća prema faktorima sigurnosti za branu 1A prema metodi predloženoj u [118].....	159
Slika 65. Udaljenost taložnog jezera od brane 1A.....	160
Slika 66. Rastojanje koje pređe poplavni talas u slučaju udesa na flotacijskom jalovištu „Veliki Krivelj”: do Kriveljske reke (A), kad istekne kompletna procenjena količina materijala (B).....	163
Slika 67. Zona opasnosti u slučaju flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj.....	164
Slika 68. Model rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“	170
Slika 69. Analiza rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ uz pomoć matrice 7x7171	
Slika 70. Vrednovanje rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ uz pomoć ALARP pristupa i “šargarepa” dijagrama	172
Slika 71. Skica lokacije deponije „TENT B“ sa okolinom.....	174
Slika 72. Skrining potencijala likvefakcije deponije pepela i šljake “TENT B”: a) ček- lista, b) test prema [150], c) „Japanski kriterijum“.....	176
Slika 73. Seizmički hazard u regionu deponije „TENT B“ za povratni period od 95 godina [162]	177
Slika 74. Položaj profila na kojima je rađen proračun stabilnosti u slučaju deponije „TENT B“ [260].....	177

Slika 75. Epicentri najvećih zemljotresa u okolini deponije „TENT B“ u periodu od 1456-2012. god. [253]	178
Slika 76. Godišnja verovatnoća prema faktorima sigurnosti za deponiju „TENT B” prema metodi predloženoj u [118].....	180
Slika 77. Rastojanje koje pređe poplavni talas u slučaju udesa na deponiji „TENT B“	183
Slika 78. Model rizika deponije pepela i šljake „TENT B”	187
Slika 79. Analiza rizika deponije “TENT B” uz pomoć matrice 7x7.....	188
Slika 80. Vrednovanje rizika eksploatacije deponije pepela i šljake “TENT B” uz pomoć ALARP pristupa i “šargarepa”	189
Slika 81. Objedinjeni rezultati na „šargarepa” dijagramu	195

Spisak tabela:

Tabela 1. Primenljivost tehnika za procenu rizika, preuzeto od [15].....	14
Tabela 2. Matrica za procenu rizika na deponijama.....	27
Tabela 3. Osnovne razlike između deponija i brana, modifikovano prema [57].....	31
Tabela 4. Pregled zemalja koje imaju uspostavljen sistem klasifikacije deponija rudarskog otpada [64].....	36
Tabela 5. Klasifikacija deponija prema potencijalnoj opasnosti po okolinu [63]	37
Tabela 6. Klasifikacija deponija prema veličini, modifikovano prema [67].....	38
Tabela 7. Klasifikacija brana prema potencijalnoj kategoriji opasnosti [69]	39
Tabela 8. Parametri koji učestvuju u proceni rizika kod visokih brana [70].....	40
Tabela 9. Klasa rizika [70]	40
Tabela 10. Utvrđivanje nivoa štete [71]	42
Tabela 11. Utvrđivanje potencijalnog uticaja [71]	43
Tabela 12. Kategorije udesa [47, 76].....	45
Tabela 13. Mogući poremećaji i udesi na deponiji industrijskog otpada, modifikovano prema [34].....	57
Tabela 14. Faktor sigurnosti [113]	59
Tabela 15. Modifikovane minimalne vrednosti faktora sigurnosti [122].....	60
Tabela 16. Tumačenje uticaja zemljotresa različitih jačina na deponije, modifikovano prema [164].....	71
Tabela 17. Ocenjivanje stabilnosti objekata i predložene kategorije objekata prema [118], dopunjeno prema [179].....	79
Tabela 18. Tumačenje godišnje verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti kosina	81
Tabela 19. Kvalitativni opis verovatnoće [181]	83
Tabela 20. Modifikovana reološka klasifikacija tokova hidromešavine prema [195] ...	97
Tabela 21. Pretpostavke o količini isteklog materijala.....	102

Tabela 22. Udesi koji su razmatrani prilikom procene količine isteklog materijala [47]	103
Tabela 23. Udesi na deponijama grube flotacijske jalovine	105
Tabela 24. Udesi na deponijama fine flotacijske jalovine	106
Tabela 25. Ukupne količine flotacijske jalovine obojenih metala	106
Tabela 26. Udesi na deponijama mulja od prerade rude Fe	107
Tabela 27. Udesi na deponijama pepela i šljake	108
Tabela 28. Proračun prema principu „65% Č“ [211]	110
Tabela 29. Uporedni proračun količina istekle hidromešavine, dopunjeno na osnovu razmatranja prema [203]	115
Tabela 30. Uticaj određenih parametara na karakteristike talasa [220]	118
Tabela 31. Karakteristike poplavnog talasa dobijene pomoću alata „Tailings Flow Slide Calculator“	119
Tabela 32. Predložene stope smrtnosti za proračun potencijalnih ljudskih žrtava u slučaju udesa [228]	123
Tabela 33. Podaci potrebni za proračun vremena upozorenja [228]	126
Tabela 34. Posledice po privredu [240]	131
Tabela 35. Posledice po društvenu stabilnost – ukupna materijalna šteta na kritičnoj infrastrukturi [240]	131
Tabela 36. Posledice po društvenu stabilnost – ukupna materijalna šteta na građevinama javnog društvenog značaja [240]	131
Tabela 37. Primer približnih jediničnih troškova izgradnje raznih kategorija građevina [241]	132
Tabela 38. Modifikovana Leopoldova matrica za procenu ekoloških posledica [244]	134
Tabela 39. Skale posledica	135
Tabela 40. Kategorije posledica zasnovane na populaciji izloženoj riziku prema ANCOLD-u [245]	136

Tabela 41. Predloženi pristup za utvrđivanje ukupne značajnosti posledica, zasnovan na ANCOLD-ovom pristupu	137
Tabela 42. Analizirani parametri na uzorcima iz brane 1A [246]	154
Tabela 43. Rezultati proračuna stabilnosti generalne kosine – dinamička opterećenja [246]	156
Tabela 44. Rezultati proračuna stabilnosti parcijalne kosine – dinamička opterećenja [246]	157
Tabela 45. Maksimalne dnevne padavine za različite verovatnoće pojave [248]	158
Tabela 46. Rezultati proračuna stabilnosti generalne kosine – statička opterećenja [246]	159
Tabela 47. Rezultati proračuna stabilnosti parcijalne kosine – statička opterećenja [246]	159
Tabela 48. Procena istekle količine materijala iz flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj”	161
Tabela 49. Ekološke posledice u slučaju udesa na flotacijskoj jalovištu „Veliki Krivelj“	168
Tabela 50. Ukupna značajnost posledica u slučaju udesa na flotacijskom jalovištu „Veliki Krivelj“	169
Tabela 51. Rekapitulacija parametara rizika usvojenih u slučaju flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“	171
Tabela 52. Rezultati proračuna stabilnosti deponije „TENT B“– dinamička opterećenja [260]	177
Tabela 53. Rezultati proračuna stabilnosti deponije „TENT B“ – statička opterećenja [260]	179
Tabela 54. Ekološke posledice u slučaju udesa na deponiji „TENT B“	185
Tabela 55. Ukupna značajnost posledica u slučaju udesa na deponiji „TENT B”	186
Tabela 56. Rekapitulacija usvojenih parametara rizika usvojenih u slučaju deponije “TENT B”	188

Tabela 57. Rekapitulacija parametara rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj” i „TENT B“	191
Tabela 58. Rezultati procene rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj” prema kvalitativnom i razvijenom modelu	192
Tabela 59. Rezultati procene rizika eksploatacije deponije pepela „TENT-B” prema kvalitativnom i razvijenom modelu	193
Tabela 60. Rezultati uporedna proceni rizika na analiziranim deponijama prema ICOLD-ovom pristupu [70] i razvijenom modelu	194

ZNAČENJE SKRAĆENICA

%Č.....	Masena koncentracija čvrste faze
ALARP.....	As Low as Reasonably Practicable (Nizak koliko je to realno izvodljivo)
ANCOLD.....	Australian National Committee on Large Dams (Australijski nacionalni komitet za visoke brane)
CDA.....	Canadian Dam Association (Kanadsko udruženje za brane)
CPT.....	Cone Penetration Test (Konusni penetracioni opit)
CSR.....	Cyclic Stress Ratio (Ciklični napon uzrokovan potresom)
CRR.....	Cyclic Resistance Ratio (Ciklični otpor na likvefakciju)
Č:T.....	Čvrsto:Tečno
EC.....	European Commission (Evropska komisija)
EMS.....	Evropska makroseizmička skala
EN.....	European Norm (Evropska norma)
EPA.....	Environmental Protection Agency (Agencija za zaštitu životne sredine)
FEMA.....	Federal Guidelines for Dam Safety (Federalno uputstvo za zaštitu brana)
FMEA.....	Failure Mode Effects Analysis (Analiza efekata scenarija udesa)
ICOLD.....	International Commission on Large Dams (Međunarodna komisija za visoke brane)
IP.....	Plasticity Index (Indeks plastičnosti)
ISO.....	International Organization for Standardization (Međunarodna organizacija za standardizaciju)
LL.....	Liquid Limit (Granica tečenja)
NZSOLD.....	New Zealand Society on Large Dams (Novozelandsko udruženje za visoke brane)
PATRICOVA.....	Prevención de Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana (Prevenција rizika od poplava u Valensiji)

PMF.....	Probable Maximum Flood (Verovatna maksimalna velika voda)
PMP.....	Probable Maximum Precipitation (Verovatne maksimalne padavine)
PRA.....	Probabilistic Risk Assessment (Probabilistička procena rizika)
RTB.....	Rudarsko-topioničarski basen
SAD.....	Sjedinjene Američke Države
SPANCOLD.....	Spanish National Committee on Large Dams (Španski nacionalni komitet za visoke brane)
SPT.....	Standard Penetration Test (Standardni penetracioni opit)
SRPS.....	Srpski standardi
TENT.....	Termoelektrana Nikola Tesla
U.S. EPA	United States Environmental Agency (Američka Agencija za zaštitu životne sredine)
UNEP.....	The United Nations Environment Programme (Program Ujedinjenih nacija za životnu sredinu)
USCOLD.....	US Committee on Large Dams (Američki komitet za visoke brane)
EU.....	Evropska unija
TE	Termoelektrana

1. UVOD

Priprema i prerada mineralnih sirovina, posebno metalčnih, odlikuje se ekstremno visokim učešćem nekorisnog proizvoda (jalovine, separacijskog mulja, pepela i šljake, gipsa, crvenog mulja), i do 99%, maseno. Kasnija valorizacija tog otpada je mala tako da je deponovanje osnovni vid zbrinjavanja ovoga otpada. Za prihvatanje velikih količina otpada potrebno je formirati i eksploatirati ekstremno velike deponije. Kako bi se sam proces valorizacije mineralne sirovine učinio isplativim, izgradnja deponija industrijskog otpada mineralnog porekla i njena eksploatacija teku uporedo, a za izradu nasipa obično se koriste frakcije, dobijene tehnološki jednostavnim i ekonomski jeftinim metodama, iz samog otpada.

Zbog svoje veličine, dugotrajne izgradnje nasipa bez mogućnosti da se kvalitet materijala ispituje pre ugradnje, a često i sa slabom kontrolom rada i velikim ekološkim opterećenjem (zbog mogućnosti da otpad sadrži opasne materije), deponije industrijskog otpada mineralnog porekla se apriori smatraju rizičnim i to breme nose tokom čitavog svog eksploatacionog veka, pa i nakon njega.

Uz svu svest o njihovom riziku i udesne situacije koje su zabeležene u prošlosti, u svetskoj literaturi rizik vezan za eksploataciju deponija industrijskog otpada mineralnog porekla nije dovoljno studiran i analiziran. Kako bi se smanjila odgovornost onoga ko vrši procenu, odnosno, kako bi se vlasnici i korisnici deponija učinili odgovornijim i usmerili da više i kontinuirano ulažu u održavanje i kontrolu svojih deponija, najčešće su te deponije poistovećivane sa akumulacijama vode. Pri tome je svesno zanemareno različito ponašanja mešavine tečne i čvrste faze u odnosu na samu tečnu fazu. Istovremeno su zanemarene bitne karakteristike formiranja deponija koje podrazumeva:

- faznu nadgradnju deponije, koja obezbeđuje parcijalnu konsolidaciju i stabilizaciju deponovanog otpada iz prethodnih faza, i
- postojanje plaže između nasipa (kojim se omeđuje deponija i kojim se sprečava nekontrolisano isticanje deponovane mase) i taložnog jezera (izbistrena voda, koja predstavlja potencijalnu energiju koja se plažom dovoljno udaljava od vodopropustljivog nasipa).

Mane ovakvog pristupa u proceni rizika eksploatacije deponija leže u tome što je rezultujući rizik u nekim segmentima potcenjen, a u drugim precenjen, shodno značajnim razlikama između ove dve vrste objekata. Potcenjen je prvenstveno u smislu ekoloških posledica, koje mogu biti većih razmera u slučaju udesa na deponijama u kojima je deponovan otpad sa toksičnim karakteristikama. Precenjen je u smislu količina i pređenog rastojanja isteklog materijala u slučaju proboja brane, jer je voda daleko fluidnija od otpada, pa veće količine isteknu i duže rastojanje pređu.

Bitan razlog nedostatka agilnosti na polju procene rizika deponija leži u negativnoj reputaciji deponija otpada. Generalno, deponije nisu društveno poželjni objekti i predstavljene su kao „nužno zlo“, bez kojih nema proizvodnje, ali od kojih nema direktne dobiti, već samo direktnog troška za investitora.

Transparentno saznanje o nivou rizika često ne ide u prilog vlasnicima deponija, pa se procene i obelodanjivanje rezultata izbegava, kako se opšteprihvaćena slika o deponijama ne bi dodatno pogoršavala. Ukoliko se procena rizika ne zahteva prema zakonskoj regulativi zemlje, kakav je slučaj u Srbiji, inicijativa se ne pokreće bez preke potrebe. Rizik neretko asocira na nešto opasno i loše.

Upravo zbog ovakvog činjeničnog stanja dešavali su se udesi na deponijama, jer zanemarivanje lošeg stanja i neprepoznavanje visokog rizika deponija ne motiviše na preduzimanje mera za sprečavanje udesa.

Dakle, može se zaključiti da je opšti stav prema proceni rizika kao korisnom procesu, važan za održavanje deponije u stabilnom stanju, jer cilj procene rizika nije da bilo koga uplaši, već da upozori vlasnika na potencijal pretnji koji deponija ima prema okruženju i razmere štete, ukoliko bi do udesa došlo.

1.1. Predmet i cilj istraživanja

Najčešći tip deponije industrijskog otpada mineralnog porekla je hidraulički tip, na kojoj se otpad odlaže u obliku hidromešavine. Razlog tome je što su mokri procesi prerade mineralnih sirovina efikasniji, pa se većina mineralnih sirovina prerađuje u vodenoj sredini. Pored toga što su mokre deponije češće, one su i rizičnije, jer je voda najznačajniji činilac stabilnosti deponije, te je i veličina rizika u velikoj meri funkcija kontrolisanja i

pravilnog upravljanja slobodnom vodom na deponiji. Shodno tome, u ovom radu je naglasak upravo na ovakvim deponijama.

Specifičnosti procene rizika deponija industrijskog otpada mineralnog porekla se ogledaju u tome što se ne može predvideti istovetno ponašanje poplavnog talasa formiranog od različitih vrsta otpada. Prvenstveno se misli na različitu fluidnost otpada u obliku hidromešavine, jer je fluidnost uslovljena sa više faktora, poput krupnoće i oblika čestica, hemijskog i mineralnog sastava, čvrstoće na smicanje, udela vode i tome slično.

U skladu sa svim navedenim, cilj istraživanja u doktorskoj disertaciji pod naslovom „Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla“ jeste razvoj modela za procenu rizika koji će uvažiti sve bitne specifičnosti otpada mineralnog porekla. Razvijeni model treba da omogućiti:

- analizu svih parametara rizika, i to:
 - scenarija potencijalnih udesa i njihovih verovatnoća,
 - posledica koje proističu iz udesa i njihove značajnosti, sa naglaskom na:
 - osnovne dimenzije poplavnog talasa, do čijeg bi formiranja došlo po najgorem mogućem scenariju,
 - potencijalne ljudske žrtve koje bi se našle na putu poplavnog talasa,
 - ekonomske i ekološke posledice po okruženje, i
- savremen sistem vrednovanja rizika i ocenu njegove prihvatljivosti u skladu sa unapred definisanim kriterijumima.

Svrha ovog modela je, dakle, da se postigne potrebni nivo sigurnosti, predvide i prouče udesne situacije kako bi se sačinio efikasniji plan delovanja, i samim tim, rizik koji eksploatacija deponije ima držao pod kontrolom i u prihvatljivim granicama.

Tokom realizacije uspostavljenih ciljeva potrebno je:

1. proučiti postojeće modele za procenu rizika,
2. jasno razlučiti deponije otpada od akumulacija vode,
3. osvrnuti se na zabeležene udesa na deponijama, u svetu i kod nas,
4. definisati scenarije udesa koje bi trebalo modelirati prilikom procene rizika,
5. definisati sistem vrednovanja verovatnoće potencijalnih udesa,

6. analizirati sve aspekte tečenja otpada u obliku hidromešavine,
7. definisati poredak za predviđanje dimenzija poplavnog talasa, u prvom redu količina isteklog materijala i rastojanja koje pređe,
8. predložiti adekvatnu proceduru za usvajanje potencijalnih ljudskih žrtava i predviđanje ekonomskih i ekoloških posledica koje se manifestuju prilikom udesa,
9. uspostaviti sistem vrednovanja težine posledica, i na kraju
10. oformiti model za procenu rizika, zasnovan na svim razmatranjima i analizama.

Model je zamišljen kao lako aplikativan okvir i obuhvatiće jasno definisane smernice za analizu svakog elementa u procesu procene rizika. Smernice će biti zasnovane na iskustvima iz prakse, procedurama sa širokom upotrebom, statističkim podacima i inženjerskoj logici. Njegova pristupačnost se ogleda u tome što bi svaki inženjer, uz adekvatne podatke potrebne za procenu, mogao da ga primeni, bez obaveznog iskustva sa procenom rizika. U potpunosti je u skladu sa opštim preporukama osnovnog standarda za menadžment rizikom ISO 31000:2015.

Model će se testirati na dva ekstremna primera:

- na primeru flotacijskog jalovišta rudnika bakra „Veliki Krivelj”, koje je prostorno velika i visoka deponija, u dolini uređenog vodotoka, neposredno uz površinski kop, sa nekoliko zabeleženih udesa u eksploatacij, koje ima potencijalno visok nivo rizičnosti, i
- na primeru deponije pepela i šljake termoelektrane „Nikola Tesla B”, koja je prostorno velika, srednje visoka, dobro organizovana i potpuno uređena, udaljena od vodotoka, industrijskih postrojenja i naselja, bez zabeleženih udesa u eksploataciji, koja ima potencijalno nizak nivo rizičnosti.

1.2. Naučne hipoteze istraživanja

U ispitivanjima se polazi od osnovne naučne hipoteze da se otpad iz deponije, kao akumulacije čvrste i tečne faze, u slučaju rušenja ne ponaša na istovetan način kao voda iz akumulacije, te da saglasno tome ne podleže istim pravilima kod procene rizika. Iz ove hipoteze proizlazi i druga hipoteza po kojoj se sve vrste industrijskog otpada mineralnog porekla (gruba i sitna flotacijska jalovina, mulj iz separacije, pepeo i šljaka, fosfogips...)

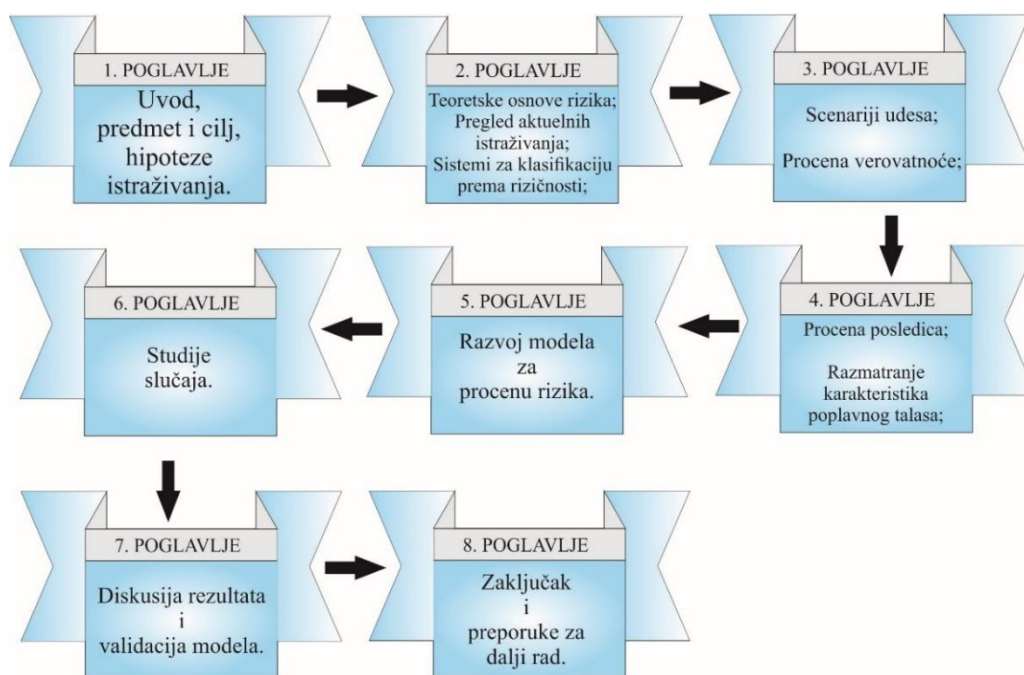
ne ponašaju na istovetan način pri tečenju, pa je i nizvodni prostor zahvaćen poplavnim talasom različite veličine.

Uspostavljene hipoteze određuju tok ispitivanja u kojima najpre treba dokazati da se procena rizika eksploatacije deponija otpada mineralnog porekla suštinski razlikuje od procene rizika eksploatacije akumulacije vode, a potom treba razlučiti procenu rizika za deponije u kojima se deponuju različite vrste otpada, shodno karakteristikama samog otpada.

1.3. Struktura disertacije sa kratkim pregledom poglavlja

U strukturnom smislu ova doktorska disertacija je napisana u skladu sa uspostavljenim ciljevima i hipotezama istraživanja. Sačinjena je od 8 poglavlja.

Na slici 1. prikazana je struktura doktorske disertacije.



Slika 1. Struktura doktorske disertacije

Prvo poglavlje predstavlja uvod u problematiku sa kratkim osvrtom na predmet i ciljeve, kao i hipoteze istraživanja.

Drugo poglavlje daje osvrt na teoretske osnove rizika i faze procesa procene uz najčešće primenjivane tehnike za procenu rizika. Takođe, istaknute su činjenice koje deponije čine apriori rizičnim i pružen je pregled aktuelnih istraživanja iz oblasti procene rizika

deponija. U ovom poglavlju akcentat je, shodno jednoj od hipoteza istraživanja, stavljen na razlike između deponija i akumulacija vode i prikazani su aktuelni sistemi za klasifikaciju ove vrste objekata prema rizičnosti.

Treće poglavlje obuhvata sva razmatranja koja se tiču potencijalnih udesa na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla. Uz osvrt na statističke podatke o zabeleženim slučajevima udesa u prošlosti, u ovom poglavlju predlažu se najčešći scenariji udesa koje bi trebalo analizirati prilikom procene rizika, kao i metodologija za procenu verovatnoće da se udes obistini.

Četvrto poglavlje daje osvrt na posledice koje se prognoziraju usled udesa na deponiji industrijskog otpada mineralnog porekla. Pre procene posledica razmatraju se svi aspekti poplavnog talasa od značaja za realnu procenu posledica, uz naglasak na količine izlivenog materijala i rastojanje koje poplavni talas pređe. U okviru posledica razmotrene su potencijalne ljudske žrtve, ekonomske i ekološke posledice. Predložen je sistem za usvajanje ukupne značajnosti svih posledica.

Peto poglavlje obuhvata detaljan opis razvijenog modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla. Model pruža precizno definisanu hijerarhiju koraka koje bi trebalo primeniti prilikom procene rizika i razvijen je u skladu sa fazama procene predloženim standardom ISO 31000:2015. Za svaki korak je sugerisan pristup ili metodologija.

Šesto poglavlje predstavlja studije slučaja zasnovane na primerima flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ i deponije pepela i šljake termoelektrane „Nikola Tesla B“, na kojima je primenjen razvijeni model za procenu rizika. Studije slučaja imaju za cilj da ukažu na doprinos razvijenog modela i pokažu princip aplikacije modela.

Sedmo poglavlje obuhvata diskusiju dobijenih rezultata primenom modela, kao i validaciju modela.

Osmo poglavlje daje zaključke o razmatranoj temi uz naglasak na doprinos ovog doktorata. U ovom poglavlju su predložene mere za buduća istraživanja zarad daljeg unapređenja modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla.

Poglavljima 3-7 je obuhvaćen naučni i praktični doprinos ove doktorske disertacije.

2. PREGLED LITERATURE

2.1. Teorijske osnove rizika

Rizik je prisutan u svakoj ljudskoj aktivnosti i deo je svakog procesa. Može se reći da je sam čovek najveći rizik koji procenu rizika vrši svaki dan, svesno ili nesvesno, tako što donosi razne odluke, od prelaska ulice, vožnje liftom, do upravljanja nekim tehnološkim procesom.

Upravljanje rizicima kao proces je zvanično počeo da se razvija posle Drugog svetskog rata, a prve knjige na temu rizika su izdate 1964. godine [1].

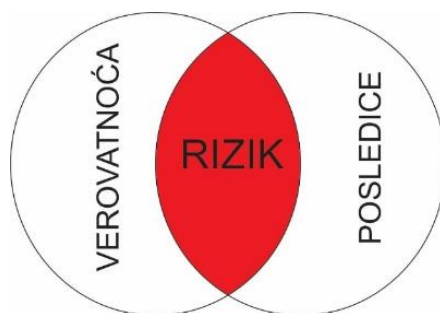
Poreklo reči rizik se raznoliko tumači. Najčešće se navodi da potiče od italijanske reči *risico*, odnosno, francuske reči *risque*, što znači „*opasnost, izlaganje opasnosti, mogućnost stradanja, gubitak...*“ [2, 3, 4, 5], a ređe se navodi da potiče iz grčkog jezika, od reči *rizikon*, što u prevodu na srpski jezik znači „*platu vojnika najamnika*“ [6]. Tokom vremena su prihvaćena i druga značenja ove reči u zavisnosti od konteksta, poput „*izloženosti opasnosti koja je lađama pretila od hridina i stena, smelog podviga, posla ili uloga skopčanog sa opasnošću da propadne...*“ itd [7].

Da bi se rizik razumeo potrebno ga je adekvatno definisati. Postoje mnoge definicije rizika koje su u upotrebi. Prema standardu ISO 31000:2015, rizik se definiše kao „*efekat neizvesnosti na ciljeve*“ [8]. Ako je efekat odstupanje od očekivanog ishoda, neizvesnost stanje nedostatka informacija, a cilj ishod kojem se teži, ova konstatacija se može protumačiti kao da je rizik svaka situacija koja nije izvesna, a koja ima negativan ishod.

Rizik je prisutan u situaciji gde jedna aktivnost vodi ka nekoliko različitih, međusobno isključivih ishoda, od kojih svi imaju poznatu verovatnoću nastanka. Ukoliko su verovatnoće tih ishoda ipak nepoznate, ta situacija nosi sa sobom neizvesnost [9]. Neizvesnost se ne može oceniti i subjektivna je, a predstavlja stanje nedostatka informacija o budućem vremenu [10].

U [11] se rizik tumači kao neizvesnost koja se može izraziti preko verovatnoće. Stoga, rizik se može poistovetiti sa verovatnosnim događajem koji može uticati na aktivnosti neke organizacije pozitivno ili negativno [12].

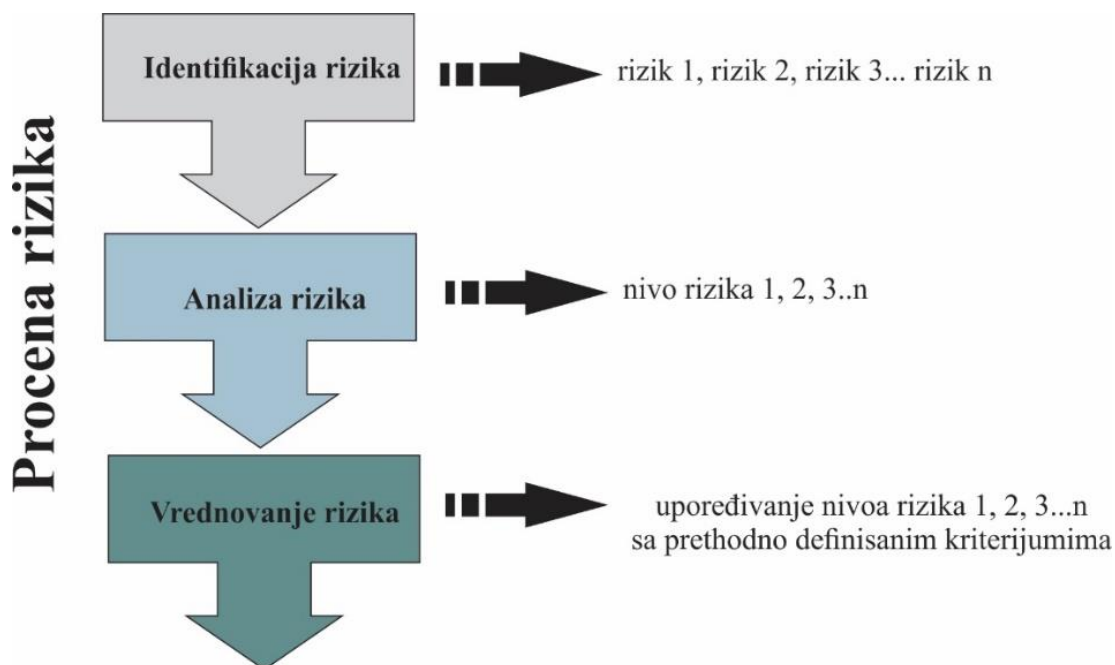
Najšire korišćena tradicionalna definicija rizika glasi da je „*rizik veličina koja se dobija kao funkcija verovatnoće nekog događaja i posledica koje nastaju usled tog događaja*“, slika 2 [13]. Ova definicija proističe iz stohastičke prirode rizika, prema kojoj svaki događaj koji ima verovatnoću nastanka od 0 do 1, nosi sa sobom rizik.



Slika 2. Rizik kao funkcija verovatnoće i posledica

2.2. Procena rizika

Rizik podleže proceni. Procena rizika je „*sveobuhvatni proces identifikacije, analize i vrednovanja rizika*“, slika 3 [14]. Ovaj proces omogućava shvatanje prirode rizika, njegovih uzroka, posledica i verovatnoće, a stvara uslove da se njime upravlja [15].



Slika 3. Proces procene rizika sa ključnim koracima i njihovim ishodima [14]

Procena rizika je u najboljem slučaju neformalna i sprovodi se koristeći se pristupačnim informacijama, iskustvom ili intuicijom [16]. Međutim, ovakav pristup može dovesti do loših odluka ukoliko procenu vrše lica koja nemaju dovoljno iskustva i predznanja o potencijalnim rizicima, kao i koji se pri proceni vode nekim ličnim, neispravnim motivima i neobjektivnim stavovima.

U [17] se navodi da je „...*procena rizika utvrđivanje prirode i stepena rizika potencijalne opasnosti, stanja ugroženosti i posledica, koja mogu potencijalno da ugroze živote i zdravlje ljudi, posao, službu i životnu sredinu*“.

Proces procene rizika je potrebno sprovoditi iz tri razloga [18]:

- Moralno načelo – u ljudskoj je biti da preventivno deluje i spreči potencijalni neželjeni događaj koji može pogoditi kako njega samog, tako i ljude iz njegovog okruženja.
- Zakonska obaveza – određeni zakonski akti propisuju obavezno sprovođenje procene rizika.
- Dobar poslovni osećaj – ako se broj neplaniranih događaja održava na minimumu, to rezultuje većom produktivnošću i boljom radnom atmosferom.

Organizacija treba da prepozna sve izvore rizika, područja njihovog delovanja, događaje koji iz njih proističu, kao i uzroke i moguće posledice. Svrha ovog koraka je da se sačini celokupan spisak rizika na osnovu onih događaja koji mogu da na bilo koji način poremete ostvarivanje ciljeva. Ovo je kritičan korak jer rizik koji nije identifikovan u ovoj fazi neće biti uključen u dalju analizu. Identifikacija treba da obuhvati i ostale rizike čijim izvorom organizacija ne upravlja, čak iako izvor ili uzrok nisu transparentni [8].

Analiza rizika predstavlja proces shvatanja rizika i utvrđivanje njihovih nivoa. Ona obezbeđuje ulazne informacije za vrednovanje rizika i tretman rizik. Uključuje razmatranje uzroka, izvora, posledica rizika, i verovatnoću pojave tih posledica. U ovom koraku faktori koji utiču na posledice i verovatnoću treba da se identifikuju. U zavisnosti od okolnosti, analiza može da bude kvalitativna, polukvantitativna ili kvantitativna, ili kombinovana. Posledice mogu biti izražene materijalno ili nematerijalno, kao ishod jednog ili više događaja [8].

Najvažniji koraci pri analizi rizika su [19]:

1. Definisane pozitivnih i negativnih posledica na bazi ekspertske analize.

2. Izbor najznačajnijih uticaja na analizu rizika. Pri obavljanju neke aktivnosti treba računati na veliki broj mogućih uticaja, poput zdravstvenih, ekoloških, ekonomskih, društvenih ili političkih.
3. Ocena veličine opasnosti. Neophodno je izmeriti veličinu i jačinu opasnosti, od momenta kada je opasnost inicirana, pa do krajnjih ishoda.
4. Određivanje verovatnoće ishoda. nepoznate, unapred nepredvidive opasnosti predstavljaju najveći problem.
5. Identifikovanje subjekata na koje će rizik imati efekat.

Proces procene rizika uz mere kontrole i tretmana rizika zajedno čine sistem upravljanja rizikom.

U cilju boljeg razumevanja rizika potrebno je tačno definisati neke ključne termine od značaja za procenu riziku. Treba svakako naglasiti da terminologija može varirati u zavisnosti od oblasti primene rizika, ali neki glavni činioци rizika, čije je tumačenje jednoznačno, su [14]:

- Izvor rizika je element koji samostalno ili u kombinaciji sa drugim elementima ima sopstveni potencijal da dovede do rizika.
- Događaj je nastanak ili promena niza okolnosti. Može se nazvati i udes.
- Opasnost je izvor potencijalne štete.
- Percepcija je stav osobe ili organizacije koja može da utiče ili bude pod uticajem donošenja odluke o riziku.
- Kriterijumi su uslovi pod kojima se vrednuje značaj rizika.
- Vlasnik rizika je osoba ili entitet koji su krajnje odgovorni ili ovlašćeni za upravljanje rizikom.
- Nivo rizika je veličina rizika ili kombinacija rizika izražena kao veza verovatnoće događaja i posledica.
- Verovatnoća je definisana kao brojna vrednost, od 0 do 1, gde 0 predstavlja nemoguće, a 1 sigurno. Verovatnoća je mogućnost da se nešto dogodi, izražena kvalitativno ili kvantitativno, definisana, merena ili određena subjektivno ili objektivno.
- Posledica je učinak događaja koji ima efekat na ciljeve.
- Učestalost je broj događaja ili učinaka u jedinici vremena.

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

- Ranjivost predstavlja karakteristike izloženog subjekta koje ga čine osetljivim na izvor rizika.
- Prihvatanje rizika je stav potkrepljen činjenicama o prihvatljivosti rizika.

Na osnovu rezultata analize rizika vrši se vrednovanje rizika koje ima za cilj da pomogne pri odlučivanju koje rizike treba tretirati. Vrednovanje rizika podrazumeva poređenje nivoa rizika koji su ustanovljeni u toku analize rizika sa kriterijumima rizika koju su u početku uspostavljeni [8].

Ocena prihvatljivosti rizika je zapravo postupak kojim se određuje koliki rizik je društveno prihvatljiv [20].

Prema prihvatljivosti rizik se može podeliti na [21] :

- Neprihvatljiv rizik - je rizik koji ne sme biti prihvaćen od strane društva, bez obzira na sve njegove benefite, ukoliko ih ima;
- Tolerantan rizik - je onaj rizik sa kojim je društvo spremno da živi, ali uz određenu kompenzaciju. Ovaj rizik ipak nije zanemarljiv i ne treba ga ignorisati, već raditi na njegovom smanjenju;
- Vrlo prihvatljiv rizik - je onaj rizik koji se smatra prihvatljivim i propisno kontrolisanim.

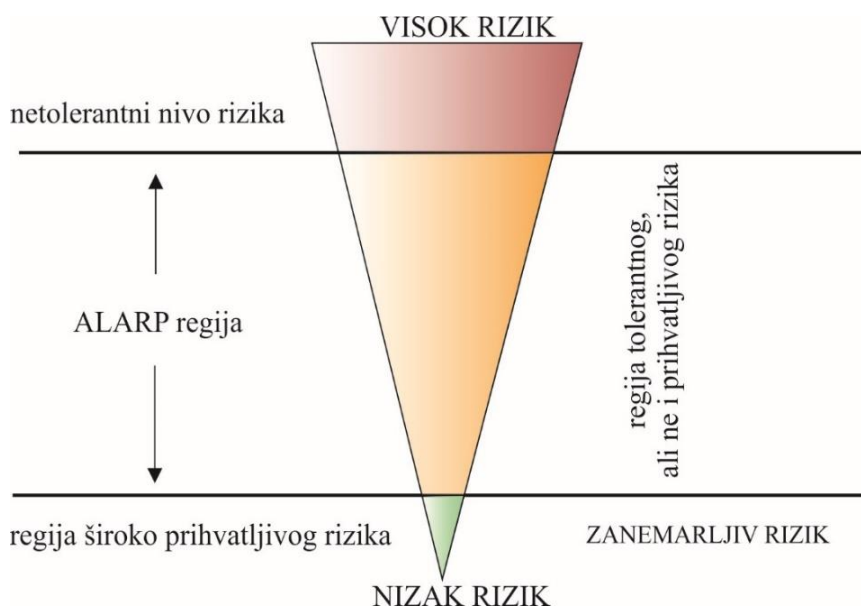
Prihvatljivost rizika je sud koji kreće od percepcije rizika, iako je percepcija rizika kompleksna varijabla koja se različito tumači u društvu i među pojedincima [22].

Rizici su u granicama prihvatljivosti ukoliko postoji [23]:

- mala nesigurnost koja se odnosi na verovatnoću i raspodelu štete,
- prilično nizak sveukupni potencijal štete,
- mala do srednja verovatnoća,
- niska postojanost i istrajnost,
- uzak opseg razlika između potencijalne štete i verovatnoće njenog nastanka, i
- nizak rizik od socijalnih konflikata.

Ono što je za jedne neprihvatljiv nivo rizika, za druge je tolerantan ili prihvatljiv. Utvrđivanje kriterijuma prihvatljivosti može biti proizvoljnog karaktera u zavisnosti od uslova sredine, materijalnih mogućnosti, bezbednosti ugroženih subjekata i sl.

Postoji više pristupa tumačenja prihvatljivosti, ali svakako je najzastupljeniji ALARP (As Low as Reasonably Practicable) pristup, slika 4. Ovaj pristup se tumači tako da rizik koji je u funkciji velike verovatnoće događaja i veoma značajnih posledica je neprihvatljiv i nalazi se u crvenoj zoni tzv. „šargarepa“ dijagrama (eng. *carrot diagram*), dok se rizik male verovatnoće i posledica male značajnosti nalazi u zelenoj zoni i on je prihvatljiv. Između ove dve zone nalazi se regija tolerantnog (ali ne i prihvatljivog) rizika, čiji bi nivo trebalo kontinualno da raste, odnosno da rizici iz ove regije budu svedeni na nivo „nizak koliko je to realno izvodljivo“ [24].



Slika 4. Prihvatljivost rizika, tzv. „šargarepa“ dijagram [24]

Metode ocene prihvatljivosti rizika se mogu kategorisati kao [25]:

- Ekspertska procena – lice koje je uključeno u proces procene rizika na osnovu svojih iskustava donosi sud o tome da li je identifikovani rizik prihvatljiv.
- Formalna analiza - poput analize troškova i dobiti, rizika i dobiti, analize odluka.
- “*Boot strapping*” analiza - kao etalon u donošenju odluka uzima u obzir i istražuje ciklična ravnotežna stanja između troškova i dobiti. Do informacija koje se odnose na rizik po ovoj metodi može se doći na osnovu analize istorijskih podataka u vezi sa rizikom. Nedostatak ove metode je da ne može da se nosi sa novim rizicima, pošto u vezi sa njima nema nikakvih informacija iz prošlosti. ALARP pristup pripada ovog kategoriji.

Povećani nivo obrazovanja, ekološke svesti i političke zrelosti društva je doveo do veće pažnje usmerene na praksu upravljanja industrijskim rizikom. Takođe, percepcija rizika od strane društva konstantno balansira između stvarnog i tumačenog nivoa rizika shodno gubicima, jer često društveni konflikti dovode do etiketiranja određenih objekata ili industrija kao opasnih [26].

Cilj svake procene rizika jeste da se rizik smanji ili dovede na tolerantan ili prihvatljiv nivo. Iako se čini da je ishod procene u potpunosti identifikovan sveukupni rizik, uvek postoji izvestan zaostali rizik, te shodno tome se može tvrditi da nulti rizik ne postoji.

Sve u našoj okolini, pod određenim uslovima, može prouzrokovati rizik, što znači da ništa nije bez rizika i ništa nije bezbedno [27].

Može se zaključiti da rizik nikada ne može biti eliminisan, ali može biti kontrolisan.

2.3. Tehnike za procenu rizika

Tehnike za procenu rizika se mogu klasifikovati na osnovu njihovih primenjivosti u svakom pojedinačnog koraku procene rizika [15]:

- tehnike primenjive pri identifikaciji rizika,
- tehnike primenjive pri analizi rizika – analizi posledica,
- tehnike primenjive pri analizi rizika – kvalitativno, polukvantitativno i kvantitativno vrednovanje verovatnoće,
- tehnike primenjive pri analizi rizika – procena efikasnosti postojećih kontrolnih mera, i
- tehnike primenjive pri vrednovanju rizika.

U tabeli 1 dat je detaljan pregled svih postojećih tehnika za procenu rizika prema njihovoj primenljivosti u svakom koraku procene rizika, a neke od njih su detaljnije opisane u nastavku teksta.

Tabela 1. Primenljivost tehnika za procenu rizika, preuzeto od [15]

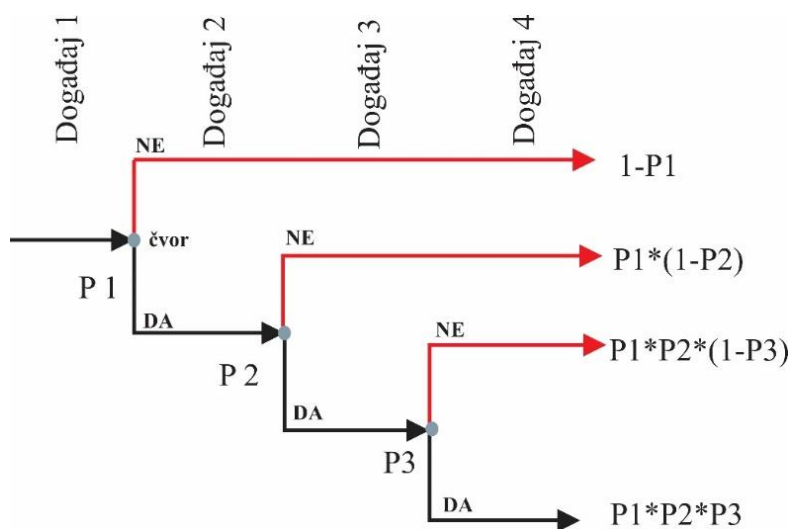
	Procena rizika (VP-veoma primenljivo, P- primenljivo, NP- nije primenljivo)				
	Identifikacija rizika	Analiza rizika			Ocena rizika
		Posledice	Verovatnoća	Nivo rizika	
Brejnstorming	VP	NP	NP	NP	NP
Strukturirani ili polustrukturirani intervjui	VP	NP	NP	NP	NP
Delfi	VP	NP	NP	NP	NP
Ček liste	VP	NP	NP	NP	NP
Primarna analiza hazarda	VP	NP	NP	NP	NP
HAZOP	VP	VP	P	P	P
HACCP	VP	VP	NP	NP	VP
Procena ekološkog rizika	VP	VP	VP	VP	VP
SWIFT	VP	VP	VP	VP	VP
Analiza scenarija	VP	VP	P	P	P
Analiza biznis uticaja	P	VP	P	P	P
Analiza korena uzroka problema	NP	VP	VP	VP	VP
FMEA	VP	VP	VP	VP	VP
Stablo otkaza	P	NP	VP	P	P
Stablo događaja	P	VP	P	P	NP
Analiza uzroka i posledica	P	VP	VP	P	P
Analiza uzorka i efekata	VP	VP	NP	NP	NP
LOPA	P	VP	P	P	NP
Stablo odluke	NP	VP	VP	P	P
Analiza ljudske pouzdanosti	VP	VP	VP	VP	P
Bow-tie analiza	NP	P	VP	VP	P
RCM	VP	VP	VP	VP	VP
SCA	P	NP	NP	VP	NP
Markov analiza	P	VP	NP	NP	NP
Monte Karlo	NP	NP	NP	NP	VP
Bajesova statistika	NP	VP	NP	NP	VP
FN krive	P	VP	VP	P	VP
Rizik indeksi	P	VP	VP	P	VP
Matrice rizika	VP	VP	VP	VP	P
Analiza troškova/dobiti	P	VP	P	P	P
MCDA	P	VP	P	VP	P

U osnovi se tehnike mogu podeliti na kvantitativne i kvalitativne.

Kvantitativne tehnike se zasnivaju na proceni verovatnoće neželjenih događaja i njihovih posledica u smislu broja žrtava i materijalne štete [28]. Najčeće korišćene kvantitativne tehnike prilikom procene rizika eksploatacije deponija industrijskog otpada mineralnog porekla su tehnike Stablo događaja i Stablo otkaza [29].

Obe tehnike se zasnivaju na prikazivanju svih mogućih uzročnih događaja koji dovode do nekog udesa na deponiji. Jedina razlika između ove dve tehnike je u načinu prikazivanja navedenih događaja.

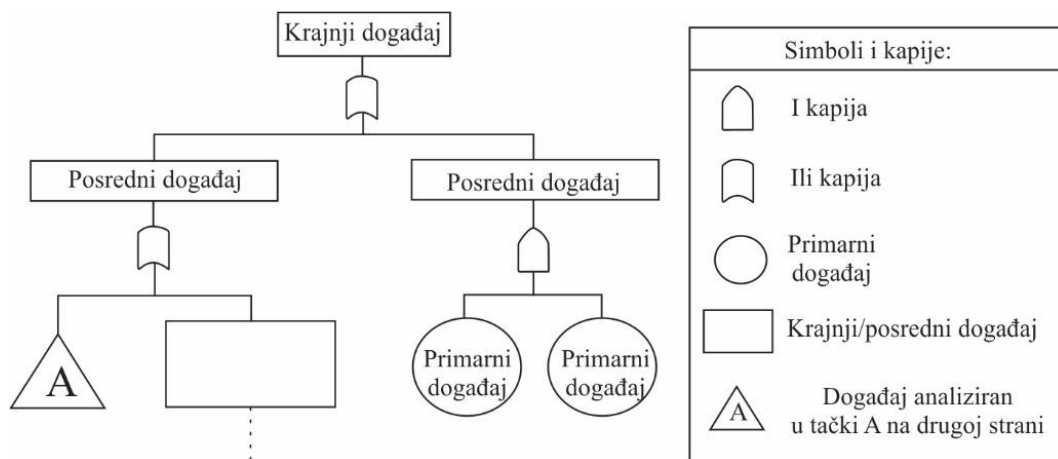
Stablo događaja (eng. *Event tree*) je tehnika za identifikovanje i ocenu niza događaja koji podstaknuti nekim inicijalnim događajem, mogu činiti scenario udesa. Granama su povezani čvorovi koji predstavljaju događaje. Svaki čvor predstavlja binarni događaj, koji se može dogoditi ili ne. Iz svakog čvora idu bar dve grane, od kojih jedna predstavlja pozitivan, a drugi negativan ishod analiziranog događaja. Jedan događaj može imati više od dva ishoda, ali ishodi treba da budu nezavisni i zbir njihovih verovatnoća da bude 1. Stablo događaja se grana od dna ka vrhu, ili sa leve strane na desnu, slika 5 [21].



Slika 5. Stablo događaja [30]

Kod ove tehnike jedan događaj indukuje sledeći, prouzrokujući tako tzv. „domino“ efekat, što je česta pojava i kod deponija, npr. kvar drenažnog sistema deponije inicira porast pornog pritiska u deponiji što može narušiti stabilnost nasipa i time prouzorkovati njegovo rušenje.

Stablo otkaza (eng. *Fault Tree*) je tehnika koja se vrši odozgo nadole i, za razliku od Stabla događaja, kreće od krajnjeg događaja (udesa) a završava se sa svim mogućim sporednim događajima koji taj udes iniciraju, slika 6. Ovo tehnikom se identifikuju i analiziraju faktori koji doprinose realizaciji nekog neželjenog događaja [21]. Grananje stabla se bazira na Bulovoj algebri koja obuhvata operacije I, ILI i NE sa operacijama kao što su unija, presek i komplement.



Slika 6. Stablo otkaza [31]

Kvalitativne tehnike se temelje na dodeljivanju opisnih vrednosti posledicama i verovatnoćama događaja.

Kvalitativne tehnike koja imaju najčešću primenu kod procene rizika deponija industrijskog otpada mineralnog porekla su FMEA (Failure Mode Effects Analysis) i matrice rizika [13, 29, 32, 33], koje se često koriste zajedno.

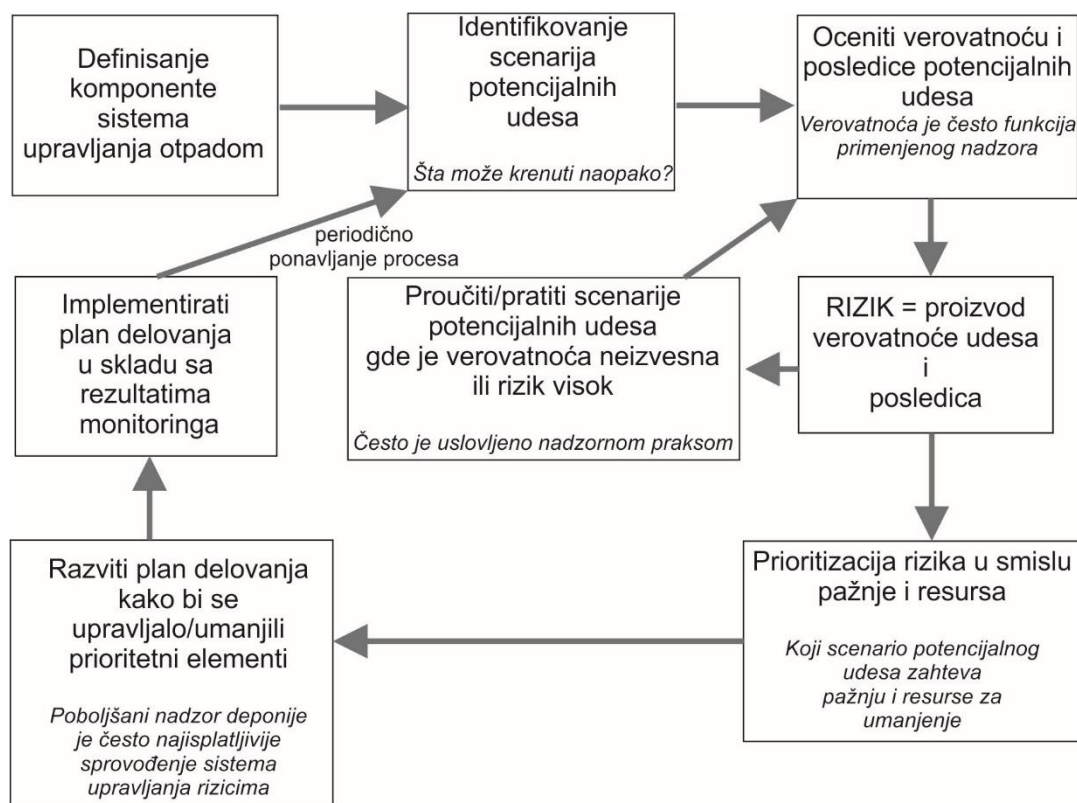
Cilj FMEA tehnike je da obezbedi sistematsku i transparentnu procenu rizika kroz određivanje [13]:

1. verovatnoće udesa na deponiji, i
2. efekata ili posledica udesa po okolinu.

FMEA tehnika daje sistematično ocenjivanje potencijalnih udesa uz pomoć raznih načina „otkaza“ i opasnosti/posledice takvih udesa. To praktično znači da se udes na deponiji unapred prognozira, definiše njegov scenario, i na osnovu lokacije deponije, a u odnosu na najbliže infrastrukturne objekte, naselja, kulturne spomenike, supstrate životne

sredine, izvrši adekvatna procena potencijalnih posledica. Rizik se potom dobija kao funkcija verovatnoće nekog događaja i posledica koje nastaju usled tog događaja.

Zbog nedostatka podataka o mogućem nastanku udesa, najbolja procena verovatnoće je često mišljenje eksperata. U suštini, takve procene su bazirane na iskustvu eksperata. Ipak, jednostavna je za primenu i rezultati se lako tumače. Proces procene rizika pomoću FMEA tehnike prikazan je na slici 7.

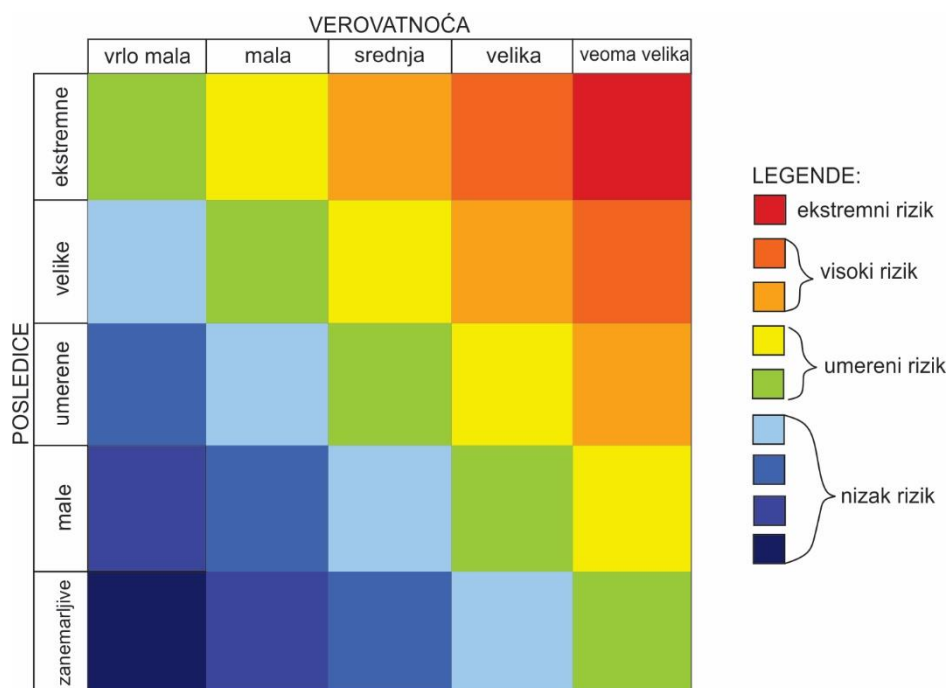


Slika 7. Procena rizika pomoću FMEA tehnike [32]

Kao što se sa slike 7 može videti, upotreba FMEA metode kod jedne deponije industrijskog otpada se zasniva na definisanju svih komponenti sistema koje mogu uticati, ili na koje može uticati svaki manji ili veći udes na deponiji koji je uzet u razmatranje. Aplikacija ove tehnike se često vrši putem raznih algoritama, dijagrama i blok dijagrama [33].

Matrice rizika predstavljaju koristan alat za predviđanje nivoa rizika ili za rangiranje rizika na osnovu procenjene verovatnoće i značajnosti posledica [15]. Iako se inicijalno ubrajaju u kvalitativne tehnike, mogu imati i polu-kvantitativnu formu, ukoliko se varijablama dodele i numeričke, pored opisnih vrednosti.

Mogu biti različitih razmera, ali najčešće su u upotrebi matrice oblika 3x3, 4x4, 5x5 i 7x7, pri čemu su najpraktičnije za upotrebu one sa neparnim brojem ćelija zbog lakšeg izdavanja srednjih vrednosti. Često su obojene, pri čemu su najčešće boje semafora u upotrebi kako bi se procenjeni rizik mogao i vizuelizovati, jer boje lakše „govore“ od brojeva. „Hladne“ boje ukazuju na nizak nivo rizika (plava, zelena), a kako rizik raste i boja se zagreva, pa preko žute, kojom je predstavljen umereni ili uslovno tolerantan rizik, stiže se do „toplih“ boja (narandžasta, crvena) koje asociraju na visok rizik, slika 8.



Slika 8. Matrica rizika oblika 5x5 [13]

Zone prihvatljivosti, odnosno, neprihvatljivosti rizika u okviru matrice nisu striktno i mogu se pomerati u zavisnosti od uslova i kriterijuma kojim se vodi organizacija koja upravlja rizicima.

Analiza rizika uz pomoć matrice sa vrši tako što se na x-osi se obično pozicionira verovatnoća, od najmanje do najveće, dok se na y-osi pozicionira značajnost posledica, od najmanjih do najvećih. Ovakav raspored nije obavezan, te se često u literaturi mogu sresti i matrice sa obrnutim rasporedom varijabli.

2.4. Deponije industrijskog otpada mineralnog porekla kao rizični objekti

Deponija industrijskog otpada predstavlja tehnološki uređeni tehnički objekat koji ima višestruke namene. Obično služi za trajno deponovanje otpada ili privremeno skladištenje radi potpunog izbistravanja tehnološke vode [34].

U industrijski otpad mineralnog porekla spada otpad nastao u procesu istraživanja, iskopavanja iz rudnika ili kamenoloma, fizičkog i hemijskog tretmana minerala, rafinisanja nafte i sagorevanja uglja.

Osnovne vrste industrijskog otpada mineralnog porekla su [35, 36, 37]:

- Otkrivka – krupozni otpad koji nastaje prilikom razvoja površinskog kopa, a koji uključuje stenski materijal i zemlju iz površinskog sloja.
- Jalovina – sitnozrni otpad koji nastaje prilikom postupaka pripreme rude radi ekstrakcije korisne komponente.
- Pepeo – otpad koji nastaje prilikom sagorevanja uglja.
- Šljaka/zgura – otpad koji nastaje pirometalurškim tretmanom koncentrata rude.
- Gipsevi – otpadi koji nastaju prilikom odsumporavanja dimnih gasiva ili proizvodnje fosforne kiseline.
- Kisele rudničke vode – koje se stvaraju prilikom kontaminacije površinskih i podzemnih voda sumpornom kiselinom nastalom usled rastvaranja istaloženih sulfida.
- Gasoviti otpad – koji uključuje sumpor-dioksid i čestice koje se emituju prilikom tretmana koncentrata u topionicama.

Svaka vrsta otpada ima svoje specifičnosti pri čemu šljaka ima najmanju sličnost sa sirovinom od koje nastaje [36].

Osnovni zadaci koje treba da ispuni dobro projektovana deponija su [38]:

- dovoljna zapremina za odlaganje svih količina otpada u predviđenom periodu eksploatacije,
- dovoljno velika površina za potpuno izbistravanje vode, ako se industrijski otpad deponuje hidraulički,

- dovoljno slobodnog prostora za smeštaj potrebne količine povratne vode,
- prihvatljivi troškovi njene izgradnje i eksploatacije,
- bezbednost i stabilnost, kako po okolinu, tako i po ljudstvo.

Deponije industrijskog otpada predstavljaju jedne od najvećih objekata koje je čovek stvorio i shodno tome su apriori rizični objekti [29]. Od ukupno 93 tipa najvećih opasnosti na svetu, udesi na deponijama industrijskog otpada su na 18. mestu, odmah iza zemljotresa, kolere, poplava itd. [39].

Rizik vezan za deponije industrijskog otpada se može raščlaniti na [40]:

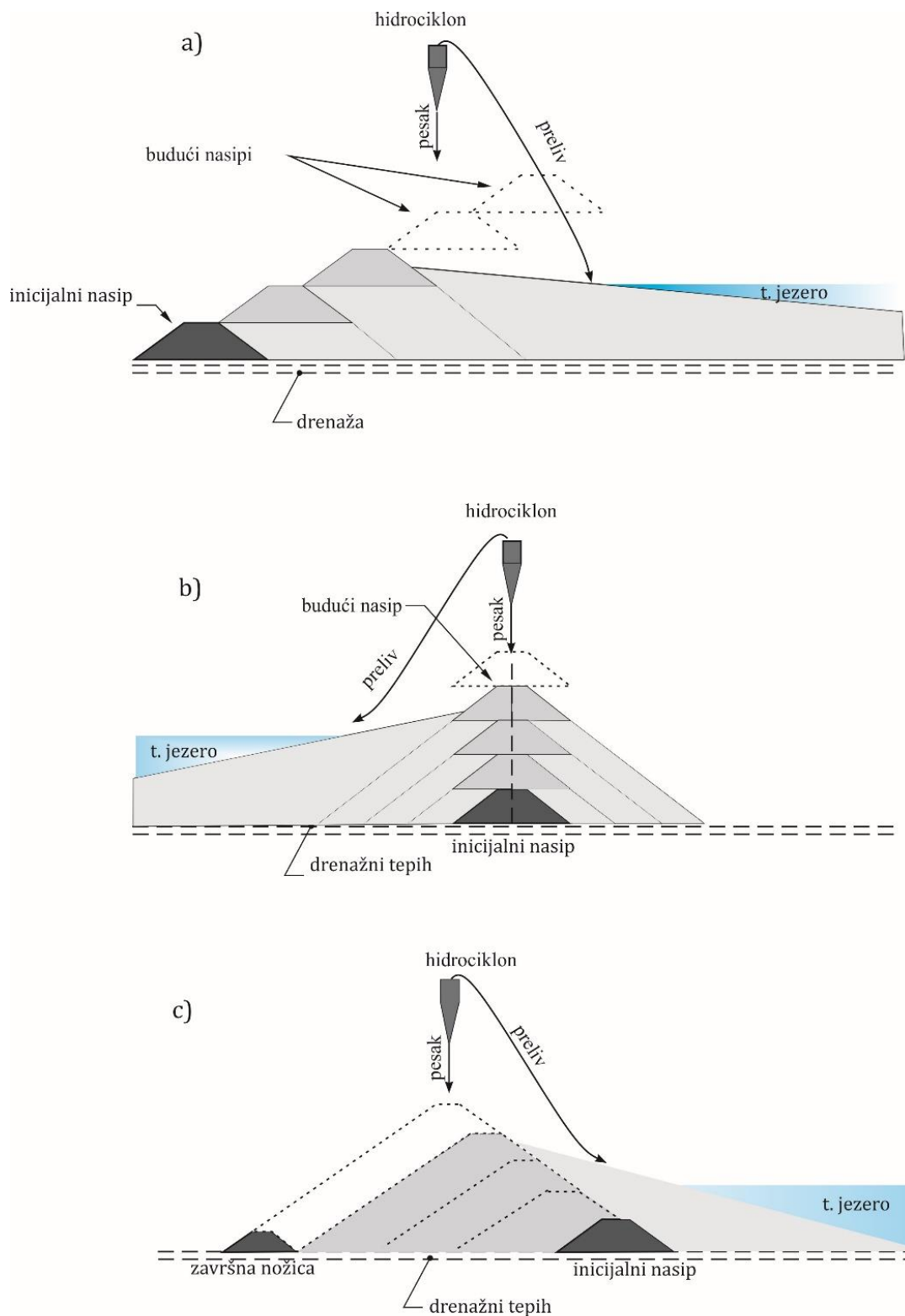
- rizik vezan za ekološku nestabilnost deponije koja može rezultovati izluživanjem teških metala u okolinu i njenim dugoročnim zagađenjem, i
- rizik vezan za geotehničku nestabilnost deponije, s obzirom na činjenicu da deponije predstavljaju potencijalna klizišta sa velikom potencijalnom energijom i rizikom od rušenja, što ih čini velikim izvorom opasnosti po okolinu.

Iako se prioritet uvek daje geotehničkoj nestabilnosti deponije, ekološka se svakako ne sme zanemariti jer ona može biti uvertira i inicijator geotehničke nestabilnosti [34].

Manjak motivacije, relevantne zakonske regulative i stručnog kadra u polju procene rizika deponija industrijskog otpada mineralnog porekla rezultovao je time da se često modeli namenjeni akumulacijama vode primenjuju i na deponijama, što može dati nerealne rezultate.

Iako je potencijal udesa na deponijama koje su pravilno projektovane i održavane relativno mali, ono što rizik koji eksploatacija deponija nosi sa sobom jesu značajne posledice koje mogu nastati usled udesa. Deponije industrijskog otpada su kompleksni objekti i mnogo faktora utiče na njihovu stabilnost.

Metoda nadgradnje deponije je nesumnjivo jedan od najbitnih karakteristika deponije koje određuju njenu stabilnost, slika 9.



Slika 9. Metode nadgradnje deponije: a) nastupna metoda, b) metoda centralne linije, c) odstupna metoda

Nadgradnja deponija se može vršiti [38, 41, 42, 43]:

- Nastupnom ili uzvodnom metodom – koja je najstarija metoda nadgradnje, slika 9.a. Podrazumeva izgradnju inicijalnog nasipa koji se najčešće radi od materijala iz pozajmišta. Nadgradnja se vrši u etažama visine od 3-5 m i preporučljivo je da se godišnje izgradi 2-3 etaže. S obzirom da se svaki sledeći nasip formira na muljevitom otpadu slabije nosivosti, godišnje ograničenje visine je 25 do 30 m,.
- Odstupnom ili nizvodnom metodom – podrazumeva izgradnju inicijalnog i zaštitnog nasipa, slika 9.c. Ova metoda dozvoljava mešanje otpada sa materijalom iz pozajmišta. Nadgradnja se vrši u etažama visine od 3-5 m. Godišnje napredovanje u visinu nije ograničeno jer se može obezbediti brzo i lako dreniranje materijala od kog se rade nasipi. Ova metoda se koristi samo na flotacijskim jalovištima rudnika bakra, zbog velike količine otpada i relativno grubog usitnjavanja.
- Metodom centralne linije – koja se najređe koristi i predstavlja prelaz između prethodne dve, slika 9.b. Nadgradnja se isključivo radi od otpada i etaže su visine od 3-5 m. Godišnje napredovanje u visinu nije posebno ograničeno i zavisi od slučaja do slučaja, a kao i kod odstupne metode, potrebno je prethodno izgraditi inicijalni i zaštitni nasip.

Od ove tri nabrojane metode, nastupna metoda je metoda kojom je izgrađena većina deponija koje su pretrpele udese u istoriji, i još preciznije, na kojima je zabeleženo ukupno 573 ljudske žrtve u periodu od 1962. do 2008. godine. Ovakav trend je pogotovu prisutan i veoma trusnim područjima, poput Čilea, koji je nakon katastrofalnog udesa na deponiji El Cobre 1965. godine zabranio izgradnju deponija ovom metodom [44].

Pored slabe otpornosti na dinamičke udare, loša podloga, mala gustina deponovanog materijala i velika zasićenost vodom ovu metodu čine nepodobnom kada se radi o predelima gde su česte padavine, pa svaki nagli dotok vode može prouzrokovati filtracioni poremećaj [34].

Kada se govori o specifičnostima procene rizika eksploatacije hidrotehničkih objekata kakve su deponije industrijskog otpada mineralnog porekla važno je naglasiti da je:

- Svaka deponija na koju se otpad odlaže u obliku hidromešavine „žarište“, jer voda ima veliku potencijalnu energiju čijim se pretvaranjem u kinetičku energiju inicira

njeno tečenje. Voda pokreće sa sobom i čvrst otpad čime se formira poplavni talas velikih razmera koji može prouzrokovati veliku štetu po okolinu.

- Otpad se saturiše brzo, ali cedi sporo. Stepen saturacije ostaje visok čak i po prestanku eksploatacije deponije, uprkos visokoj stopi evaporacije i maloj količini padavina [45].
- Deponije su otvoreni objekti i konsolidacija otpada je jako dug i spor proces;
- Sitnozrni otpad, usled velike uniformnosti zrna i visokog stepena saturacije (>80%) je sklon likvefakciji.

Najbitnija karakteristika industrijskog otpada mineralnog porekla sa aspekta da rizičnosti jesu njegove količine. Iako ne postoje realne procene tačnih količina otpada koji nastaje u rudarskoj industriji na globalnom nivou, zasigurno se može tvrditi da su te količine ogromne. Za rudarski otpad je bitno naglasiti da količine višestruko nadmašuju korisni element, pogotovu kod ruda obojenih metala. Na primer, prilikom izdvajanja 1 tone koncentrata bakra nastaje 110 tona jalovine i 200 tona otkrivke. Što su veće razmere rudnika i ležišta koje se eksploatišu, to više otpada nastaje generalno [35].

Odnos korisnog i nekorisnog u rudarskoj proizvodnji može se izraziti preko množilaca koji pokazuju koliko se više proizvodi otpada nego korisne komponente [37]:

- Kameni ugalj: x 4,87;
- Mrki ugalj i lignit: x 9,9;
- Rude gvožđa: x 5,2;
- Boksit: x 3;
- Rude zlata: x 950 000;

Prosečni odnos rudarskog otpada i korisne komponente je 200:1 [46].

Na osnovu ovih podataka može se zaključiti da se izuzetno velike količine otpada odlažu i predstavljaju trajnu opasnost po okolinu. Sve nabrojane činjenice čine da procena rizika eksploatacije deponija nosi sa sobom dosta neizvesnosti i kompleksnosti. Veliki ulog, koji pored ogromne materijalne i ekološke štete može obuhvatati i ljudske žrtve, a kojih je prema zvaničnim podacima o zabeleženim udesima na deponijama ukupno 2269, zaključno sa 2017. godinom, čini da se samom procesu procene rizika pristupa sa velikom odgovornošću [47].

Jedino na šta se može uticati, ne bi li se nivo rizika smanjio, je ranjivost same deponije.

Najranjiviji deo deponije je svakako njen nasip.

U deponije bez nasipa spadaju:

- suve deponije (odlagališta) - služe za deponovanje otpada čija su zrna krupnoće >5 mm,
- deponije u udubljenjima, koja mogu biti prirodna ili udubljenja nastala ljudskim aktivnostima (jame, delovi aktivnih kopova, napušteni kopovi...), i
- deponije ispod površine vode, koje predstavljaju prostor za deponovanje unutar reka, jezera, mora i okeana.

Mokre (hidrauličke) deponije služe za deponovanje sitno usitnjenih otpada u obliku hidromešavine i suspenzije. Ove deponije se ne mogu formirati bez prethodnog okonturenja obodnim nasipima koji mogu biti izgrađeni od materijala iz pozajmišta ili od samog materijala koji se deponuje [38]. Veliki sadržaj vode ih čini inicijalno nestabilnim.

Takođe, veličina slivnog područja je faktor koji utiče na stabilnost deponije. Što je veće slivno područje, to je veći potencijal udesa. U tom smislu su ravničarske deponije u prednosti nad brdsko-planinskim jer praktično nemaju slivno područje.

Za stabilnost deponije bitno je kontrolisanje taložnog jezera. Na njegovu veličinu utiču taložne osobine otpada koji se odlaže, hidrološka situacija područja na kom se deponija nalazi, kao i stepen razgradnje reagenasa koji se unose sa otpadom. U smislu taložnog jezera kontrolišu se [34]:

- Širina plaže koja treba da bude minimalno 100 m.
- Visinski odnos krune nasipa i taložnog jezera - sigurnosno nadvišenje (eng. *freeboard*) koje treba da bude najmanje 1 m.

2.5. Pregled dosadašnjih istraživanja

Prve ideje o proceni rizika na deponijama industrijskog otpada, kao jednim od najvećih geotehničkih struktura na zemlji su se javile sredinom 20. veka.

Kazagrande je 1964. god. definisao aspekte geotehničkog rizika kao [48]:

- Neadekvatno znanje koje je vođeno ličnim ubeđenjima i iskustvom inženjera za vrednovanje rizika;
- Odluku o odgovarajućim granicama bezbednosti, ili nivou rizika, koja uzima u obzir ekonomske faktore i magnitudu gubitaka, kao posledice nekog udesa.

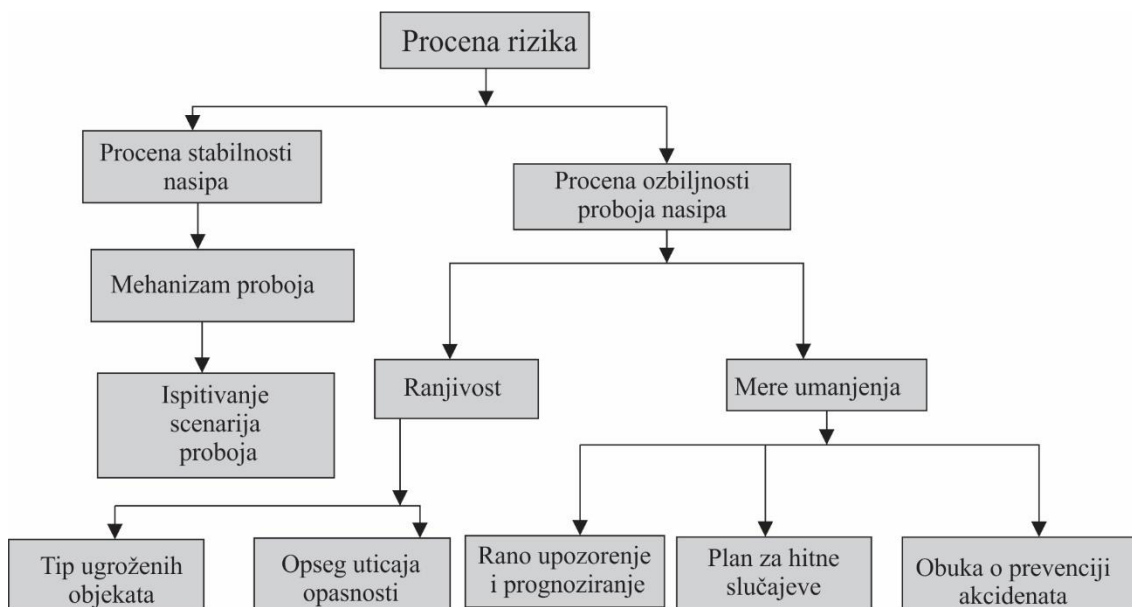
Grupa autora je 1983. godine pripremila dokument u kom se uz pomoć tehnike za procenu rizika, stabla otkaza ocenila dugoročna stabilnost jalovišta rudnika urana. Tom prilikom su proceni priključili prognoziranje scenarija udesa usled erozije, vododerina, plavljenja reka, klizišta itd. Ovaj dokument se smatra jednim od prvih formalnih dokumenata o aplikaciji metoda za procenu rizika na objekte poput deponija [49].

Godine 1987. objavljen je prvi rad o probablističkom pristupu u proceni dugoročne stabilnosti deponija rudnika urana. U njemu su dati primeri stabala otkaza korišćenih pri proceni verovatnoće udesa na ovakvoj vrsti objekata. U radu je posebno naglašeno da je za probablističku procenu bitan odabir scenarija udesa, ili kombinacija scenarija. Procena posledica udesa je isključena [50].

Iste godine objavljen je i prvi rad koji se tiče procene rizika na deponijama drugih vrsta industrijskog otpada, osim uranovog [51]. U ovom radu je istaknuto da stabilnost deponija zavisi od mnogo faktora, poput sistema rukovođenja deponijom, preko prirodnih katastrofa, do geomehaničkih karakteristika otpada. Takođe, došlo se do zaključka da ekspertske procene o stabilnosti neke deponije, koje počivaju na faktorima sigurnosti iz prošlosti, mogu biti inkorporirane u proces definisanja prihvatljivih kriterijuma rizika.

Prema mišljenju navedenom u [48] nije puno napora uloženo u poboljšanje tehnika za procenu rizika na deponijama u periodu od 1990. godine pa na ovamo.

U Kini se tek u poslednjih par godina počela posvećivati pažnja proceni rizika na deponijama, koja je primarno fokusirana na ocenu stabilnosti deponije, dok je ozbiljnost posledica u drugom planu. Na slici 10 je prikazan algoritam procene rizika [52].



Slika 10. Glavni elementi procene rizika na deponijama industrijskog otpada [52]

U [52] je predložen jednostavan pristup za procenu rizika zasnovan na matrici za procenu rizika, oblika 4x4, prilagođenu deponijama industrijskog otpada, a na osnovu kog se predlažu mere za upravljanje prepoznatim rizikom.

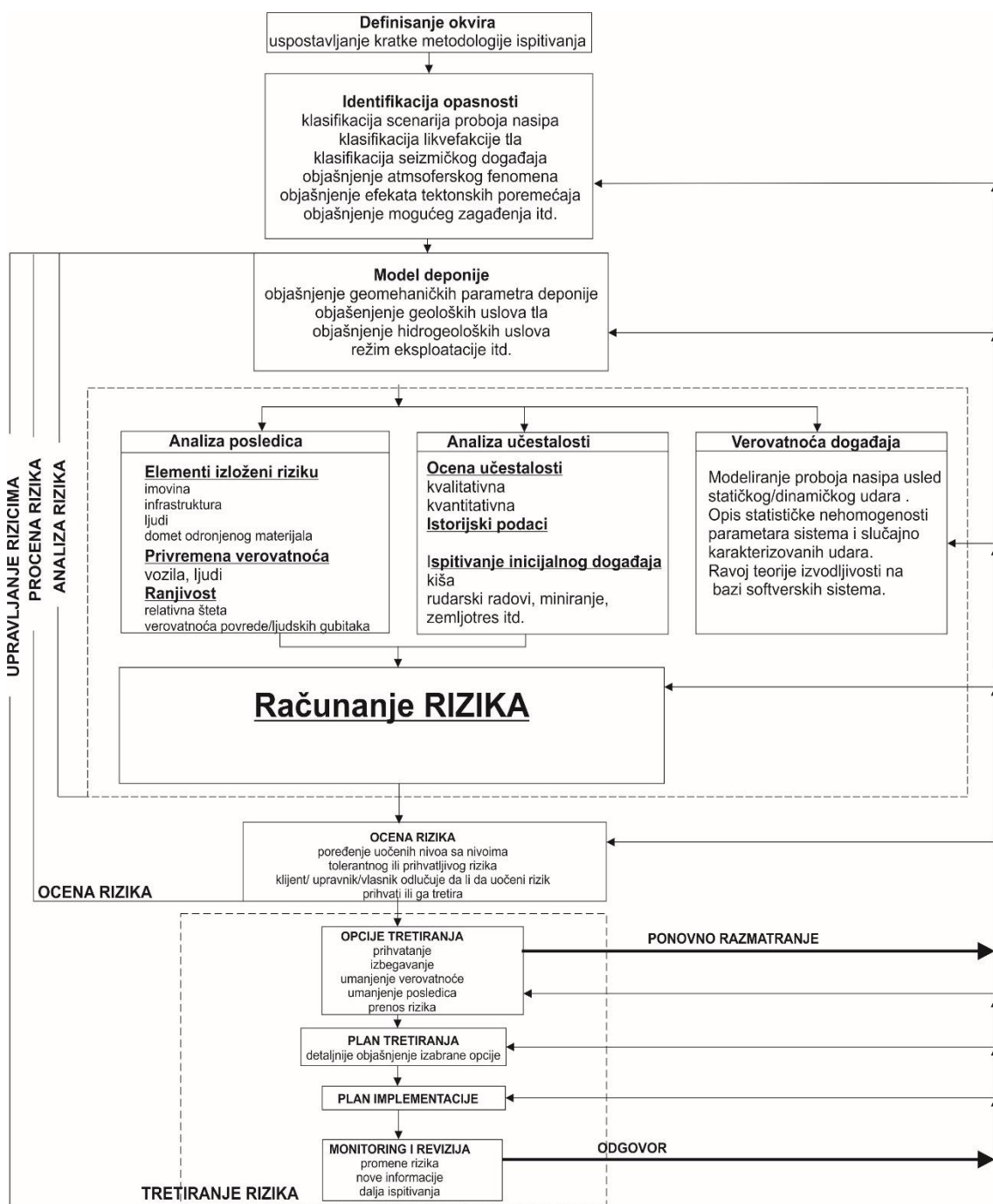
Matrica je u potpunosti zasnovana na stanju deponije. U zavisnosti od zatečenog nivoa njene održavanosti, kao i posledica koje se mogu manifestovati, rizik se rangira, tabela 2.

Tabela 2. Matrica za procenu rizika na deponijama

			Posledice			
			Ekstremne	Velike	Umerene	Male
			4	3	2	1
Verovatnoća	Može doći do udesa u svakom momentu.	4	16	12	8	4
	Postoje ozbiljni skriveni poremećaji, ako se nešto ne preduzme na vreme može doći do udesa.	3	12	9	6	3
	Deponija zadovoljava osnovne uslove za bezbedan rad.	2	8	6	4	2
	Deponija je potpuno uređena i svi uslovi za bezbedan rad su obezbeđeni.	1	4	3	2	1

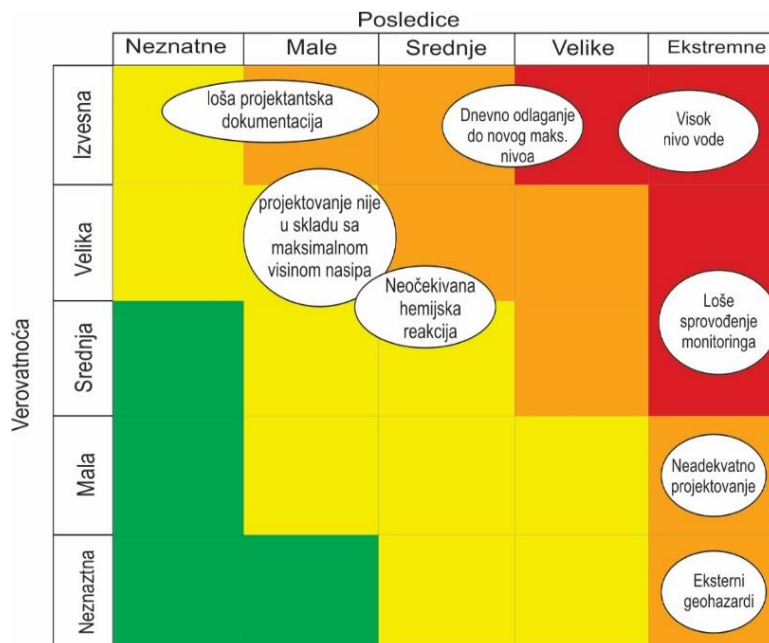
Ovakav način procene rizika je realan jer veličinu verovatnoće da dođe do udesa poistovećuje sa ocenom stabilnosti deponije i dovodi do prostih zaključaka – uređena deponija je nerizična, loše održavana deponija je rizična. Podrazumeva se, pre primene ove materije potrebno je sprovesti detaljnu analizu svih aspekata njene stabilnosti, kao i posledica koje bi usledile ukoliko bi došlo do udesa, te njeno samostalno korišćenje nije moguće, već isključivo kao alat za analizu rizika, nakon njegove identifikacije.

Trenutna praksa procene rizika na deponijama je zasnovana delimično i na zakonskoj regulativi i često se zasniva na PRA (*Probabilistic Risk Assessment*) teoriji prema kojoj se vrši kvantifikacija rizika [53]. Na slici 11 je prikazan dijagram po kom se jedna ovakva procena odvija.



Slika 11. Primer dijagrama za probablističku procenu rizika [54]

Na jednoj matrici rizika, oblika 5x5, mogu se pozicionirati potencijalne opasnosti po neku deponiju, tako da svaka uočena opasnost odmah ukazuje na nivo rizika, slika 12 [55].



Slika 12. Ključni rizici koji utiču na stabilnost deponije [55]

U okviru ove matrice u obzir su uzete najčešće opasnosti koje mogu zadesiti deponiju u toku njenog eksploatacionog veka. S obzirom da je izgradnja deponije dugotrajan proces, može se desiti da lica koja započinju njeno projektovanje nisu prisutna na kraju njene eksploatacije. Iz tog razloga je bitno uredno voditi projektantsku dokumentaciju u kojoj je zabeležen svaki detalj od važnosti, kako bi i buduće generacije imale uvid. Takođe, stabilnost na samom početku eksploatacije nije testirana u skladu sa maksimalnom visinom nasipa. Sličan problem može nastati ako se na dnevnom nivou vrši odlaganje količina otpada koje su po projektu maksimalno dozvoljene. Kod hidrauličkih deponija od velike je važnosti kontrolisanje nivoa vode u taložnom jezeru. Onog trenutka kad on postane toliki da dolazi do prekoračenja dozvoljenog nivoa, tada je i rizik izuzetno veliki. Takođe, ukoliko drenažni sistem deponije ne funkcioniše kako treba, porni pritisak u deponiji raste i narušava njenu stabilnost. Otpad koji se odlaže je često reaktivan, te može doći do nekoliko hemijskih reakcija u deponiji što može narušiti njenu stabilnost. Dobro uspostavljen sistem za monitoring deponije je ključan za njenu stabilnost. Sve anomalije se tada mogu uočiti na vreme i sprečiti eventualni udes. Udesi na deponiji često nastaju usled geohazarda, poput zemljotresa i velike količine padavina. Ukoliko se oni ne predvide na vreme i ne izvrši projektovanje sa svešću o njima, može doći do narušavanja stabilnosti deponije. Bitno je deponiju projektovati u skladu sa ispitanim geomehaničkim osobinama otpada koji se odlaže.

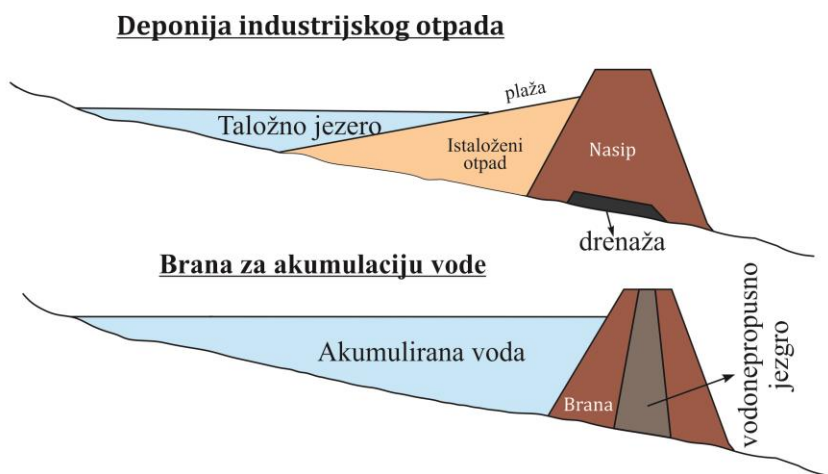
Kada je u pitanju domaća praksa, iako siromašnog opsega delovanja po ovom pitanju, izrodila je jedan koristan dokument pod nazivom „Uputstvo za izradu tehničke dokumentacije o hidrauličkim posledicama rušenja ili oštećenja brana na deponijama jalovine“ u kom su prikazane smernice za prevenciju udesa i upravljanje rizikom na deponijama ovog tipa u Republici Srbiji [56]. Ova dokumentacija zapravo predstavlja zakonsku obavezu investitora i čini hidrotehnički deo „Projekta osmatranja i obaveštavanja na području ugroženom od rušenja brane“.

2.6. Razlike između deponija kao akumulacija vode i kao akumulacija čvrste i tečne faze

Deponije industrijskog otpada se prilikom procene rizika mogu razmatrati na dva načina:

- kao objekti za akumulaciju vode, i
- kao objekti za akumulaciju i čvrste i tečne faze (hidrauličke deponije).

Jedna od osnovnih hipoteza istraživanja, sprovedenih u okviru ovog doktorata, je da deponije ne treba poistovećivati sa branama za akumulaciju vode prilikom procene rizika zbog eventualnog potcenjivanja/precenjivanja rizika njihove eksploatacije. Iz tog razloga je bitno jasno naznačiti sve razlike koje postoje između ove dve vrste objekata, slika 13.



Slika 13. Uprošćena skica deponije industrijskog otpada (gore) i brane za akumulaciju vode (dole)

Osnovne razlike između brana i hidrauličkih deponija industrijskog otpada su date u tabeli 3 [57].

Tabela 3. Osnovne razlike između deponija i brana, modifikovano prema [57]

Komponenta	Deponije	Brane
Akumulirani materijal	Čvrsti otpad + voda (hidromešavina)	Voda + istaloženi mulj do brane pri kraju eksploatacije
Eksploatacioni vek	5-40+ godina	Više od 100 godina ili koliko god je to potrebno
Period izgradnje	Jednak eksploatacionom veku	1-3 godine
Zatvaranje	Dugogodišnji proces jer bi trebalo da se održavaju i kad im se završi eksploatacioni vek	Kompleksan postupak koji se svodi na uklanjanje brane i ispuštanje vode
Posledice udesa	Plavljenje okoline, moguća ekološka i materijalna šteta, mogući ljudski gubici	Iste kao kod deponija industrijskog otpada, mada ekološka šteta može biti znatno manjih razmera [58]
Tehnika izgradnje	Odstupna, nastupna ili metoda centralne linije	Metoda centralne linije uz neizostavno vodonepropusno jezgro

Takođe, bitno je i terminološki razgraničiti ova dva objekta. Branom se na deponiji naziva inicijalni nasip koji se gradi od materijala iz pozajmišta i koji služi za početno okonturenje deponije. Nadgradnja deponije se vrši od samog otpadnog materijala, tzv. jalovine i tada se ovaj element deponije naziva nasip, koji se gradi u etažama, uobičajene visine od 3-5 m. Kako se često poistovećuju sa branama za akumulaciju vode, ovi elementi deponije se u literaturi nazivaju jalovišnim branama.

Kada je rizik u pitanju, za deponije industrijskog otpada važi da imaju deset puta veće šanse za pojavu udesa nego konvencionalne brane za akumulaciju vode [59].

Rizik od rušenja nasipa deponija je veći nego kod brana na vodnim akumulacijama iz više razloga [60]:

- Stabilnost deponija je manja, s obzirom na to da tehnologija njihove nadgradnje podrazumeva da svaki novi sloj, potpuno ili delimično, se naslanja na prethodni muljeviti sloj.
- Nasipi su izloženi većem opterećenju jer je gustina otpada u obliku hidromešavine u deponiji veća od gustine vode.
- Nasipi se formiraju kao objekti od homogenog materijala, najčešće bez vodonepropusnog jezgra, tako da je nivo provirnih voda visok, pa je nedovoljna ili oštećena drenaža često uzrok udesa.
- Nizvodne kosine nasipa se ne štite od erozije.

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

- Efekti likvefakcije su većih razmera kod nasipa nego kod brana.
- Tehnička oskultacija je na nižem nivou kod deponija, nego kod brana.
- Poplavni talasi hidromešavine su za 1-6 m viši u odnosu na vodene talase.

Postoje još neke ključne činjenice koje idu u prilog većem riziku deponija industrijskog otpada, a to su [61]:

- Kod brana na vodnim akumulacijama postoji jasna razlika između materijala od kog se brane grade (beton, kamen, zemlja) i materijala koji se deponuje (voda), dok se kod nasipa deponija ta razlika teško uočava jer se nadgradnja vrši od istog materijala koji se odlaže unutar akumulacionog prostora.
- S obzirom na dugačak period izgradnje deponija industrijskog otpada koji traje praktično koliko i eksploatacioni vek, tokom njenog veka može se promeniti i do 3 generacije radnika koji rade na njenom rukovođenju i održavanju. Osim ako se obuke radnika ne sprovedu po identičnom šablonu, nivo znanja i veština radnika koji rade na održavanju deponije, vremenom opada, a rizik raste.
- Praćenje nivoa vode je relativno lako kod brana na akumulacijama vode jer se izgradnja završava jako brzo. Što duže traje izgradnja, kao kod deponija industrijskog otpada, to je teže kontrolisati nivo vode u njoj duži niz godina.

Takođe, s obzirom na kratak period izgradnje brana na vodnim akumulacijama, one su u startu testirane na maksimalna opterećenja koja se očekuju na kraju eksploatacionog veka, što nije slučaj kod deponija [55].

Shodno navedenim činjenicama, može se zaključiti da je kod akumulacija vode rizik je tokom celog eksploatacionog veka gotovo isti (visina i kapacitet nepromenjeni, posledice približne), da su brana i drugi objekti dobro održavani i da je takva praksa nepromenjena tokom celog veka eksploatacije. Kod deponija industrijskog otpada rizik je promenljiv i raste sa vremenom eksploatacije jer se nivo održavanja stalno menja, zavisno od uspešnosti rada rudnika, politike upravljanja kojom se vlasnik vodi i umešnosti radnika.

Kada je reč o analizi proboja brane/nasipa u slučaju udesa i tu postoje osnovne razlike koje se uzimaju u obzir.

Analiza proboja brana kod akumulacija vode je [62]:

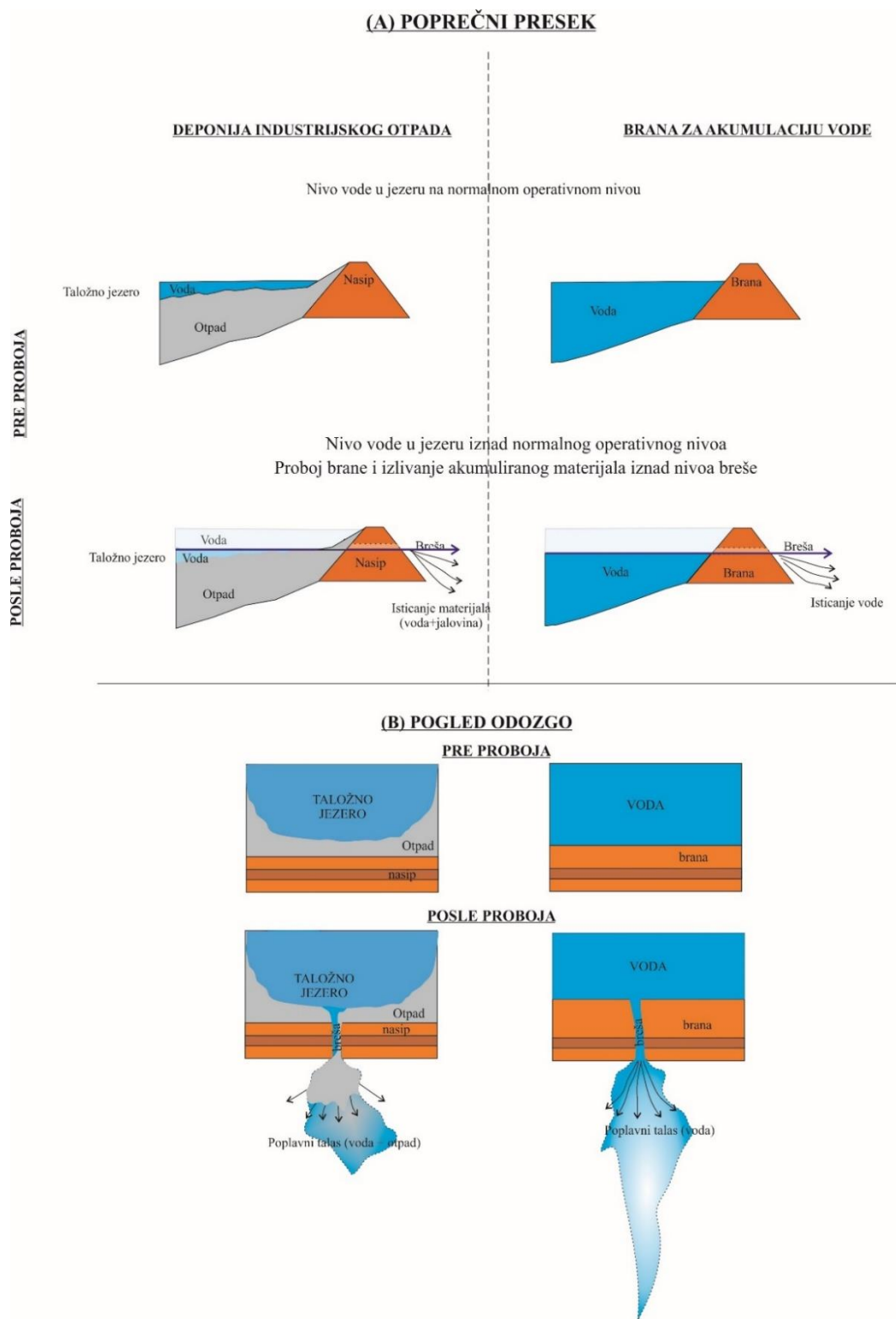
Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

- Relativno jednostavna;
- Postoji mnoštvo razvijenih modela;
- Podržana različitim aplikativnim softverima.

Analiza proboja nasipa deponija industrijskog otpada ukazuje na sledeće činjenice [62]:

- Mnogo je kompleksnija nego kod brana za akumulaciju vode;
- Otpad u obliku hidromešavine je viskozniји od vode i nema slobodni proticaj;
- Pri proboju ne ističe sva hidromešavina iz akumulacionog prostora;
- Softveri/alati za numeričko modeliranje proboja su komplikovani za upotrebu i nema ih dovoljno. Iz tog razloga, često se metodologija/alati za analizu proboja brane za akumulaciju vode primenju na deponijama industrijskog otpada.

Prilikom proboja brane za akumulaciju vode, sva voda koja se nalazi iznad donjeg nivoa breše (otvora u telu nasipa) će isteći, dok je kod deponija kompleksnija analiza ovih količina. Komparacija ova dva slučaja prikazana je na slici 14.



Slika 14. Proboj nasipa i isticanje akumuliranog materijala kod deponija (levo) i brana za akumulaciju vode (desno)

Akumulacije vode su neophodni višenamenski objekti koji služe široj društvenoj zajednici i njihova izgradnja i održavanje se finansira iz javnih prihoda i najčešće se

nalaze blizu naseljenih mesta. Industrijske deponije su u većini slučajeva vezane za privatne i državne kompanije koje posluju na tržištu i koje teže minimizaciji troškova u fazi upravljanja otpadom, te su neprofitabilni ogranak rudnika. Locirane su u blizini rudnika. Dok se akumulacije vode smatraju vrednim i korisnim objektima, deponije su obaveza koja stvara troškove.

Na osnovu svega nabrojanog može se zaključiti da se poistovećivanje akumulacija vode i deponija industrijskog otpada treba uzeti sa velikom rezervom i svešću o svim razlikama.

2.7. Sistemi za klasifikaciju deponija prema rizičnosti

Rizik se ne može proceniti bez znanja o subjektu procene, te bi procena rizika trebalo da uključi sve činjenice koje i sam projekat deponije uključuje. Stoga je preporučljivo uraditi jednostavnu kvalitativnu procenu rizika u vidu klasifikacije prema potencijalnoj opasnosti već u ranoj fazi projektovanja deponije (već pri izboru lokacije), bez zaobilaženja procesa tehnologije deponovanja, eksploatacije, zatvaranja i eventualnog korišćenja nakon zatvaranja [63].

Potrebno je napraviti razliku između klasifikacije prema rizičnosti i procene rizika deponija. Klasifikacija prema rizičnosti je bazirana na značajnosti posledica ili na bazi veličine deponije, bez realnog sagledavanja potencijalnog udesa koji te posledice može izazvati. Dakle, jedna deponija može biti klasifikovana kao rizična iako je u savršeno stabilnom stanju. Značajnost posledica se ocenjuje u najvećoj meri na osnovu broja ugroženih stanovnika, a zatim na osnovu infrastrukture, supstrata životne sredine, kao i spomenika kulture u okolini deponije. Ove činjenice vode do zaključka da se predložene klasifikacije deponija mogu uzeti u obzir, ili kao vid preliminarne procene rizika, ili kao suplementaran korak procene rizika koji sledi pošto se ustanove potencijalni scenariji udesa prilikom procene rizika.

U tabeli 4 dat je pregled zemalja koje su uspostavile svoj sistem za klasifikaciju deponija rudarskog otpada prema rizičnosti. Od 32 zemlje koje su uzete u razmatranje, samo 8 zemalja ima svoj sistem [64].

Tabela 4. Pregled zemalja koje imaju uspostavljen sistem klasifikacije deponija rudarskog otpada [64]

Zemlja	Da li je uspostavljen sistem klasifikovanja deponija rudarskog otpada?	
	DA	NE
Austrija	×	
Belgija		×
Bugarska		×
Češka		×
Danska		×
Estonija	×	
Finska	×	
Francuska		×
Nemačka		×
Grenland		×
Grčka		×
Mađarska		×
Irska		×
Italija		×
Letonija		×
Litvanija		×
Luksemburg		×
Norveška		×
Poljska		×
Portugal	×	
Rumunija		×
Slovačka	×	
Slovenija		×
Španija	×	
Švedska	×	
Holandija		×
V. Britanija	×	
SAD		×
Australija		×
Kanada		×

Zanimljiva je činjenica da su se među tih 8 zemalja koje imaju svoj sistem klasifikovanja našle samo neke u kojima su se u prošlosti dešavali značajni udesi na deponijama, poput Španije (*Los Frailes*, 1998. godine) i Švedske (*Aitik mine*, 2000. godine), za koje se može zaključiti da su bile dovoljno motivisane lošim iskustvom da preduzmu takvu inicijativu. Međutim, mnoge zemlje, u kojima su se dešavale najveći udesi ikada zabeleženi, poput Italije (*Stava*, 1985), Rumunije (*Baia Mare*, 2000) i Bugarske (*Mina Plakalnitsa*, 1966), i dalje nemaju svoje sisteme klasifikacije.

Treba napomenuti da su neke od zemalja sa sopstvenim sistemima klasifikacije deponija zapravo preuzele ili blago modifikovale sisteme za klasifikaciju brana za akumulaciju vode (npr. Švedska, Finska, Austrija i Velika Britanija) [64].

Jedna od najčešće korišćenih klasifikacija u Evropi jeste klasifikacija prema „Direktivi Evropske zajednice o upravljanju otpadom iz ekstraktivne industrije”, koja predlaže jednostavnu podelu deponija na [65]:

- **kategoriju A** - tu spadaju deponije kod kojih:
 - oštećenje ili neregularan rad tj. rušenje nasipa može dovesti do udesa,
 - na kojim se deponuje opasni otpad, i/ili
 - na kojim se deponuje otpad koji se sastoji od supstanci koje su klasifikovane kao opasne, dok su
- sve ostale deponije su **van kategorije A**.

Na osnovu kategorije deponije postaje jasno koja ispitivanja treba preduzeti za dobijanje dozvole i projektovanje, koji faktor sigurnosti treba ostvariti, koji nivo planova za postupanje u hitnim slučajevima treba pripremiti i koji stepen materijalnog osiguranja treba obezbediti [65].

Nakon udesa na deponiji pepela Kingston u SAD-u 22. decembra 2008. godine kada je iz deponije isteklo preko 4 miliona m³ pepela, Američka agencija za zaštitu životne sredine (EPA) se ozbiljno pozabavila bezbednošću deponija pepela i šljake [66]. Uspostavljen je sistem klasifikovanja deponija prema potencijalnoj opasnosti po oblasti uzvodno i/ili nizvodno, ili na oblasti udaljene od deponije. Ovaj sistem klasifikovanja se bazira na FEMA (*Federal Guidelines for Dam Safety*) klasifikaciji i usvojena su tri nivoa potencijalne opasnosti, tabela 5 [63].

Tabela 5. Klasifikacija deponija prema potencijalnoj opasnosti po okolinu [63]

Klasa	Potencijalna opasnost	Gubitak ljudskih života	Ekonomski, ekološki i drugi gubici
1	Mala	Nije očekivan	Mali i lokalizovani na deponiju
2	Značajna	Nije očekivan	Mogući
3	Velika	Moguć, jedna ili više žrtava	Da (ali ne nužno)

Kod ove klasifikacije termini mala, velika i značajna opasnost se odnose na potencijal da se dogodi neka šteta ili da dođe do gubitka ljudskih života, a ne na nivo održavanosti

deponije. Na primer, deponije svrstane u klasu 1 (mala potencijalna opasnost) mogu biti u lošem stanju, kao što i deponije iz klase 3 (velika potencijalna opasnost) mogu biti u dobrom stanju. Takođe, ova klasifikacija se može promeniti usled promene uslova okruženja (npr. izgradnje novih kuća u blizini). Kada je u pitanju klasa 2, činjenicu da se ljudske žrtve ne očekuju, ne treba uzeti kao fiksni parametar za klasifikaciju. Iako nema direktnog gubitka ljudskih života, udes može, na primer, odneti čitavu saobraćajnicu i time indirektno dovesti do ljudskih žrtava [63].

S obzirom da je rizik u funkciji posledica i verovatnoće da dođe do udesa, stanje deponije igra veliku ulogu u celokupnoj opasnosti koja pretili okolini, a koje ovaj sistem klasifikacije ne uzima u obzir. Stoga, dobijeni rezultati mogu biti nerealno precenjeni.

Kada se govori o deponiji kao objektu za akumulaciju vode, brane se mogu klasifikovati prema veličini, po sistemu koji je predložio Američki vojni departman, (1979). Klasifikacija se vrši na osnovu veličine akumulacionog prostora ili na osnovu visine brane, u zavisnosti od toga koji od ova dva parametra svrstava deponiju u višu kategoriju, tabela 6 [67].

Tabela 6. Klasifikacija deponija prema veličini, modifikovano prema [67]

Kategorija	Akumulacioni prostor [m ³]	Visina [m]
Mala	<1.233.482 i 61.674	<12,2 i 7,6
Srednja	61.674.092 i <1.233.482	12,2 i < 30,5
Velika	61.674.092	30,5

Ova klasifikacija je razvijena prvenstveno za akumulacije vode. Ako se zanemari činjenica da su predložene veličine parametara prvobitne izražene u anglosaksonskim mernim jedinicama, nakon konverzije u SI sistem dobijaju nepraktične opsege i može se primetiti da su upravo ti opsezi teški za tumačenje. U obzir su uzeti samo opsezi manji od predloženih veličina, dok ostaje nejasno kako svrstati brane čije su dimenzije manje od 61.674 m³ (akumulacioni prostor) i 7,6 m (visina), i veće od 61.674.092 m³ (akumulacioni prostor) i 30,5 m (visina).

Internacionalni komitet za visoke brane (ICOLD) je brane svrstao u dve kategorije, male i visoke, na osnovu visine brane i zapremine akumulacionog prostora [68]. Na osnovu

inavedenih parametara, brana se može svrstati i u neku kategoriju opasnosti, kako je to predložio Francuski komitet za visoke brane [69].

U visoke brane spadaju brane koje su [68]:

- više od 15 m, mereno od najniže temeljne tačke do najviše tačke (objekta) na kruni brane, ili
- brane više od 10, a niže od 15 m u sledećim uslovima:
 - dužina brane je veća od 500 m,
 - kapacitet akumulacionog prostora je iznad 3 miliona m³,
 - kapacitet plavljenja je iznad 2000 m³/s, i
 - brane neuobičajenih karakteristika.

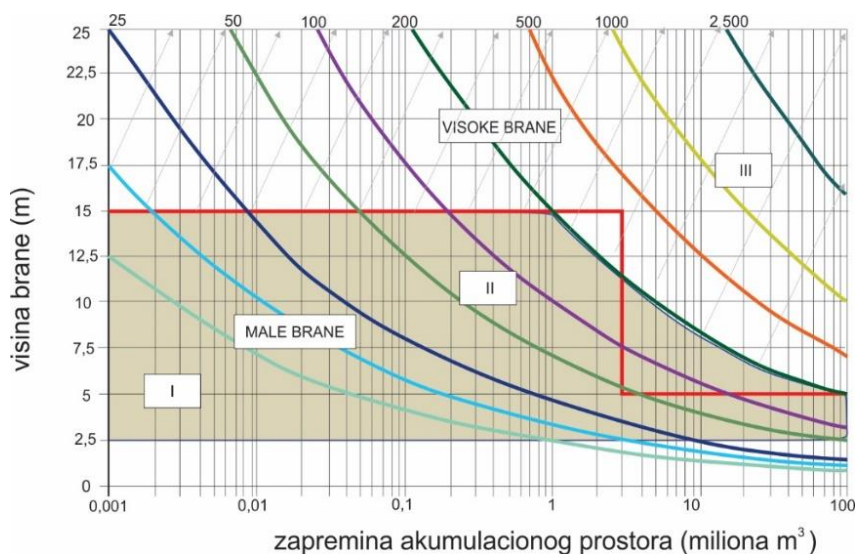
U male brane spadaju brane koje zadovoljavaju kriterijume: $2,5 \text{ m} < H < 15 \text{ m}$ i $H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$, pri čemu je H visina, u metrima, koja se meri od osnove do krune brane, a V zapremina akumulacionog prostora, u milionima m³, na maksimalnom operativnom nivou [68].

Francuski komitet za visoke brane je na osnovu ovih parametara, prema formuli $H^2 \cdot \sqrt{V}$ predložio 3 kategorije potencijalne opasnosti, tabela 7. Svaka kategorija predlaže nivoe različitih rizika: rizik po ljudske živote, ekonomskog, ekološkog rizika i veličinu socijalnih nemira [69].

Tabela 7. Klasifikacija brana prema potencijalnoj kategoriji opasnosti [69]

	Potencijalna kategorija opasnosti		
	Niska (I)	Srednja (II)	Visoka (III)
$H^2 \cdot \sqrt{V}$	$H^2 \cdot \sqrt{V} < 20$	$20 < H^2 \cdot \sqrt{V} < 200$	$H^2 \cdot \sqrt{V} \geq 200$
Rizik po ljudske živote	~0	<10	≥10
Ekonomski rizik	Nizak	Umeren	Visok ili ekstreman
Ekološki rizik	Nizak ili umeren	Visok	Ekstreman
Socijalni nemiri	Mali (ruralna sredina)	Regionalni	Nacionalni

Obe klasifikacije su sublimirane i prikazane na slici 15.



Slika 15. Podela na male i visoke brane i kategorije opasnosti, modifikovano prema [68, 69]

Iako nemaju veliki naučni doprinos i daju površni pristup deponiji sa aspekta rizika, ove klasifikacije mogu poslužiti kao međukorak ka daljim procenama.

Tako je ICOLD razradio jedan od najčešće korišćenih sistema za vrednovanje rizika za brane koje su prethodno svrstane u visoke. Rizik se može proceniti na osnovu parametara datih u tabeli 8, čija kvantifikacija na osnovu predloženih težinskih faktora vodi do krajnjeg nivoa rizika u tabeli 9 [70].

Tabela 8. Parametri koji učestvuju u proceni rizika kod visokih brana [70]

Faktor rizika	Ekstreman	Visok	Umeren	Nizak
Kapacitet, Mm ³	>120	1-120	0,1-1	<1
težinski faktor	(6)	(4)	(2)	(0)
Visina, m	> 45	30-45	15-30	<15
težinski faktor	(6)	(4)	(2)	(0)
Broj lica koje treba evakuisati	> 1000	100-1000	1-100	0
težinski faktor	(12)	(8)	(4)	(0)
Šteta, nizvodno	Visoka	Umerena	Mala	Nema
težinski faktor	(12)	(8)	(4)	(0)

Tabela 9. Klasa rizika [70]

Ukupni faktor rizika	Klasa rizika
0 – 6	I (Nizak)
7 – 18	II (Umeren)
19 - 30	III (Visok)
31 - 36	IV (Ekstreman)

Kod ove klasifikacije se mogu uočiti neke nelogičnosti. Klasifikacija je prvenstveno zasnovana na visokim branama. U klasifikaciji je korak povećanja visine brane 15 m. Ako se uzme u obzir da u visoke brane spadaju brane visine >15 m, odnosno od 10-15 m ako su dužine preko 500 m, a kapacitet akumulacionog prostora iznad 3 miliona m^3 , evidentno je da su klasifikacijom obuhvaćene i male brane, koje se ne smatraju inicijalno visokorizičnim deponijama.

Usled neravnomerne raspodele težinskih faktora po klasama rizika (po 6 u prvoj i četvrtoj i 12 u drugoj i trećoj), dolazi do favorizovanja deponija čija je eksploatacija umereno i visoko rizična. Takođe, ako se uzme u obzir samo prva klasa rizika čiji je ukupni faktor od 0-6, može se zaključiti da matematički u ovu klasu, između ostalih, spadaju deponije ispod 1 milion m^3 i niže od 30 m, pod uslovom da nema ugroženog stanovništva i štete u okruženju. Deponija ovih dimenzija ima površinu oko 5 ha i oblik „toranjske“ deponije. Ako je pak ta deponija hidraulička, njena ekonomičnost, tehnička prihvatljivost, i na kraju, stabilnost apsolutno nije održiva. Iako je uzet u obzir ekstremni slučaj deponije, ovaj primer ukazuje na naučnu neosnovanost same klasifikacije.

Klasifikacija koju je predložilo Novozelandsko udruženje za visoke brane (NZSOLD) u obzir uzima gotovo sve faktore koji figurišu u veličini uticaja udesa na okolinu. Zasniva se na proceni potencijalnog uticaja udesa na osnovu tri ključna parametra štete: nivoa štete, populacije izložene riziku i broja potencijalnih ljudskih žrtava [71].

Prvo se sveukupna šteta svrsta u jednu od četiri kategorije prema šteti po stambene objekte, infrastrukturu, životnu sredinu i vremenu oporavka, tabela 10.

Tabela 10. Utvrđivanje nivoa štete [71]

Nivo štete	Stambeni objekti	Kritična infrastruktura ¹		Životna sredina	Potrebno vreme oporavka
		Šteta	Potrebno vreme reparacije ²		
Katastrofalna	>50 objekta uništeno ³	Obimna šteta na nekoliko glavnih infrastrukturnih objekata	>1 god.	Obimna šteta	Mnogo godina
Velika	4-49 objekta uništeno a određen broj oštećen	Obimna šteta na više od jednog infrastrukturnog objekta	Do 1 god.	Velika šteta i veliki troškovi oporavljanja	Godine
Umerena	1-3 objekta uništeno, a neki su oštećeni	Značajna šteta na bar jedan infrastrukturni objekat	Do 3 meseca	Značajna šteta koja se može lako sanirati	Meseci
Mala	Manja šteta	Manja šteta na glavne infrastrukturne objekte	Do 1 nedelje	Kratkoročna šteta	Od nekoliko dana do nekoliko nedelja

Nakon toga se, na osnovu usvojenog nivoa štete i populacije koja je izložena riziku i broja potencijalnih žrtava, usvaja klasa potencijalnog uticaja, tabela 11.

¹ Podrazumeva objekte poput električnih dalekovoda, transportnih sistema, telekomunikacionih objekata, objekata za prečišćavanje vode, vatrogasnih i policijskih stanica, bolnica, industrijskih postrojenja i sl.

² Vreme potrebno za vraćanje u normalno operativno stanje.

³ Pod „uništeno“ se misli na neadekvatno za život.

Tabela 11. Utvrđivanje potencijalnog uticaja [71]

Nivo štete	Populacija izložena riziku ⁴			
	0	1-10	11-100	100
Katastrofalna	Visok potencijalni uticaj	Visok	Visok	Visok
Velika	Srednji potencijalni uticaj	Srednji/visok (napomena 4)	Visok	Visok
Umerena	Nizak potencijalni uticaj	Nizak/srednji/visok (napomena 3 i 4)	Srednji/visok (napomena 4)	Srednji/visok (napomena 2 i 4)
Mala	Nizak potencijalni uticaj	Nizak/srednji/visok (napomena 1, 3 i 4)	Nizak/srednji/visok (napomena 1, 3 i 4)	Nizak/srednji/visok (napomena 1, 3 i 4)

Napomena:

- 1. Ako populacija izložena riziku broji 5 ili više ljudi, nemoguće je da potencijalni uticaj nizak.*
- 2. Ako populacija izložena riziku broji više od 100 ljudi, nemoguće je da potencijalni uticaj srednji.*
- 3. Ako bi došlo do jedne ljudske žrtve, onda je potencijalni uticaj srednji.*
- 4. Ako bi došlo do dve ili više ljudskih žrtava, onda je potencijalni uticaj visok.*

Može se zaključiti da je klasifikacija prema rizičnosti u potpunosti zasnovana na posledicama. Međutim, da bi se uticaj jedne brane u potpunosti sagledao, potrebno je u procenu uvrstiti verovatnoću da do udesa dođe, što u ovoj klasifikaciji izostaje.

Dakle, ova klasifikacija se, u eventualnoj službi procene rizika, može razmatrati samo kao alat za procenu posledica, a koje zajedno sa procenjenom verovatnoćom udesa mogu pretpostaviti realan nivo rizika.

⁴ Populacija koja je direktno izložena udesu.

3. UDESI NA DEPONIJAMA INDUSTRIJSKOG OTPADA MINERALNOG POREKLA

Udes je svaki neželjeni događaj koji nastaje usled neke neregularnosti, a koji može imati posledice po okolinu i ljudstvo. Njegove razmere mogu biti širokog opsega, te je bitno ustanoviti kriterijume kada će se razmatrati kao manji poremećaj, incident, a kada kao havarija, odnosno, katastrofa. Pod kriterijumima se prvenstveno misli na posledice koje udes može prouzrokovati.

U [6] se navodi da je havarija svaka šteta, nezgoda, ili kvar uopšte. Prema ovakvoj formulaciji, sinonimi havarije su i akcident i incident. Međutim, sa inženjerskog aspekta, i te kako postoji razlika između ovih tipova udesa.

Kako je navedeno u [17] „*tehničko-tehnološki udes je iznenadni i nekontrolisani događaj ili niz događaja koji je izmakao kontroli prilikom upravljanja određenim sredstvima za rad i prilikom postupanja sa opasnim materijalima u proizvodnji, upotrebi, transportu, prometu, preradi, skladištenju i odlaganju kao što su požar, eksplozija, havarija, saobraćajni udes u drumskom, rečnom, železničkom saobraćaju, udes u rudnicima i tunelima, zastoj žičara za transport ljudi, rušenje brana, havarija na elektroenergetskim, naftnim i gasnim postrojenjima, akcidenti pri rukovanju radioaktivnim i nuklearnim materijama... a čije posledice ugrožavaju bezbednost i živote ljudi, materijalna dobra i životnu sredinu*“.

Prema mišljenju navedenom u [72] „*u havarije, na stacionarnim objektima, svrstavaju se udesi u proizvodnim sistemima, magacinima i rezervoarima, kao i na stacionarnim cevovodima, transportnim trakama i slično, u okviru nekog proizvodnog sistema*“.

Prema Programu Ujedinjenih nacija za životnu sredinu „*katastrofa je tip ozbiljnog poremećaja koji može prouzrokovati veliku materijalnu, ekološku štetu i naškoditi ljudima pri čemu su razmere posledica takve da društvo nema dovoljno sredstava da ih prevaziđe*“ [73].

Udesi na deponijama se ubrajaju u katastrofe na osnovu sledećih činjenica [74]:

- Male verovatnoće nastanka;
- Nemoguće je da se prebrode u izvesnoj meri;

- Deponija je veštačka tvorevina velike zapremine i potencijalne energije i u odnosu na prirodne katastrofe, a udes na deponiji je lakše kontrolisati, iako lako može nastati kao sporedni efekat neke prirodne katastrofe;
- Šteta koju udes na deponiji prouzorkuje je velikih razmera s obzirom da su ugrožena populacija, imovina i životna sredina često u neposrednoj blizini.

Kako je navedeno u [75], prirodne i katastrofe izazvane ljudskim faktorom se jasno mogu razdvojiti, te se prirodne katastrofe definišu kao događaji izazvani prirodnim silama, poput zemljotresa, poplava, šumskih požara, oluja i sl., dok su katastrofe događaji prouzrokovani ljudskim aktivnostima, pri čemu su izuzeti ratovi. Uspostavljen je kriterijum 2016. godine po kom se u katastrofe svrstavaju događaji čiji ekonomski gubici prelaze 99 miliona dolara, 20 ljudskih žrtava, 50 povređenih ljudi i 2000 raseljenih lica.

Udesi na deponijama se mogu podeliti u pet kategorija ozbiljnosti koje su definisane na osnovu zabeleženih slučajeva u prošlosti i posledica koje su prouzorkovali, tabela 12 [47, 76].

Tabela 12. Kategorije udesa [47, 76]

Kategorija	Opis kategorije	Boja kategorije	Opis posledica	Broj zabeleženih udesa u svetu [47]	
				ukupno	%
1	Veoma ozbiljni udesi		Veći broj ljudskih žrtava (~20) i/ili isticanje $\geq 1 \text{ Mm}^3$ materijala sa pređenim rastojanjem $\geq 20 \text{ km}$.	44	15
2	Ozbiljni udesi		Moguće ljudske žrtve i/ili isticanje $\geq 100.000 \text{ m}^3$ materijala.	51	17
3	Drugi udesi		Udesi koji ne spadaju u grupu veoma ozbiljnih i ozbiljnih udesa, nema ljudskih žrtava.	185	62
4	Drugi poremećaji		Udesi koji ne spadaju u kategoriju 1, 2 ili 3.	9	3
5	Nepoznata kategorija udesa ili udes koji nije u vezi sa jalovinom		Zagađenje površinskih/podzemnih voda, vazduha, zemljišta, incidenti na odlagalištima otkrivke itd.	8	3
				Σ 297	100

Na osnovu rezultata iz tabele 12 može se zaključiti da su udesi srednje značajnosti (3. kategorija) bili najčešći na deponijama, mada se broj veoma ozbiljnih i ozbiljnih udesa ne može zanemariti jer čine gotovo 1/3 zabeleženih udesa.

3.1. Lekcije naučene iz zabeleženih udesa na deponijama

Od ključnog značaja za procenu rizika eksploatacije jedne deponije je razumeti potencijalnu opasnost koja joj pretila i koja može izazvati udes. Sa tim ciljem dobro je osvrnuti se na zabeležene istorijske udesa i učiti se na tuđim greškama. Predsednik ICOLD-a je rekao da „čovek malo uči na uspesima, a mnogo na greškama” [29].

Do samog udesa može doći usled eksternih činilaca, poput zemljotresa ili obilnih padavina, i/ili usled unutrašnjih činilaca, koji potiču od lošeg upravljanja deponijom i neadekvatnog održavanja njene stabilnosti. Na delovanje eksternih činilaca se ne može uticati, ali na ranjivost može, tako što se deponija projektuje da može da odoli svim elementarnim nepogodama.

Ono što se u globalu može zaključiti jeste da se udesi na deponijama retko dešavaju iznenada, čak i kada imaju trenutno dejstvo, poput likvefakcije, jer sam udes nastupa pod dejstvom mnogih faktora koji superponiranjem dovode do fatalnih posledica.

Sagledavanje zabeleženih udesa u prošlosti može imati značajnu ulogu u proceni rizika. Ovo posebno ima značaj kada su [77]:

- Zabeleženi slučajevi detaljno i tačno opisani;
- Autori koji su pisali izveštaje o udesima kritički i objektivno proučili i opisali šta se desilo;
- Deponije na kojima se udes desio slične onima koje su predmet proučavanja.

Tokom razmatranja udesa koji su se dešavali u prošlosti, došlo se do dva najvažnija zaključka [32]:

- Ne postoje nerazjašnjene okolnosti udesa. Svaki događaj je u potpunosti predvidiv. Ne postoje nepoznati uzroci udesa, misteriozni zakoni mehanike stena, uticaj „Božije“ volje i promenljivog ponašanja deponije [78];
- Udesi su se uvek dešavali na deponijama na kojima su postojali propusti prilikom projektovanja, izgradnje ili eksploatacije. Mnogi propusti su se dešavali kao rezultat

operativne prakse koja nije usklađena sa zahtevima projekta, ili obrnuto. Ovo ne znači da se propusti u projektovanju mogu nadomestiti dobrom operativnom praksom, niti da dobro isprojektovana deponijama može da podnese neadekvatno upravljanje. To samo ukazuje na činjenicu da su šanse za udes uvećane kada su propusti evidentni i sa jednog i sa drugog aspekta.

Ima čak i ekstremnih mišljenja, da u istoriji rudarstva nije zabeležen slučaj eksploatacije neke deponije bez ijedne udesne situacije, manjih ili većih razmera [79].

Razume se, ovo nije apsolutno tačno, ali je najveći broj udesa bez značajnijih posledica i sa limitiranim lokalnim uticajem, tako da se o njima ni ne vodi posebna evidencija. O udesima većih razmera vodi se evidencija [29, 47, 80, 81, 82].

Na osnovu baze od 297 zabeleženih udesa na deponijama u svetu, u periodu od 1915-2017. godine, može se konstatovati da su [78]:

- Prelivanje, zemljotresi i nestabilnost kosina u kategoriji udesa sa najvećom frekvencijom (42-48 udesa iz svake potkategorije).
- Na drugom mestu udesi usled procurivanja i poremećaja u strukturi nasipa (20-25 udesa iz svake potkategorije), dok su
- Na trećem mestu udesi usled erozije i unutrašnje erozije, kojih je bilo ukupno 11. Ipak, treba imati u vidu da je čak 26% zabeleženih udesa nepoznatog tipa, što bi moglo uticati na sumarne rezultate da su njihovi uzroci poznati [47].

Takođe, dokazano je sledeće [78]:

- Deponije građene nastupnom metodom imaju najveći broj zabeleženih udesa, sa velikim brojem zabeleženih udesa usled likvefakcije, iako ova konstatacija nije pravična jer je nastupna metoda najstarija i najčešće primenjivana u izgradnji deponija.
- Nestabilnost kosina/zemljotresi se vezuju za 2/3 svih udesa na deponijama izgrađenih nastupnom metodom.
- Udesi vezani za procurivanje se vezuju za sve deponije građene metodom različitom od nastupne.
- Za neaktivne deponije glavni tip udesa bilo je preliivanje preko krune nasipa, što je svakako posledica nekorektno izvedenih mera zatvaranja.

- Posledice udesa nisu nužno u korelaciji sa velikom visinom ili zapreminom deponije, kao na primer u slučaju udesa na deponiji Stava u Italiji, čija je visina u trenutku udesa bila oko 50 m, a zapremina oko 250.000 m³, a kada je isteklo oko 180.000 m³ i poginulo 268 ljudi [83]. Ova deponija se ne ubraja u najveće deponije na svetu, a opet je udes koji se dogodio okarakterisan kao jedna od najvećih katastrofa na deponijama.
- Češće je dolazilo do udesa kod manjih deponija, koje su često privremene i kojima se nije upravljalo na adekvatan način [47].
- Broj udesa po deceniji se skoro prepolovio od 2000. godine pa na ovamo, u odnosu na period od 1960-1980. godine [47].
- Broj udesa u industrijski razvijenim zemljama je u porastu u odnosu na zemlje u razvoju, a kao posledica zaoštavanja savremenih ekonomskih odnosa i težnje za profitom po svaku cenu. Međutim, ne treba zanemariti da se preciznija evidencija udesa vodi u razvijenim zemljama.

Zabeleženi udesi svedoče o tome da aktivne deponije imaju pet puta veći potencijal udesa nego neaktivne. Prilikom analize zabeleženih udesa u Evropi, čak 83% se desilo na aktivnim deponijama, 15% na neaktivnim i napuštenim deponijama, a svega 2% na neaktivnim, ali održanim deponijama [78, 81]. U Kini se čak 95% udesa desila u toku aktivne eksploatacije deponija [84].

Ipak, treba naglasiti da se manja rizičnost neaktivnih deponija prvenstveno pripisuje onim koje su adekvatno zatvorene suvom metodom. Kod deponija zatvorenih mokrom metodom ne može se dugoročno garantovati stabilnost [58].

Činjenice koje idu u prilog manje rizičnosti deponija zatvorenih suvom metodom su:

- Nema taložnog jezera i slobodne vode;
- Bolja konsolidacija i veći stepen zbijenosti deponovanog materijala;
- Potpuna izdreniranost. Jedina voda koja se nalazi u ovim deponijama je voda u porama u vidu tankog filma [85];
- Po prestanku eksploatacije, na površini deponije se namenski ili spontano formira biopokrivač koji atmosfersku vodu veže i sprečava prodiranje kiseonika [86, 87];

- Dolazi do nastanka spontanijih i jako sporih hemijskih reakcija između minerala u otpadu i do procesa cementacije⁵ materijala tokom vremena [88, 89, 90];
- Generalno, neaktivnim deponijama treba posvećivati više pažnje zbog dugoročnih efekata eolske erozije, kontaminacije podzemnih voda i velikih troškova remedijacije [53].

Utvrđeno je da je verovatnoća da dođe do udesa na suvim deponijama $2,9 \times 10^{-4}$, dok je kod mokrih $7,8 \times 10^{-4}$ [31].

Kod aktivnih deponija najveća verovatnoća da dođe do udesa je već u prvoj godini eksploatacije deponije, odmah nakon prvog zapunjavanja [91]. Iako je broj zabeleženih udesa u skorijoj prošlosti mnogo manji, i dalje nije zanemarljiv. U poslednjoj deceniji čak 40 udesa na deponijama industrijskog otpada je zabeležen, a 8 od tih 40 je praćeno isticanjem značajne količine otpada u okolinu koje je prouzrokovalo više ljudskih žrtava [47].

Što se udesa na deponijama u Srbiji tiče, može se zaključiti da su udesi bili lokalnog karaktera, bez ljudskih žrtava. Od ukupnog broja zabeleženih udesnih događaja kod nas, posmatrano u vremenskom periodu od poslednjih 30 godina, udesi su zabeleženi na 11 flotacijskih jalovišta, i 2 deponije pepela i šljake, na kojima je došlo do proboja i preliivanja preko nasipa.

3.2. Scenario udesa

Prema FMEA tehnici procene rizika, prvi korak je definisanje scenarija potencijalnog udesa do kog može doći na deponiji. Scenario udesa je mehanizam po kom se udes odvija [92].

Svi scenariji udesa se inicijalno mogu podeliti na dva tipa [62]:

1. Scenario “Sunčan dan” – kada je nivo vode u taložnom jezeru na normalnom operativnom nivou, normalan protok u vodotocima nizvodno od deponije i udes na deponiji ne nastupa usled velikog priliva vode, kao inicijatora udesa.

⁵ Sekundarno bogaćenje minerala.

2. Scenario "Kišovit dan" – kada je usled velikog priliva atmosferskih padavina nivo vode u taložnom jezeru visok, iznad dozvoljenog operativnog nivoa, kao i nivo vode u vodotocima nizvodno od deponija, što povećava verovatnoću njihovog sudelovanja u udesu. Udes nastupa isključivo zbog visokog nivoa vode u deponiji.

Interakcija između različitih poremećaja u vidu „domino“ efekta je česta pojava, te je potrebno sagledati deponiju kao kompleksan sistem u kom svaki element ima ulogu u održanju njene stabilnosti.

Iako prema FMEA tehnici za procenu rizika nije nužno ustanoviti inicijalni događaj koji može dovesti do udesa, ako je cilj isključivo kvalitativna procena rizika, ovaj korak može biti koristan prilikom procene verovatnoće udesa i prioritizacije rizika [33].

Kako je navedeno u [33] prilikom kreiranja scenarija udesa, potrebno je fazno analizirati eksploatacioni vek jedne deponije. U te svrhe dovoljno je posmatrati dva ključna parametra deponije: nivo taložnog jezera i nivo istaloženog čvrstog otpada. S obzirom da povećanje nivoa taložnog jezera povećava verovatnoću naglog curenja, interne erozije ili hidrauličkog gradijenta, a povećanje nivoa istaloženog čvrstog otpada dovodi do zgušnjavanja ranije odloženog otpada i smanjenja brzine curenja usled svoje sitne krupnoće, za razmatranje najgoreg mogućeg scenarija, u obzir se uzima faza eksploatacije deponije kada je maksimalni mogući nivo taložnog jezera. Ovom parametru bi za potrebe najgoreg mogućeg scenarija udesa mogla da se doda i pretpostavljena maksimalna visina deponije.

U [31] je predloženo 5 osnovnih tipova udesa:

- Prelivanje – kada do udesa dolazi usled priliva velike količine atmosferskih padavina koja nadmašuje kapacitet deponije da prihvati tu vodu.
- Unutrašnja erozija – kada udes nastupa usled stvaranja kanala u samom telu nasipa, pa dolazi do isticanja odloženog materijala kroz nasip.
- Statička likvefakcija – kada udes nastupa usled naglog povećanja poreznog pritiska i smanjenja nosivosti tla.
- Statička nestabilnost kosina – kada do udesa dolazi jer su spoljne sile kojima je izložen nasip deponije veće od čvrstoće smicanja materijala od kog je izgrađen.
- Seizmička nestabilnost kosina – kada udes nastupa usled nekog dinamičkog potresa, najčešće zemljotresa.

Ovih pet tipova udesa imaju različit mehanizam delovanja. Procurivanje je obuhvaćeno unutrašnjom erozijom, dok je seizmička likvefakcija u sklopu seizmičke nestabilnosti kosina. Ono što je zajedničko ovim tipovima udesa jeste da mogu rezultovati isticanjem odloženog materijala izvan deponije. Prelivanje i unutrašnja erozija se ne uzimaju u obzir kod suvih tipova deponije, s obzirom na to da nema slobodne vode u deponiji. Ustanovljeno je da najmanju predoređenu verovatnoću nastanka ima seizmička nestabilnost kosina, dok najveći ima statička likvefakcija [31].

Predložena podela bi mogla da prihvati kao adekvatna za modeliranje scenarija udesa, uz blagu modifikaciju u vidu jednoznačnog razmatranja potencijala likvefakcije. Iako statička i seizmička likvefakcija ne nastaju usled istog uzroka, mehanizam delovanja im je isti. Sa druge strane, zemljotres ne mora nužno izazvati likvefakciju. Da bi došlo do bilo koje vrste likvefakcije, materijal prvenstveno treba biti sklon likvefakciji.

Prelivanje

Prelivanje je udes koji se dešava usled priliva velike količine atmosferskih padavina u akumulacioni prostor deponije koji ne može da ih prihvati. Počinje isticanjem vode preko krune nasipa, najčešće na najnižem delu deponije, a u zavisnosti od otpornosti na eroziju materijala od kog je sačinjen nasip, može doći i do pojave breše u njenom telu kroz koju takođe ističe deponovani materijal [93]. Veličina breše zavisi od nivoa erozije spoljne kosine nasipa usled prelivanja. Što je viša linija saturacije, to su veće posledice rušenja nasipa [94]. Kada prelivanje krene, teško se zaustavlja. Kada nizvodna kosina nasipa nije previše dugačka, najintenzivnija erozija se odigrava pri nožici nasipa, usled čega dolazi do povećanja nagiba spoljašnje kosine [95]. Breša u telu nasipa se širi prvenstveno vertikalno do nožice, pa potom i horizontalno [96].

Prelivanje je najčešće povezano sa vremenskim nepogodama kao što su velike kiše ili naglo topljenje snega. Može se manifestovati kao [31]:

- Konstantno prelivanje – koje se dešava usled povećanja nivoa vode u akumulacionom prostoru, erodovanjem krune nasipa i isticanjem vode preko krune, i
- Talasno prelivanje – koje se dešava najčešće usled jakih vetrova.

Likvefakcija

Likvefakcija je pojava koja se najčešće dešava kod peskovitih tala, zasićenih vodom, poput deponija industrijskog otpada, kada usled porasta pornog pritiska odloženi materijal ima tendenciju da smanji svoju zapreminu preraspodelom čestica. Tada dolazi do razvodnjavanja deponovanog materijala koji počinje da teče jer nije u stanju da se suprostavi većim silama smicanja, što uslovljava rušenje nasipa i naglo isticanje deponovanog materijala [34, 97, 98, 99, 100, 101].

Likvefakcija može biti:

- seizmička, usled dinamičkog opterećenja, i
- statička, usled statičkog opterećenja.

I jednoj i drugoj je zajedničko povećanje pornog pritiska i smanjenje čvrstoće smicanja odloženog materijala, dok su razlozi koji su do toga doveli, različiti. Na osnovu zabeleženih slučajeva udesa usled likvefakcije, veći broj udesa se dešavao upravo usled statičke likvefakcije [29].

Glavna karakteristika likvefikovanog materijala je da on ima meta-stabilnu, rastresitu ili poroznu strukturu. Smanjenje čvrstoće smicanja dovodi do toga da materijal poprima polutečno stanje i dolazi do njegovog tečenja [102].

Statička nestabilnost kosina

Po pravilu nestabilnost kosina ne nastaje trenutno i ne dovodi do nenajavljenog rušenja. Osnovni znaci koji ukazuju na nestabilnost kosina su povećanje pornog pritiska i izdizanje linije provirne vode što dovodi do kvašenja nožice nasipa i izbijanja vode na nizvodnoj kosini. Ovo kvašenje postaje opasno kada dolazi do „klizanja“ materijala i narušavanja strukture, a posebno kada dolazi do sufozije. Kada je u pitanju prenaprezanje, lako se uočava pojavljivanje zatežućih pukotina u gornjem delu nasipa, odnosno ispuščenja u donjem delu nasipa [29].

Seizmička nestabilnost kosina

Seizmička nestabilnost nastaje usled delovanja dinamičkih sila, a manifestuju se kao pomeranje tla. Efekti dinamičkog potresa na deponiju mogu biti trenutnog ili odloženog dejstva.

Ako se izuzme likvefakcija kao mogući efekat, zemljotres obično dovodi do deformacija na kruni nasipa i nizvodnim kosinama nasipa, kao i do oštećenja hidrotehničkih elemenata deponije, poput tunela, drenaže, šahtova i sl. [34].

Na ovaj način zemljotresi mogu da dovedu deponiju i nasip u stanje da njeni elementi ne funkcionišu, čime se stiču uslovi da dođe do preliivanja preko krune nasipa usled neodvođenja viška vode, do filtracionih poremećaja usled oštećenja drenaža i sl. Takođe, ukoliko se u blizini deponije nalazi aktivni rudnik, aktivnosti koje se odvijaju u njemu, poput miniranja, rada rudničke mehanizacije i sl., mogu izazvati dinamičke potrese i efekte na deponiju slične onima usled zemljotresa [29].

Unutrašnja erozija

Unutrašnja erozija predstavlja iznošenje sitnog materijala od kog je nasip izgrađen iz njegove strukture pod dejstvom vode. Erozija se može razviti gde god postoji privilegovani tok vode kroz nasip, pod čijim dejstvom dolazi do stvaranja kanala koji se vremenom šire i stvaraju prostor za iznošenje materijala iz nasipa. Dešava se na granicama između sitnijeg i krupnijeg materijala. Ova pojava može biti opasna jer dovodi do narušavanja unutrašnje strukture nasipa [34, 103, 104, 105]. Kao krajnja posledica unutrašnje erozije dolazi do potpunog rušenja nasipa i izlivanja deponovanog materijala, kao što je to bio slučaj 1976. godine sa Teton branom u Ajdahu, visine od oko 90 m, koja je u toku svog prvog punjenja doživela kolaps. Došlo je do izlivanja 4 miliona m³ vode pri čemu je zabeženo 11 ljudskih žrtava i načinjena je višemilionska šteta [106].

Najsitnije čestice su te koje su pokretne. One se mogu zaustaviti unutar nasipa, kada ne dolazi do promene u zapremini, samo do redistribucije, ili mogu biti iznešene iz njega. U zoni njihovog uklanjanja dolazi do porasta poroznosti i permeabilnosti, što utiče na povećanje sile koja deluje na krupnije čestice u nasipu, usled čega one ne uspevaju da zadrže sitnije čestice unutar nasipa [107].

Postoje 4 mehanizma kroz koje se može inicirati unutrašnja erozija [108]:

1. Procurivanje – voda prilikom tečenja kroz pukotine u nasipu erodira i iznosi materijal;
2. Kontaktna erozija – dešava se na kontaktu između slojeva sitnijih i krupnijih čestica, kada je brzina vode koja protiče kroz sloj krupnijih čestica dovoljna da erodira čestice iz sloja sitnijih čestica;

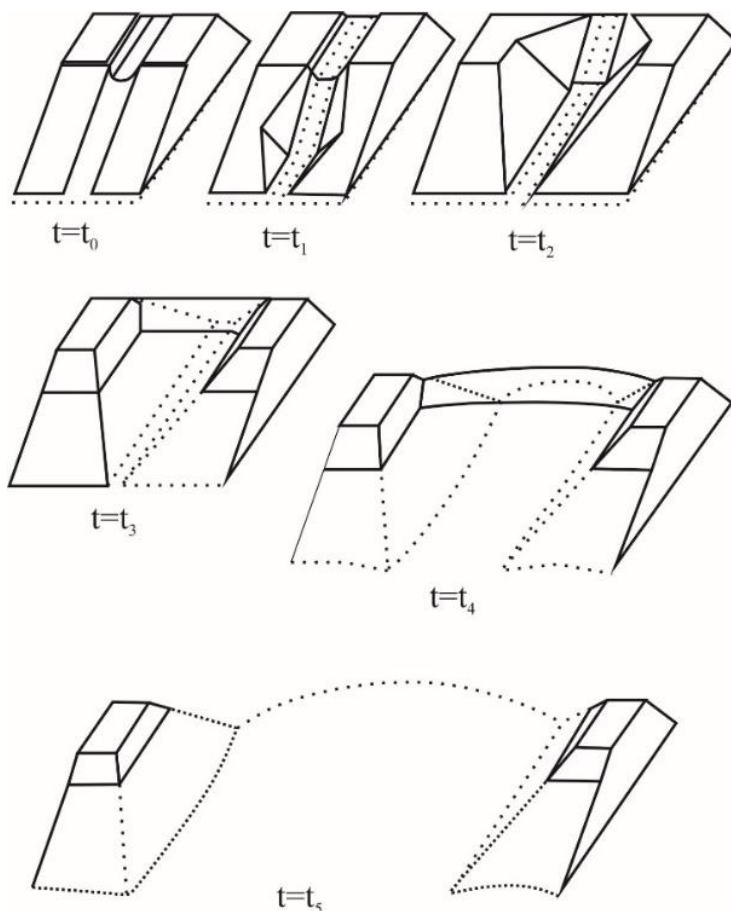
3. Sufozija – voda pokreće najsitnije čestice materijala od kog je sačinjen nasip bez narušavanja njegovog kostura, čime se povećava zapremina međuprostora i dolazi do sleganja materijala;
4. Retrogradna erozija – dolazi do stvaranja šupljina unutar ili ispod nasipa, u smeru suprotnom od smera tečenja vode, dok se erodovani materijal taloži nizvodno od nasipa.

Unutrašnja erozija se može podeliti na 4 faze [109]:

1. Iniciranje unutrašnje erozije nekim od 4 definisana mehanizma,
2. Pokretanje erodovanih čestica materijala od kojih je nasip sačinjen,
3. Napredovanje erozije uz stvaranje šupljina i kanala u telu nasipa, i na kraju
4. Stvaranje breše u telu nasipa.

Postoji 5 faza razvoja breše, pod pretpostavkom da se ona pojavljuje na vrhu nasipa, slika 16 [110]:

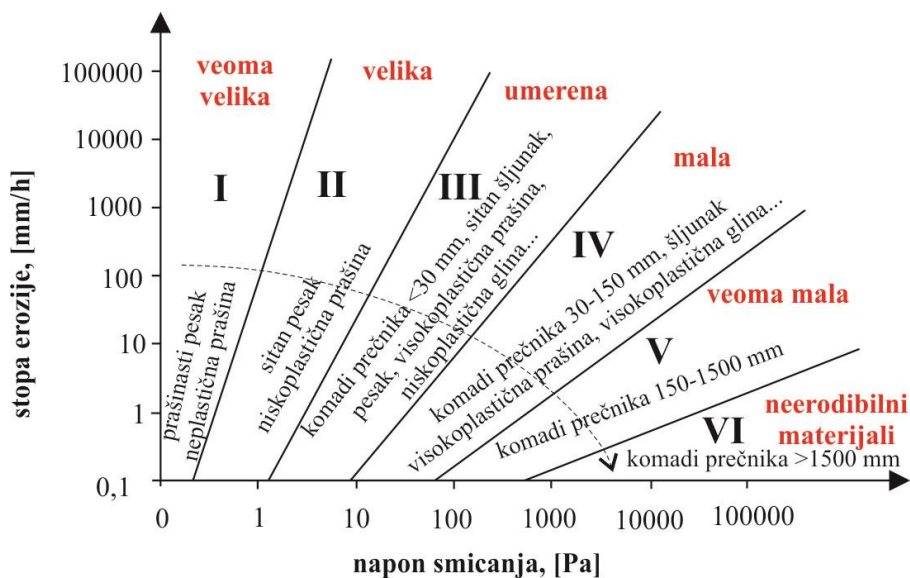
1. Unutrašnja kosina pod delovanjem vode koja kreće da ističe kroz brešu postaje strmija;
2. Dolazi do retrogradne erozije unutrašnje kosine nasipa što dovodi do sužavanja krune nasipa;
3. Snižavanje nasipa uz širenje breše konstantnih bočnih uglova;
4. Kritična faza tečenja kroz brešu u kojoj se breša razvija uglavnom bočno;
5. Potkritična faza tečenja kroz brešu sa njenim pretežno bočnim razvojem.



Slika 16. Šema razvoja breše u nasipu [110]

Glavni faktori od kojih zavisi erozija su [103]:

- Erodibilnost – veza između stope erozije i napona smicanja na kontaktu voda-čvrst materijala. Postoji 6 kategorija erodibilnosti materijala u zavisnosti od napona smicanja materijala, slika 17;
- Brzina vode koja teče kroz čvrst materijal;
- Veličina i oblik nasipa.



Slika 17. Predložene kategorije erodibilnosti materijala [111]

Vreme manifestovanja udesa

Neki od nabrojanih udesa se dešavaju brzo sa malim ili bez ikakvog upozorenja (npr. likvefakcije), dok se drugi dešavaju sa prethodnom najavom koja traje izvesno vreme, te se mogu sprečiti ili bar ublažiti [112].

Likvefakcija nastaje gotovo trenutno, bez ikakvog upozorenja. Odmah zatim ide seizmička nestabilnost kosina, isključujući likvefakciju, čiji efekat na stabilnost deponije može imati odmah nakon manifestovanja, ili par dana nakon potresa. Na trećem mestu je prelivanje, čiji mehanizam delovanja traje oko 1-2 dana. Udesi usled statičke nestabilnosti kosina i unutrašnje erozije mogu imati period manifestovanja do nekoliko meseci ili, čak godina.

Ovako definisana hijerarhija je bitna za uspostavljanje plana uzbune stanovništva, kao i realno vrednovanje rizika.

Na osnovu nabrojanih tipova udesa, a u skladu sa vremenom njihove manifestacije, potrebno je razmotriti:

- nivo održavanosti deponije, uz razmatranje faktora sigurnosti usled dinamičkog i statičkog opterećenja,
- potencijal likvefakcije,
- seizmički hazard za odgovarajući povratni period,

- potencijal plavljenja, i
- otpornost na eroziju.

Nakon što se svi ovi aspekti razmotre, mogu se razvijati scenariji udesa, kao i njihova verovatnoća.

3.2.1. Nivo održavanosti deponije

Kada hidrotehnički elementi deponije nisu ispravni to može dovesti do njene geotehničke nestabilnosti, a nužno i do ekološke.

Mnogo zabeleženih udesa su u direktnoj vezi sa geotehničkim propustima na deponijama [32]. Kada se razmatra ranjivost deponije potrebno je analizirati sve pojave i dešavanja na i oko deponije. Stoga je preporučljivo analizirati funkcionalnost svih elemenata deponije, kao i međusobni uticaj zabeleženih neregularnosti.

Elementi deponije koji se analiziraju, kao i poremećaji koji mogu nastati usled njihovih neodržavanja uz delovanje eksternih faktora, prikazani su u tabeli 13.

Tabela 13. Mogući poremećaji i udesi na deponiji industrijskog otpada, modifikovano prema [34]

Deo procesa/ element deponije	Poremećaj			Predloženi scenario udesu
Transport hidromešavine	Oštećenje cevovoda	Polagano curenje	Ugrožavanje dinamike zapunjavanja deponije	Statička nestabilnost kosina
	Oštećenje armature	Naglo isticanje Isticanje hidromešavine		
Nasip	Zemljotres	Oštećenje nasipa, ugrožavanje dinamike zapunjavanja deponije usled smanjenja akumulacionog prostora		Seizmička nestabilnost kosina, Likvefakcija (ukoliko je potencijal pozitivan), Prelivanje
	Obilne padavine	Rast nivoa taložnog jezera		Prelivanje
	Uočljive pukotine na kruni, deformacije, jaruge i vododerine na kosinama	Slabljenje nasipa, poremećaj geometrije deponije		Unutrašnja erozija
Drenažni sistem	Sufozija	Kvašenje nasipa, premećaj stabilnosti deponije		Statička nestabilnost kosina
	Začepljenje			
	Kolmiranje			
	Oštećenje usled hemijskog dejstva			
Potopljen				

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

Evakuacija vode	Oštećenje prelivnog praga	Slaba evakuacija	Statička nestabilnost kosina
	Zatvaranje (rušenje) prelivnog praga	Ugrožen rad na deponiji, nema evakuacije	
	Nizak nivo na prelivnom pragu	Evakuacija neizbistrene vode, naglo smanjenje taložnog jezera	Ekološka nestabilnost
	Visok nivo na prelivnom pragu	Nema evakuacije vode, naglo povećanje taložnog jezera	Predivanje
	Potopljena ploveća pumpna stanica	Nema evakuacije vode, naglo povećanje taložnog jezera	
	Oštećena ploveća pumpna stanica ili pumpe	Problemi u evakuaciji	Statička nestabilnost kosina
Taložno jezero	Malo	Pojava aerozagađenja Manjak povratne vode	Ekološka nestabilnost
	Veliko	Nestabilnost nasipa Potapanje ploveće pumpne stanice	Predivanje
	Neodgovarajući položaj u odnosu na nasip	Kvašenje nasipa	Statička nestabilnost kosina
Odnos visine nasipa i vode (sigurnosno nadvišenje)	Manja razlika od propisane	Smanjenje gustine deponovanog materijala Povećan potencijal unutrašnje erozije Povećan potencijal plavljenja	Statička nestabilnost kosina Unutrašnja erozija Predivanje
	Veća od projektovane	Problemi pri istakanju pulpe Ugrožavanje dinamike zapunjavanja deponije	Statička nestabilnost kosina
Plaža	Strmija od projektovane	Smanjen kapacitet akumulacionog prostora i sigurnosnog nadvišenja	Predivanje
	Ravnija od projektovane	Poremećaj drenaže odloženog materijala	Statička nestabilnost kosina
Kolektor ili tunel za izvođenje vodotoka	Oštećen usled hemijskog dejstva	Ugrožen protok, ugrožena stabilnost nasipa, poremećaj nivoa taložnog jezera, procurivanje odloženog materijala kroz pukotine	Statička nestabilnost kosina; Unutrašnja erozija
	Zarušen		
	Zatrtan		
Sistem za prskanje	Ne radi		Ekološka nestabilnost
	Kasno uključen		
Pumpa za infiltracionu vodu	Pokvarena	Voda se ne vraća u taložno jezero, poremećaj nivoa taložnog jezera	Statička nestabilnost kosina
	Potopljena		
Pijezometri	Oštećeni	Nema kontrole vode u deponiji	
Vodonepropusno jezgro	Erozija Začepjenje drenažnog sistema		Unutrašnja erozija Predivanje
Evakuacija vode	Nema evakuacije vode, naglo povećanje taložnog jezera; Začepjenje drenažnog sistema		Predivanje
	Oštećenje usled hemijskog dejstva		
Geomembrana	Oštećenje usled hemijskog dejstva, perforacija, nepravilno postavljanje, izloženost suncu...		Ekološka nestabilnost
Hidrocikloni	Poremećaj u radu	Neadekvatno razdvajanje frakcija mulja i hidrocikloniranog peska, ugrožavanje stabilnosti nasipa	Statička nestabilnost kosina

Prilikom razmatranja nivoa održavanosti deponije, najvažniji element je njena stabilnost, odnosno, stabilnost njenog nasipa. Pojava nestabilnosti nasipa se javlja iz tri razloga [34]:

- kosine nasipa su suviše strme, odnosno strmije nego što karakteristike materijala od kojeg je nasip izgrađen dozvoljavaju,
- porni pritisci su suviše visoki, i
- delovanje spoljašnjih sila (zemljotres, vibracije).

Za potrebe provere stabilnosti deponije koja igra ključnu ulogu prilikom procene rizika njene eksploatacije, potrebno je stalno vršiti kontrole. Za te potrebe vrši se proračun faktora sigurnosti, i to u statičkim uslovima, kada nema delovanja spoljašnjih sila, i dinamičkim uslovima, pri delovanju zemljotresa, veštačkih vibracija i potresa.

Faktor sigurnosti (F_s) je parametar kojim se može iskazati stabilnost deponije u geotehničkom smislu. Njegove vrednosti su administrativno definisane i zavise od karaktera opterećenja. U tabeli 14 su prikazane preporučene minimalne vrednosti F_s prema lokalnom standardu SRPS.U.C5.020. Faktor sigurnosti za stalno opterećenje se razmatra kod statičke nestabilnosti, dinamičko kod seizmičke nestabilnosti, dok se povremeno opterećenje uzima ono koje nastaje prilikom trenutnog potresa nasipa poput kamionskog transporta po samom nasipu.

Tabela 14. Faktor sigurnosti [113]

Vrsta opterećenja	Visina nasipa, [m]	Minimalni F_s	Napomena
Stalno	> 15	$\geq 1,5$	/
	< 15	$\geq 1,3$	Uz uslov da je oštećenje lokalno i da se može relativno lako sanirati
Povremeno	> 15	$\geq 1,3$	/
	< 15	$\geq 1,2$	Uz uslov da se lokalno oštećenje može lako sanirati
Dinamičko		≥ 1	Uz obavezu da se odrede najveća pomeranja

U inostranoj literaturi preporučuje se minimalan F_s od 1,3 u statičkim uslovima kod aktivnih deponija [114], dok se kod zatvorenih deponija zahteva minimalan F_s od 1,8 [115].

U dinamičkim uslovima, izazvanim potresom, zahtevaju se minimalne vrednosti F_s u rasponu od 1,05 [116] pa do 1,15 [117], u zavisnosti od karakteristika očekivanog

zemljotresa. Pri ovim vrednostima faktora sigurnosti smatra se da se ne može narušiti stabilnost nasipa.

Međutim, visok faktor sigurnosti ne mora nužno da garantuje stabilnost deponije [118, 119]. Katastrofalni udesi su se dešavali često na deponijama kod kojih je procenjen visok faktor sigurnosti, a koji je pak baziran na nedovoljno preciznim ulaznim podacima, poput udesa na Fundao deponiji u Brazilu [120, 121].

U [122] su predloženi minimalni faktori sigurnosti u zavisnosti od kategorije posledica usled udesa i nivoa nepouzdanosti podataka, tabela 15.

Tabela 15. Modifikovane minimalne vrednosti faktora sigurnosti [122]

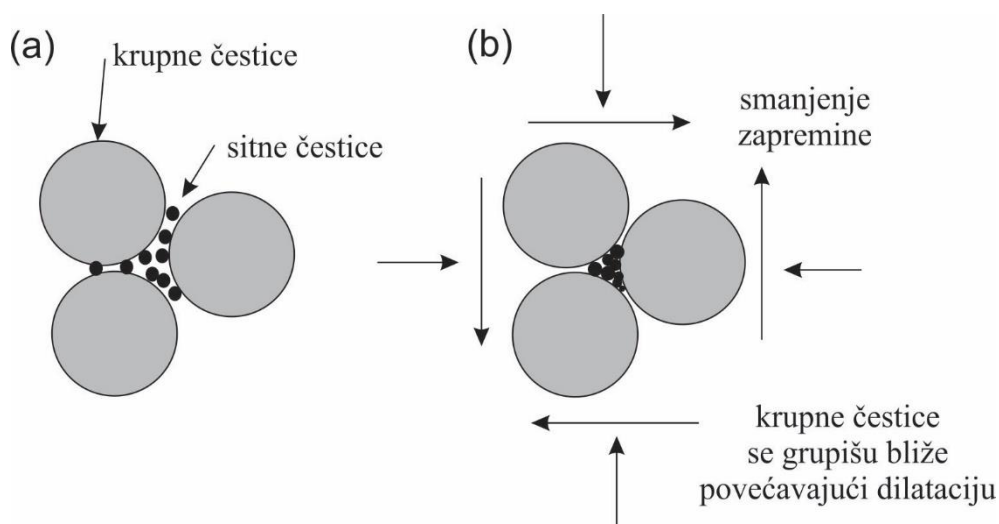
Nivo nepouzdanosti podataka	Značajnost posledica		
	Mala	Srednja	Velika
Mali	1,3	1,5	1,5
Srednji	1,4	1,5	1,7
Veliki	1,5	1,6	napomena

Napomena: Deponije sa posledicama velike značajnosti i velikom nepouzdanošću ulaznih podataka ne bi trebalo da budu projektovane dok se nivo nepouzdanosti ne smanji.

3.2.2. Potencijal likvefakcije

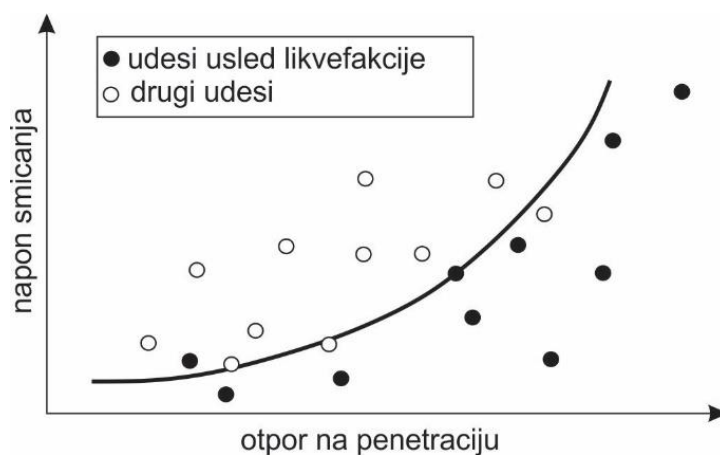
Industrijski otpad mineralnog porekla, nastao nakon pripreme rude, usled svoje male plastičnosti je najčešće sklon likvefakciji [123, 124, 125].

Na slici 18.a prikazane su sitne čestice koje ispunjavaju prazne prostore između čestica peska. Prisustvo ovih sitnih čestica može povećati gustinu nasipa, ali ujedno može uticati na povećanje potencijala likvefakcije. Neke sitne čestice dospevaju u prostor na kontaktu dve čestice peska. Te čestice mogu usloviti razdvajanje čestica peska. Kada su čestice peska kompresovane i napregnute, sitne čestice zapadaju u kontaktni prostor čestica peska (sl. 18.b). Stoga, čestice peska bivaju podložne još većoj kompresiji, i samim tim, likvefakciji [126].



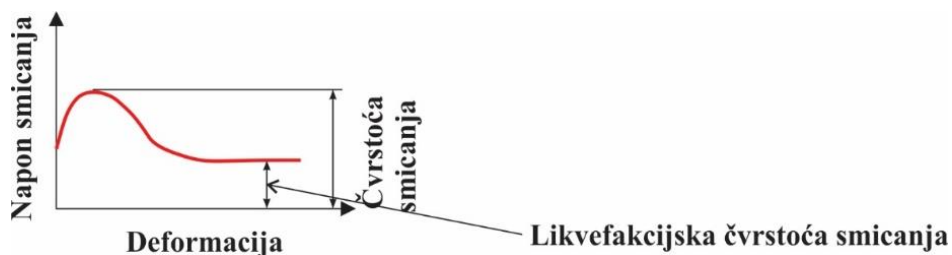
Slika 18. Materijal u deponiji u normalnom stanju (a) i napregnutom stanju (b) [127]

Na slici 19 razmatrani su udesi usled likvefakcije i drugih događaja. Prikazana je njihova pojava na dijagramu i direktna zavisnost otpornosti na penetraciju i napona smicanja potrebnog da dođe do likvefakcije. Iznad određene vrednosti otpornosti na penetraciju, kriva raste i govori o tome da materijal nije otporan na likvefakciju. Takođe, ako materijal pokazuje otpornost na penetraciju manju od one iznad koje kriva raste postepeno, likvefakcija se može desiti [128]. To se može protumačiti kao napeto stanje tla [129].



Slika 19. Prikaz udesa usled likvefakcije i drugih udesa u zavisnosti od napona smicanja i otpora na penetraciju [128]

Likvefakcijska čvrstoća smicanja, kao jedan od bitnih faktora za analiziranje potencijala likvefakcije, je čvrstoća smicanja koja je inicirana pri velikim deformacijama saturisanog tla, slika 20 [130].



Slika 20. Likvefakcijska čvrstoća smicanja

Likvefakcijski napon smicanja je veličina koja se koristi da se opiše napon smicanja koji nastaje pri likvefakciji tla, uključujući bilo koji potencijalni efekat drenaže, redistribucije pritiska porne vode, mešanje tla itd. [131].

Likvefakcijska granica smicanja je maksimalni napon smicanja koji se manifestuje tokom potresa u nedreniranim uslovima saturisanog tla. Razmera likvefakcijskog napona je definisana kao likvefakcijska granica smicanja normalizovana vertikalnim efektivnim naponima u uslovima pre udesa. Sa porastom ugla trenja pri određenim efektivnim naponima raste i gustina [132].

Na osnovu zabeleženih slučajeva likvefakcije, ustanovljeno je da se razmera graničnih napona kretala od 0,29 do 0,42 (pri čemu je gornja granica 0,47 pri srednjim efektivnim naponima od 700 kPa). Ovaj opseg odgovara graničnim uglovima trenja od 16-23° (pri čemu je gornja granica 25°). Radi poređenja, u [132] su navedene razmere graničnog napona iz zabeleženih slučajeva statičke likvefakcije, kod kojih je ovaj opseg od 0,23-0,31. On odgovara graničnim uglovima trenja od 13-17°.

Kinetika ima mali efekat na likvefakcijski napon smicanja za nasipe visine manje od 10 m. Efekat kinetike se razmatra kroz gubitak potencijalne energije pokrenute mase kao rezultat klizanja i kroz visinu nasipa pre samog udesa. Ustanovljeno je da efekat kinetike na likvefakcijski napon smicanja nije značajan ukoliko potencijalna energija pokrenute mase materijala nije veća od 10^3 do 10^4 kJ/m.

Iako tla sa većim učešćem sitnih klasa imaju manju otpornost na penetraciju (kao rezultat veće stišljivosti tla i manje hidrauličke provodljivosti), ova tla lakše podnose nedrenirane uslove tokom tečenja.

Jasno je da sa porastom razmere likvefakcijskog napona raste i otpornost standardne normalizovane i konusne penetracije. Sa porastom razmere likvefakcijskog napona raste i vertikalni efektivni napon [131].

Metode za skrining potencijala likvefakcije

Da bi do likvefakcije došlo na deponiji, prvenstveno je potrebno da odloženi materijal bude likvefabilan, odnosno, da ima pozitivan potencijal likvefakcije. Iz tog razloga bi ovaj parametar trebalo razmotriti odmah na početku svake procene rizika. Međutim, važno je naglasiti da ukoliko je deponija uređena i ne postoje neregularnosti u njenom radu (ostaje potpuno stabilna i ne može doći do likvefakcije, dok god se uredno drenira [133]), kao i kad seizmički hazard regiona u kom se deponija nalazi nije visok, pozitivan potencijal likvefakcije ne mora automatski da znači da postoji velika verovatnoća da do likvefakcije dođe, već on samo ukazuje na sklonost materijala.

Trenutna praksa skrininga likvefakcijskog potencijala se zasniva na geološkoj starosti materijala, brzini smicanja, granulometrijskom sastavu i stepenu uniformnosti zrna, sadržaju vlage, relativnoj gustini materijala, geomehaničkim karakteristikama materijala, Aterbergovim granicama i CPT i SPT indeksima i podređena je tlu, pre nego industrijskom otpadu mineralnog porekla [134, 135, 136, 137, 138].

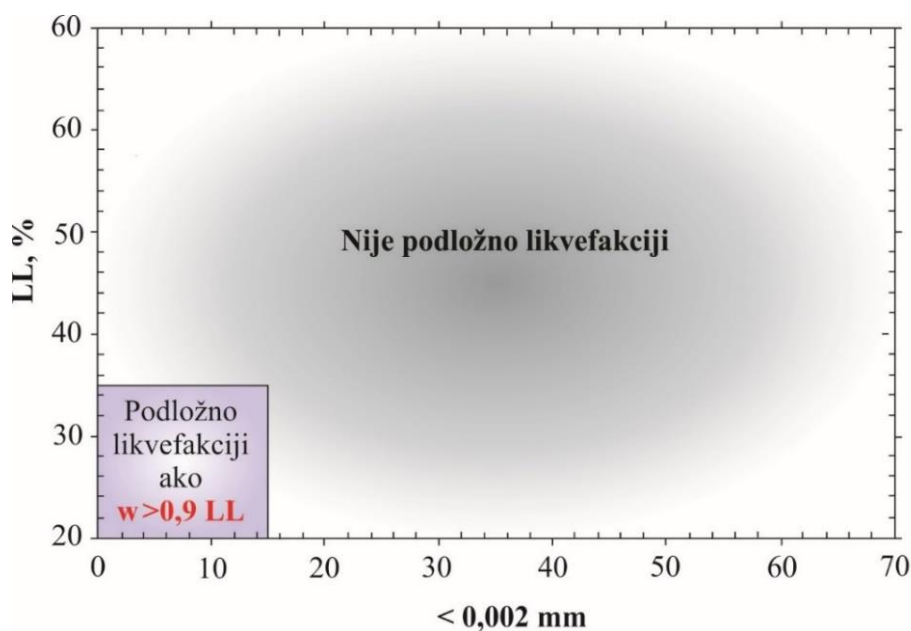
Američka agencija za zaštitu životne sredine (U.S. EPA) je uspostavila poredak za razmatranje likvefakcijskog potencijala kojim je obuhvatila sve ključne parametre. Ovi parametri su podeljeni u 5 grupa i ukoliko minimum 3/5 kriterijuma ukazuju da likvefakcija nije moguća kod ispitivanog materijala, potencijal likvefakcije se može oceniti kao mali. U suprotnom je potrebna rigoroznija analiza [139]. Oni predlažu da se prilikom razmatranja likvefakcijskog potencijala analizira [139]:

- 1) Geologija terena na kom je stacionirana deponija – likvefakcijski potencijal opada sa starenjem tla. Ako je teren sačinjen od fluvijalnih, jezerskih i eolskih naslaga iz holocenog doba, teren se može smatrati podložnim likvefakciji. Generalno, ako je teren iz postholocenskog doba, može se smatrati manje podložnim likvefakciji.
- 2) Učešće sitnih čestica u otpadu, indeks plastičnosti, granica tečenja i prirodna vlažnost materijala. Generalno se materijal može smatrati likvefabilnim ako mu je učešće glinovitih čestica < 10%, srednji prečnik zrna u opsegu od 0,02~1 mm, a Hezнов stepen neravnomernosti <10 [140]. Takođe, ukoliko je odnos srednjeg prečnika

peskova i praškastih peskova D_{50}/d_{50} relativno mali, mogu ukazivati na pozitivan potencijal likvefakcije [141].

- 3) Saturacija – vrednost saturacije $S_r \geq 80\%$ je potrebna da bi došlo do likvefakcije.
- 4) Dubina sloja zemlje – dubina sloja do 15 m se smatra podložnom likvefakciji.
- 5) Otpornost na penetraciju – ako materijal ima otpor određen metodom standardnog penetracionog opita (SPT) manji od 22 MPa, podložan je likvefakciji [142]. Granična vrednost iznosi 30 MPa [143]. Takođe, ako je otpor određen metodom konusnog penetracionog opita (CPT) manji od 15 MPa, potencijal je pozitivan [144].

Po tzv. „Kineskom kriterijumu”, koji ima najširu upotrebu, materijali koji imaju $\leq 15\%$ (maseno) glinovitih čestica⁶, granicu tečenja⁷ (LL) $\leq 35\%$ i sadržaj vlage (w) $\geq 0,9 \times$ granice tečenja (LL), podložni su likvefakciji, slika 21 [145, 146].



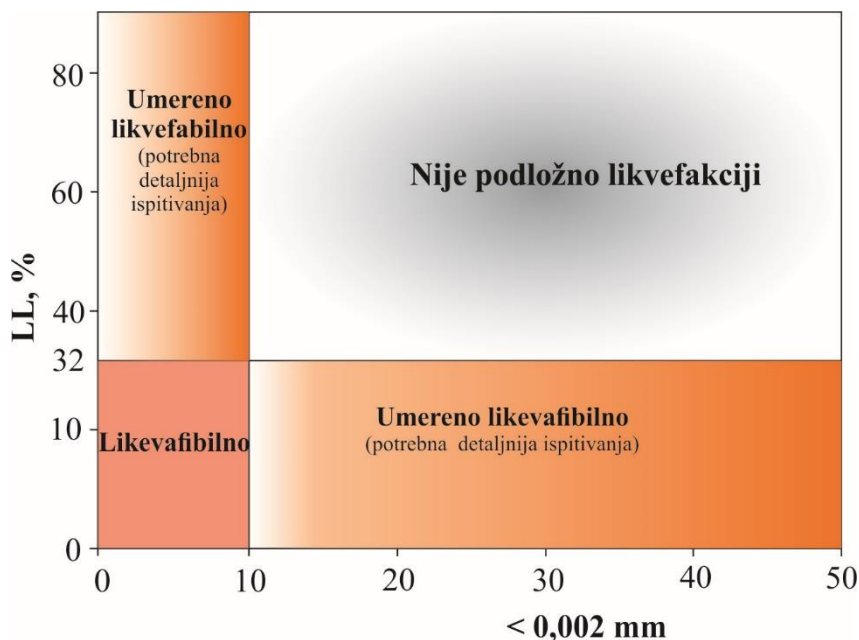
Slika 21. Skringing likvefakcije prema „Kineskom kriterijumu“ [145, 146]

Ovaj model je doživeo mnogo modifikacija, a poslednja je predložena u [147], gde je izneto pravilo da kada je učešće glinovitih čestica $< 10\%$ a granica tečenja $< 32\%$, tlo je podložno likvefakciji. Sa druge strane, kada je učešće glinovitih čestica $\geq 10\%$, a granica

⁶ Granična krupnoća glinovitih čestica se najčešće uzima kao 0,002 mm, dok je za američko podneblje prihvaćena kao 0,005 mm.

⁷ Minimalna vlažnost pri kojoj tlo teče.

tečenja $\geq 32\%$, tada tlo nije podložno likvefakciji. U svim ostalim slučajevima (učešće glinovitih čestica $< 10\%$, a granica tečenja $\geq 32\%$, i učešće glinovitih čestica $\geq 10\%$, a granica tečenja $< 32\%$, potrebna su detaljnija ispitivanja, slika 22.



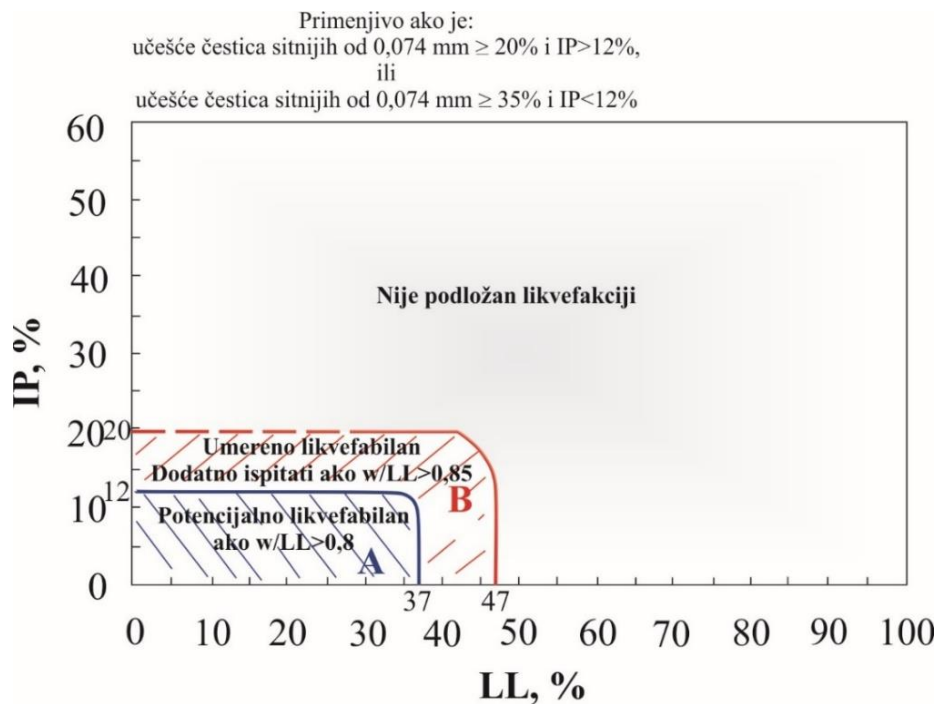
Slika 22. Modifikovani „Kineski kriterijum“ [147]

Ipak, Australijski komitet za visoke brane (ANCOLD) ne preporučuje ovu metodu, te predlaže neke koje u obzir, između ostalih parametara, uzimaju i indeks plastičnosti [123].

U [148] su predložene 3 zone likvefabilnosti materijala, slika 23:

- Zona A – potencijalno likvefabilan materijal – kada je $IP \leq 12$, $LL \leq 37$ i $w/LL > 0,8$;
- Zona B – umereno likvefabilan materijal koji zahteva dodatna testiranja- kada je $12 < IP \leq 20$, $37 < LL \leq 47$ i $w/LL > 0,85$;
- Zona materijala koji nije podložan klasičnoj cikličnoj likvefakciji, a koja se nalazi izvan definisanih granica.

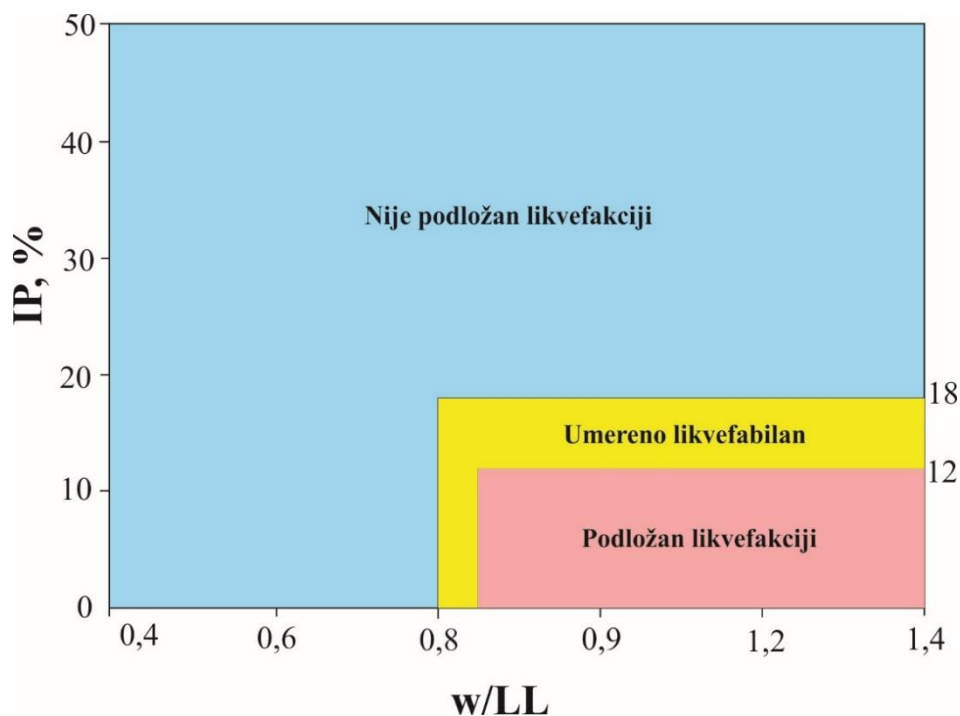
Ova metoda je primenjiva na materijalima kod kojih je učešće čestica sitnijih od $74 \mu\text{m}$ $\geq 20\%$, sa indeksom plastičnosti $(IP) > 12\%$, ili učešće čestica sitnijih od $74 \mu\text{m}$ $\geq 35\%$ sa indeksom plastičnosti $(IP) < 12\%$ [148].



Slika 23. Procena podložnosti likvefakciji [148]

Kada se ovaj metod uporedi sa svim varijacijama Kineskog modela, može se reći da je pouzdaniji s obzirom da u obzir uzima mineralogiju materijala [149].

Na osnovu razmatranja izloženih u [150], materijali koji imaju indeks plastičnosti $IP < 12$ i odnos između vlage i granice tečenja (w/LL) $> 0,85$ su podložni likvefakciji. Materijali čiji je indeks plastičnosti u opsegu $12 < IP < 18$ i $w/LL > 0,80$ su umereno podložni likvefakciji i zahtevaju dodatne analize, dok su materijali indeksa plastičnosti $IP > 18$ nelikvefabilni pri niskim efektivnim naponima, slika 24.

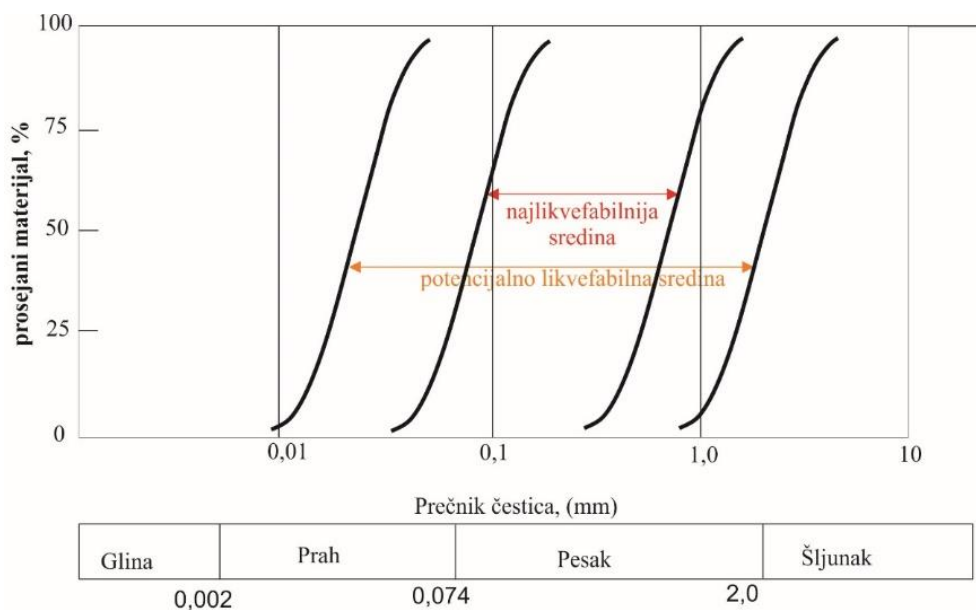


Slika 24. Postupak za skrining likvefakcije [150]

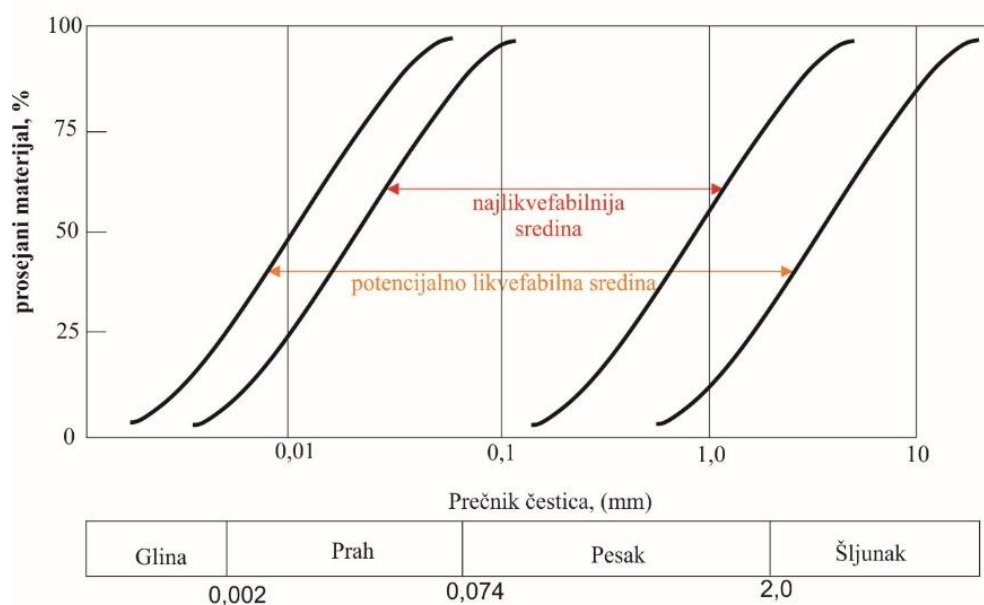
U [99] je navedeno da se materijali čiji je $IP < 7$ ponašaju poput peskova i podložni su likvefakciji, dok se materijali indeksa $IP \geq 7$ ponašaju poput glina i smatraju se nelikvefabilnim.

Na slici 25 prikazan je tzv. „Japanski kriterijum“ za utvrđivanje likvefabilnosti na osnovu granulometrijskog sastava materijala i stepena uniformnosti zrna. Sa slike se vidi da pesak spada u kategoriju najlikvefabilnijih materijala. Ako je Heznov stepen uniformnosti $Cu^8 < 3,5$, likvefabilnost se određuje na osnovu slike 25.a, a ako je $Cu > 3,5$, likvefabilnost se određuje na osnovu slike 25.b. Kod ove metode pažnja se obraća na materijale čija se kriva proseva nalazi u okviru naglašenih zona likvefabilnosti [151, 152]. Što su zrna uniformnija, to je materijal likvefabilniji [153].

⁸ Heznov stepen uniformnosti (jednoličnosti, neravnomernosti) se računa kao odnos veličine sita kroz koje prođe 60% mase i veličine sita kroz koju prođe 10% mase materijala (d_{60}/d_{10}). [30]



(a)



(b)

Slika 25. „Japanski kriterijum“ za utvrđivanje likvefabilnosti materijala u zavisnosti od granulometrijskog sastava i uniformnosti zrna [151, 152]: (a) kada je $Cu < 3,5$; (b) kada je $Cu > 3,5$

Kako bi analiza potencijala likvefakcije bila kompletna, nabrojanim kriterijumima treba pridružiti i:

- Zabeležene slučajeve likvefakcije na predmetnoj lokaciji u prošlosti, kao bitnu informaciju, jer ako je jednom došlo do likvefakcije, velika je verovatnoća da se može ponoviti.

- Zonu seizmičke aktivnosti za predmetnu lokaciju [101]. Do likvefakcije je obično dolazilo u oblastima seizmičkog hazarda ≥ 6 stepeni [140].
- Koeficijent relativne zbijenosti (relativnu gustinu) – koji pokazuje kolika je zbijenost materijala u odnosu na maksimalnu zbijenost [154]. Za stabilnost deponije je bitno da koeficijent relativne zbijenosti (I_D) materijala nasipa bude blizu 100%. Zbijenošću $I_D > 60\%$ se likvefakcija značajno predupređuje [34]. Likvefakcija se načelno dešava u peskovima i praškastim peskovima čiji je $I_D < 50\%$. Donja granica I_D pri kojoj neće doći do likvefakcije je 75% [155]. Kod otpada sačinjenog od neplastičnih čestica krupnoće $< 74\mu\text{m}$, I_D je posebno bitan parametar [97]. Ako je učešće sitnih čestica u materijalu ($< 0,074\text{ mm}$) oko 15%, efektivni napon između 50 i 350 kPa, I_D do 50-60% to znači da može doći do kontrakcije, zgušnjavanja. U ovakvim uslovima, ako je material saturisan ili delimično saturisan, opasnost od likvefakcije i dalje postoji [156]. Takođe, I_D je u direktnoj vezi sa koeficijentom poroznosti (e). Prema Ishihara, (1993), što je širi opseg $e_{\text{min}}-e_{\text{max}}$, potencijal likvefakcije raste [157].
- Nivo podzemnih voda – tlo je posebno sklono likvefakciji kada je nivo podzemnih voda plitak [158]. Ako je nivo podzemnih voda manji od 15 m, može se smatrati da postoji veća podložnost likvefakciji [159].

Postoji i kompleksniji model za procenu potencijala likvefakcije koji se sastoji iz 4 koraka [53]:

1. Predviđanje tipa materijala pomoću SPT ili CPT testa koji se vrše na nasipu; Uzorkovanje materijala radi utvrđivanja granulometrijskog sastava materijala i Aterbergovih granica, dinamičkih svojstava poput modula smicanja i sl.
2. Upotreba dvodimenzionalnih programa konačnih elemenata radi utvrđivanja efektivnih napona u nasipu i odloženom materijalu unutar akumulacionog prostora.
3. Računanje napona indukovanih seizmičkim udarima. Simuliranje seizmičkog udara.
4. Ocena likvefakcijske otpornosti i računanje faktora sigurnosti. Faktor sigurnosti prema likvefakciji (F_{Slik}) se definiše kao odnos cikličnog otpora na likvefakciju (CRR) i cikličnog napona uzrokovanog potresom (CSR). Na osnovu F_{Slik} , potencijal likvefakcije se može protumačiti kao [160]:
 - $F_{\text{Slik}} \leq 1,1$ – tlo je sklono likvefakciji,
 - $1,1 < F_{\text{Slik}} \leq 1,4$ – može se očekivati znatno omekšavanje tla, i

- $F_{Slik} > 1,4$ – tlo nije sklono likvefakciji.

Treba imati u vidu da su navedene metode, metode sa trenutno najširoom upotrebom, ali su površne i razmatraju se kao skrining metode za brzu ocenu potencijala likvefakcije. Ipak, mogu biti korisne kada inicijalno ne postoje detaljni podaci o likvefabilnosti ispitivanog materijala i kombinovanjem više metoda mogu dati pouzdane rezultate.

3.2.3. Seizmički hazard

U cilju prognoziranja scenarija udesa usled seizmičke nestabilnosti kosina, potrebno je prvenstveno razmotriti kartu seizmičkog hazarda za različite povratne periode koji predstavljaju dobru podlogu za procenu seizmičkog rizika. Takođe, prilikom razmatranja seizmičkog hazarda, trebalo bi uzeti u obzir i kartu epicenatara zabeleženih zemljotresa na predmetnom području.

Za potrebe seizmičke analize uzima se pretpostavka da se objekat koji je predmet ispitivanja, prosečnog veka eksploatacije od 50 godina, ne sruši. Ovakva pretpostavka je ekvivalent seizmičkom dejstvu sa verovatnoćom prevazilaženja od 10% u periodu od 50 godina. Zemljotres ovakvih karakteristika ima povratni period od 475 godina. Takođe, podrazumeva se da se ograničena oštećenja mogu javiti samo kao posledica delovanja zemljotresa, uz verovatnoću da bude prevaziđen od 10% u periodu od 10 godina. Ovaj zemljotres ima prosečan povratni period od 95 godina [161]. Hazard je izražen u stepenima makroseizmičkog intenziteta [162].

Ako se preliminarno proceni da udes na deponiji ne predstavlja veliku opasnost po ljudske živote, a u zavisnosti od potencijalnih posledica, manji povratni periodi se mogu uzeti u obzir [70].

Kod zatvorenih deponija, ICOLD preporučuje da se u obzir uzme povratni period od 1000 (~ 975) godina [163].

Prema evropskoj makroseizmičkoj skali EMS-98 zemljotresi su podeljeni na 9 stepena čije je tumačenje posledica po objekat poput nasipa prikazano u tabeli 16 [164].

Tabela 16. Tumačenje uticaja zemljotresa različitih jačina na deponije, modifikovano prema [164]

Stepen EMS skale	Oštećenje na nasipu
I (Neosetan zemljotres)	Bez
II (Jedva osetan zemljotres)	Bez
III (Slab zemljotres)	Bez
IV (Umeren zemljotres)	Bez
V (Jak zemljotres)	Bez
VI (Vrlo jak zemljotres)	Uočljive blage deformacija na nizvodnim kosinama nasipa.
VII (Silan zemljotres)	Umereno do znatno oštećenje nasipa, deformacije na kruni nasipa i nizvodnim kosinama nasipa.
VIII (Štetan zemljotres)	Umereno do znatno oštećenje nasipa.
IX (Razoran zemljotres)	Znatno do veliko oštećenje, deformacije na kruni i nizvodnim kosinama nasipa, urušavanje drenažnih objekata, objekata za evakuaciju vodotokova i konačno do preliivanja preko krune nasipa.

Na osnovu predložene skale oštećenja, može se zaključiti da zemljotresi intenziteta od 7 stepeni i više mogu imati uticaj većih razmera na deponije koje su uredno održavane. Zapravo, efekat zemljotresa zavisi od njegove jačine i nivoa održavanosti deponije. Takođe, treba uzeti u obzir i metodu nadgradnje deponije. Nastupna metoda svakako ima najmanju otpornost na seizmičke udare [34].

3.2.4. Potencijal plavljenja

Potencijal plavljenja je bitan faktor prilikom razmatranja scenarija udesa usled preliivanja preko krune nasipa deponije.

Iako ne mora nužno doći do isticanja materijala iz deponije prilikom priliva velike količine atmosferskih padavina, voda je svakako inicijator. Na osnovu analize preko 200 zabeleženih udesa na deponijama, slaba kontrola vode u deponiji jedan je od najčešćih uzročnika udesa [29].

Dakle, inicijalno se pojave velike vode u akumulacionom prostoru, a stvarni uzroci preliivanja mogu biti različiti. Najčešće je to [165]:

- nedovoljan kapacitet prelivnih organa,
- loše održavanje objekata za evakuaciju vode,
- nedovoljno sigurnosno nadvišenje u deponiji,
- pojava sočiva i akumulacija uzvodno od deponije i njihovo naglo popuštanje pri nailasku velikih voda,

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

- rušenje uzvodnog nasipa ili formiranje klizišta unutar kontura deponije što na sličan način dovodi do formiranja poplavnog talasa i prelivanja preko krune nasipa.

Voda u deponiji koja ima uticaj na stabilnost deponije se može podeliti na [112]:

- pristiglu vodu iz spoljnih izvora, i
- *in situ* vodu – voda koja se nalazi u deponiji.

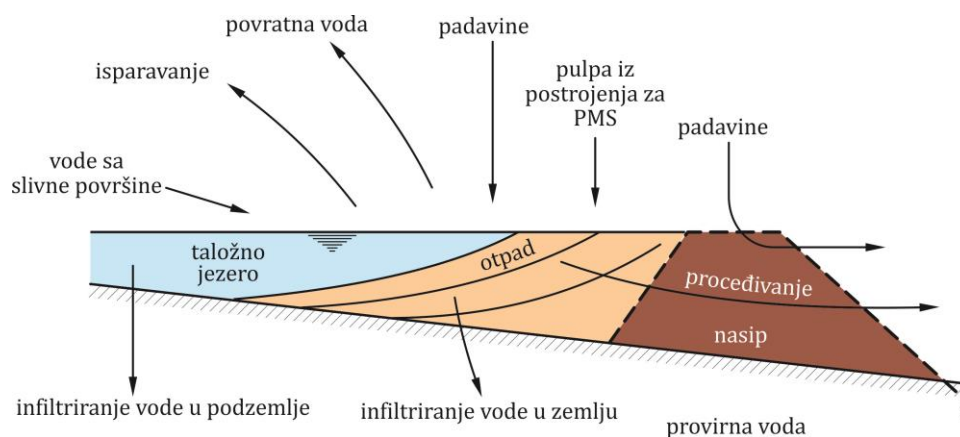
U vodu koja naknadno pristiže u deponiju iz spoljnih izvora spada [34]:

- voda koja se sa slivnog područja,
- voda od padavina unutar kontura deponije i
- voda koja u deponiju dolazi usled prskanja otkrivenih delova ili biopokrivača.

U *in situ* vodu spada [34]:

- voda iz hidromešavine i
- voda zarobljena u porama deponovanog otpada.

Bilans voda na jednoj hidrauličkoj deponiji je prikazan na slici 26.



Slika 26. Bilans voda na hidrauličkoj deponiji [34, 166]

Nekontrolisanje *in situ* vode vodi ka [112]:

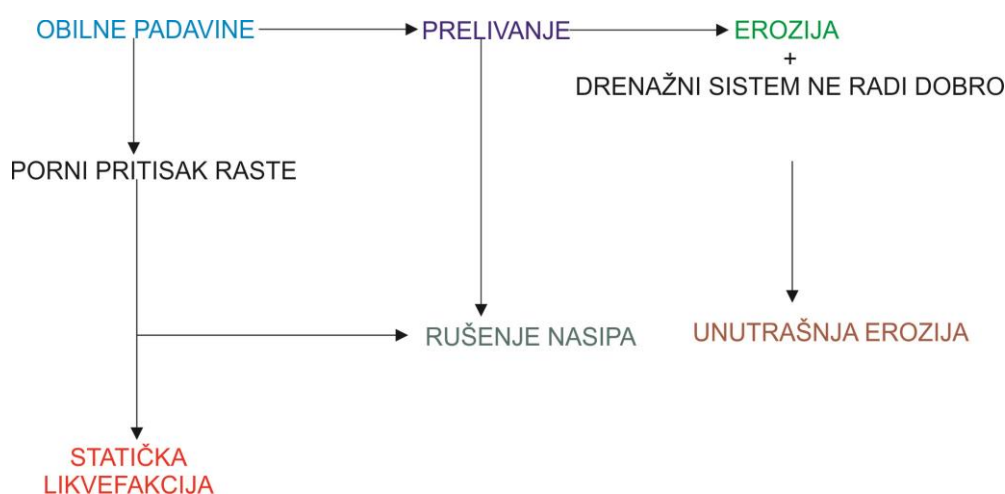
- Povećanju neutralnih napona što doprinosi smanjenju čvrstoće smicanja materijala od kog je sačinjen nasip deponije.
- Povećanju sile procurivanja što doprinosi većem potencijalu unutrašnje erozije.
- Povećanju pornog pritiska što doprinosi većem potencijalu likvefakcije.

Nekontrolisanje spoljašnjih voda može rezultirati [112]:

- Prelivanjem preko krune nasipa.
- Erozijom.

Prema zabeleženim slučajevima udesa na deponijama na deponijama može se zaljučiti da je nekontrolisanje vode u odloženom otpadu faktor koji je u najvećoj meri uticao na stabilnost same deponije [167, 168, 169].

Kako su potencijalni udesi usled nekontrolisanja vode u deponiji povezani, prikazano je na slici 27.



Slika 27. Povezanost udesa usled nekontrolisanja vode u deponiji

Zapremina pale vode se računa kao [170]:

$$V = P \cdot F [m^3] \quad (1)$$

gde je:

P- površina sliva, [m²]

F- Visina pale kiše, [m]

Ukoliko je potrebno sagledati najgori mogući scenario, odnosno, proračunati zapreminu pale vode na bazi najveće moguće količine padavina, tada se računa „verovatna maksimalna velika voda“.

Verovatna maksimalna velika voda (PMF) je velika voda čija se pojava može očekivati kao posledica superponiranja najnepovoljnijih meteoroloških i hidroloških uslova u slivu. PMF se dobija na osnovu verovatno maksimalnih padavina (PMP) pomoću

odgovarajućeg modela padavine-oticaaj uz pretpostavljanje najnepovoljnije kombinacije drugih kritičnih faktora koji utiču na oticanje. Niz godišnjih maksimuma dnevnih padavina je osnovni ulazni podatak za ocenu PMP. Proračun PMP-a za neku lokaciju bez osmatranja padavina treba da se zasniva na podacima sa više padavinskih stanica koje su adekvatno locirane u smislu rastojanja između stanica i nadmorske visine, i koje imaju dovoljnu količinu podataka [171, 172].

Kada se odredi PMF, zapremina pale vode se računa kao [171]:

$$V = P \cdot PMF [m^3] \quad (2)$$

gde je:

P- površina sliva, [m²]

PMF- verovatna maksimalna velika voda, [m]

Potencijal plavljenja se menja u zavisnosti od klimatskih karakteristika područja. U aridnim područjima verovatnoća PMF-a je u proseku 1×10^{-6} , odnosno, tumači se tako da do poplave može doći jednom u milion godina. U plavnim područjima ovaj parametar ima prosečnu verovatnoću 1×10^{-4} (jednom u 10.000 god.) [93].

Dakle, na osnovu nabrojanih činjenica, razmatranje potencijala plavljenja treba da obuhvati:

- Kapacitet deponije da prihvati padavine – zapremina deponije koja je određena visinom nasipa i sigurnosnim nadvišenjem, i
- Određivanje zapremine pale vode – na bazi pretpostavljene maksimalne visine pale kiše (F) ili PMF-a.

U zavisnosti od toga da li deponija može ili ne može da prihvati svu pristiglu vodu, određuje se verovatnoća nastanka udesa usled preliivanja.

Za potrebe najgoreg mogućeg scenarija, podrazumeva se da drenažni sistem i sistem za evakuaciju vode nisu u funkciji.

3.2.5. Otpornost na eroziju

Prilikom razmatranja udesa po scenariju unutrašnje erozije, bitno je ustanoviti otpornost materijala na eroziju.

Ako se u obzir uzme indeks plastičnosti (IP), kao pokazatelj količine vode potrebne da neki materijal pređe iz plastičnog u tečno stanje, onda se mogu uspostaviti 3 kategorije materijala prema otpornosti na eroziju, pri čemu pored indeksa plastičnosti, zbijenost materijala predstavlja jedan od kriterijuma [173]:

- I kategorija – najveća otpornost na eroziju – materijali čiji je indeks plastičnosti u opsegu $10 < IP < 15$, poput dobro granulisanog glinovitog materijala, dobro ili loše zbijenog, ili, materijala poput plastičnih glina, dobro ili loše zbijenih, čiji je $IP > 15$,
- II kategorija – srednja otpornost na eroziju – materijali čiji je indeks plastičnosti $6 < IP < 15$, poput dobro granulisanog materijala, dobre i loše zbijenosti, i
- III kategorija – mala otpornost na eroziju – materijali čiji je indeks plastičnosti $IP < 6$, poput dobro granulisanog nekoherentnog materijala, dobro ili loše zbijenog, kao i nekoherentnih peskova, izrazito ravnomernog sastava, dobro ili loše zbijenih.

Takođe, vizuelnim zapažanjem može se dodati još nekoliko kriterijuma koji mogu ukazivati na unutrašnju eroziju [174]:

- Zone procurivanja u telu nasipa – pri čemu lako uočljive zone koje imaju tendenciju da se povećavaju tokom vremena, mogu ukazivati na veliki potencijal unutrašnje erozije;
- Pojava pukotina na kruni nasipa - koje mogu ukazivati na uzdužne pukotine u telu nasipa čime se stvara uslov za unutrašnju eroziju, i
- Udubljenja i deformacije na kosinama nasipa - pri čemu uočljive deformacije na unutrašnjoj i spoljašnjoj kosini, kao i kruni nasipa, koje se vremenom menjaju u veličini i obliku, stvaraju uslove za iznošenje materijala iz tela nasipa.

3.3. Procena verovatnoće udesa

U literaturi se sreću tri načina procene verovatnoće nekog događaja [118]:

1. Na bazi istorijskih podataka, kada se događajima dodeljuje verovatnoća na osnovu njihove učestalosti.
2. Na bazi teorije verovatnoće (matematičko modeliranje), kada se događaju dodeljuje verovatnoća u procentima, i
3. Kvantifikacijom ekspertske procene, kada je verovatnoća produkt subjektivne procene.

ISO 31010:2011 preporučuje slični poredak [15]:

- Ekstrapolacija verovatnoće događaja u budućnosti na osnovu relevantnih istorijskih podataka o zabeleženim događajima.
- Kada nisu dostupno relevantni istorijski podaci, prognoziranje verovatnoće događaja pomoću tehnika „Stablo događaja“ i „Stablo otkaza“ koje posmatraju kompletan sistem u kom superponiranjem različitih događaja može doći do verovatnoće krajnjeg događaja.
- Ekspertska procena verovatnoće na bazi istorijskih, organizacionih, ekspertskih, projektantskih i drugih podataka.

Ukoliko se ustanovi da neki udes ima zanemarljivo malu verovatnoću, on se dalje ne uzima u razmatranje [175].

3.3.1. Procena godišnje verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti kosina

Američka akademija nauka prilikom razmatranja nestabilnosti usled statičkih opterećenja predlaže tri pristupa [176]:

- Analitički – kada se za potrebe procene verovatnoće računa faktor sigurnosti,
- Empirijski – kada se u obzir uzima ukupan broj zabeleženih udesa i deli sa brojem deponija, odnosno, njihovim životnim vekom kako bi se izračunala verovatnoća, i
- Ekspertski - kada lice koje vrši procenu daje svoj sud o verovatnoći.

Verovatnoća udesa, kao parametar koji određuje nivo rizika, podleže u manjoj ili većoj meri ekspertskoj proceni lica koje vrši procenu rizika, i koliko god se njenoj proceni pristupalo objektivno, ne može se pobeći od činjenice da ima i subjektivnu konotaciju, stoga je preporučljivo verovatnoću prilikom procene vezati za neki empirijski parametar. Nije retka pojava da se faktor sigurnosti koristi prilikom procene verovatnoće udesa [177].

Metoda koja se zasniva na proceni verovatnoće udesa usled nestabilnosti kosina, korelirajući faktor sigurnosti i godišnju verovatnoću udesa ima široku upotrebu u svetu. Ova metoda pruža kvantifikaciju ekspertске procene i kombinuje istorijske podatke i subjektivnu procenu verovatnoće kako bi uspostavila korelaciju između faktora sigurnosti i verovatnoće udesa, pogodnu za upotrebu u inženjerskoj praksi [118].

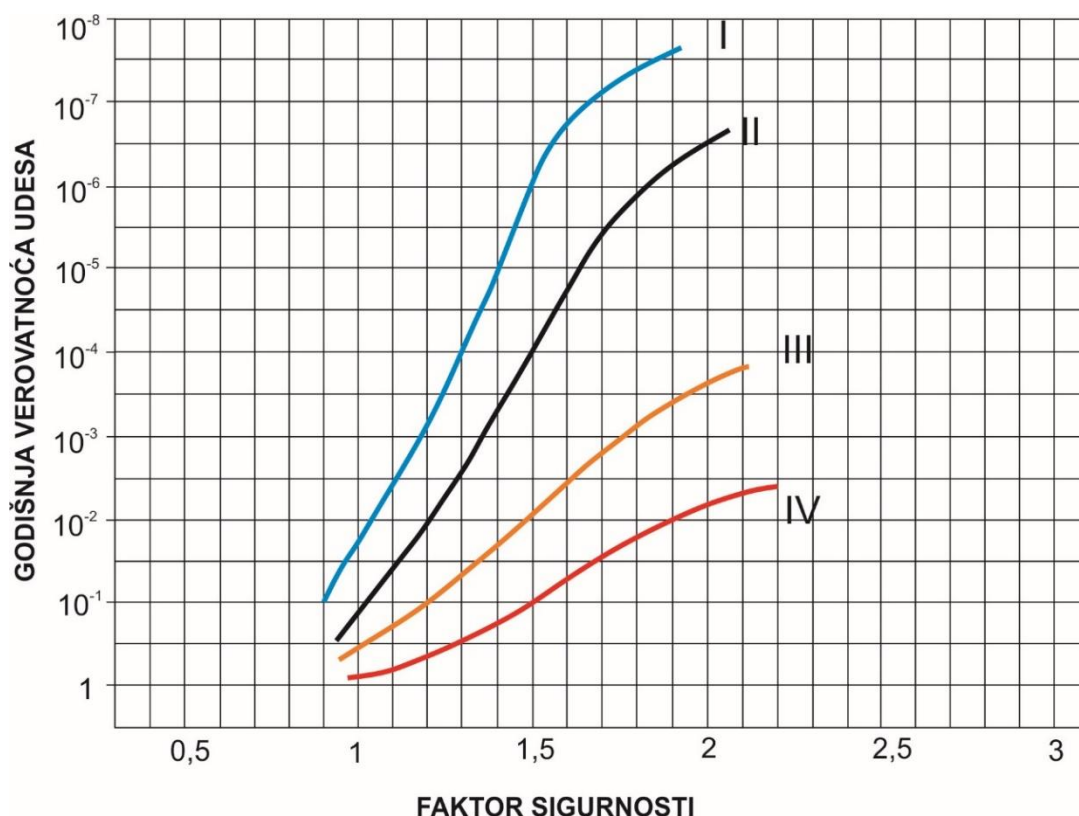
Metoda je posebno korisna licima bez tehničkog predznanja. Iako je faktor sigurnosti donekle apstraktan, verovatnoća udesa je lako razumljiva [178].

U prvoj iteraciji potrebno je ustanoviti kategoriju građevine za koju se određuje verovatnoća udesa.

Postoje 4 kategorije [118]:

1. Kategorija I – građevine koje su projektovane, izgrađene i kojim se upravlja na najboljem mogućem nivou. Generalno, građevine iz ove kategorije imaju veoma značajne potencijalne posledice.
2. Kategorija II - građevine koje su projektovane, izgrađene i kojim se upravlja po standardnim inženjerskim procedurama. U ovu kategoriju spadaju uobičajene, prosečne građevine.
3. Kategorija III – građevine koje nisu projektovane po nekim definisanim standardima. U ovu kategoriju spadaju neke privremene građevine ili građevine sa malim potencijalnim posledicama.
4. Kategorija IV- privremene građevine sa malo ili bez ikakve inženjerske podloge.

Kategorije su definisane na osnovu stepena njihovog nadzora, rukovođenja i opsežnosti projektne dokumentacije. Svaka kategorija ima težinske faktore za definisane kriterijume, čijim se sabiranjem, deponija kategoriše tako da suma faktora može biti od 1-5. Ako se sabiranjem težinskih faktora dobije da se deponija nalazi između dve kategorije, npr. da je suma faktora 1,4, to znači da se ona nalazi između kategorije I i II i interpolacijom se dobija linearna kriva kategorije (locirana na 40% udaljenosti između dve krive) koja vodi do tačne verovatnoće. Svaka kategorija građevina je na slici 28 prikazana odgovarajućom krivom. Na osnovu procenjene kategorije i izračunatog faktora sigurnosti, dobija se godišnja verovatnoća udesa na y-osi [118].



Slika 28. Funkcionalna zavisnost faktora sigurnosti i godišnje verovatnoće udesa, modifikovano prema [118]

Već pri prvoj aproksimaciji se može zaključiti da deponije industrijskog otpada, velikog kapaciteta, najčešće spadaju u prvu ili drugu kategoriju. U treću i četvrtu kategoriju bi se mogle svrstati deponije poput odlagališta otkrivke ili privremeni taložnici. Tačna procena verovatnoće se može vršiti za svaki nasip deponije pojedinačno.

Ovaj princip ocenjivanja verovatnoće udesa, a samim tim i rizika, je dobar kako bi razbio stereotip da je svaki F_s veći od 1 – dobar. Treba napomenuti da su autori uspostavili funkcionalnu zavisnost za konkretan slučaj udesa usled statičke nestabilnosti kosina. Za druge scenarije udesa trebalo bi uspostaviti njima svojstvene funkcionalne zavisnosti [178].

Dakle, u slučaju udesa po scenariju seizmičke nestabilnosti kosina neće se koristiti isti dijagram, upravo zbog sugestije autora i potencijalno nerealne procene verovatnoće.

U tabeli 18 dat je detaljan opis kategorija građevina i predloženi su težinski faktori u zavisnosti od grupe kriterijuma.

Tabela 17. Ocenjivanje stabilnosti objekata i predložene kategorije objekata prema [118], dopunjeno prema [179]

Kategorija	Projektovanje			Implementacija		Uticaj upravnika
	Istraživanje	Testiranje	Analize i dokumentacija	Izgradnja	Rad i monitoring	
I (najviši nivo nadzora) Objekti sa značajnim posledicama usled udesa	Praćenje zabeleženih neregularnosti. Detaljna geotehnička i geološka ispitivanja.	Laboratorijsko ispitivanje uzoraka. Kalibracija instrumenta. Testiranje čvrstoće tla. <i>in situ</i> testovi.	Analiza stabilnosti i utvrđivanje faktora sigurnosti. Dokumentovanje parametara i analiza korišćenih za projektovanje. Tehnička revizija dokumentacije od strane eksternog inženjera. Bez grešaka i propusta.	Revizija dokumentacije, konstantan monitoring i stručni nadzor tokom izgradnje. Izveštaji o aktivnostima u toku izgradnje. Bez grešaka i propusta.	Redovno održavanje, redovna merenja ključnih parametara i obilazak objekta nakon izgradnje od strane inženjera na godišnjem nivou i terenska kontrola od strane upravnika na mesečnom nivou. Redovno održavanje nadzemnih građevina i sistema za kontrolu padavina. Ukazivanje na potencijalne probleme.	Upravnik je stručno i kvalifikovano lice.
t. faktor	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

II (iznad proseka) Uobičajeni objekti	Geotehnička ispitivanja. Ugradnja pijezometara.	Merenje pornih pritisaka, efektivnih napona i čvrstoće tla. Poređenje <i>in situ</i> i laboratorijskih analiza.	Razmatranje opterećenja na terenu prilikom utvrđivanja stabilnosti. Prilagođavanje projektantskih rešenja ukoliko postoje promene geomehničkih parametara terena. Interna revizija.	Revizija dokumentacije, povremeni monitoring, delimični nadzor u toku izgradnje. Bez grešaka i propusta.	Nekoliko obilazaka nakon izgradnje od strane inženjera. Revizija objekta od strane upravnika. Rutinsko održavanje nadzemnih građevina sistema za kontrolu padavina. Ukazivanje na potencijalne probleme od strane eksternog lica.	Upravnik je dovoljno informisan da može da razume sugestije od strane inženjera.
t. faktor	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
III (ispod proseka) Privremeni objekti sa posledicama male značajnosti	Istraživanje površinskih i dubljih profila. Procena nivoa podzemnih voda na osnovu podataka dobijenih iz postojećih bušotina.	<i>In situ</i> testovi i testiranje ukupnog napona na neporemećenim uzorcima.	Racionalne analize korišćenjem parametara dobijenih iz indeks testova. Površni projektantski izveštaji. Monitoring ne vrši stručno lice.	Bez revizije projektne dokumentacije. Neformalni nadzor u toku izgradnje. Površni i nekompletni terenski izveštaji.	Bez nadzora od strane inženjera nakon izgradnje. Nasumičan obilazak terena od strane upravnika, bez pratnje kvalifikovanog inženjera. Održavanje samo u slučaju hitnih intervencija.	Upravnik ima površno znanje od tehničkim aspektima objekta. Odluke donosi u skladu sa budžetom kojim se raspolaze.
t. faktor	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6

IV (malo ili bez nadzora) Privremeni objekti sa malo ili bez inženjerske	Nema terenskih ispitivanja.	Nema laboratorijskih ispitivanja.	Aproksimativna analiza na bazi pretpostavljenih vrednosti parametara.	Geotehnički inženjer nije uključen u podnošenje projektnskog izveštaja.	Nema kontrole. Nema održavanja.	Upravnik nije kvalifikovano lice. Odluke donosi u skladu sa budžetom kojim se raspolaže.
t. faktor	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8

Nakon što se usvoji godišnja verovatnoća, njena vrednost se može protumačiti i kao kvalitativna vrednost. Tumačenje usvojene verovatnoće je prikazano u tabeli 18.

Tabela 18. Tumačenje godišnje verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti kosina

Kvantitativna vrednost	Kvalitativna vrednost	Težinski faktor
1×10^{-1}	Izvesno	7
1×10^{-2}	Veoma velika	6
1×10^{-3}	Velika	5
1×10^{-4}	Srednja	4
1×10^{-5}	Mala	3
1×10^{-6}	Veoma mala	2
1×10^{-7}	Približno jednaka nuli	1

3.3.2. Procena ukupne verovatnoće udesa

Ukupna verovatnoća unije svih udesnih događaja se može utvrditi pomoću teoreme unimodalnih granica. Prema teoremi unimodalnih granica za „n“ pozitivno koreliranih događaja ($E_1, E_2, E_3 \dots E_n$) sa njihovim odgovarajućim verovatnoćama [$P(E_1), P(E_2), P(E_3) \dots P(E_n)$], totalna verovatnoća unije tih događaja [$P(E) = P(E_1 \cup E_2 \cup E_3 \dots \cup E_n)$], leži između donje i gornje granice [180]:

$$\max P(E_i) \leq P(E) \leq 1 - \prod_{i=1}^n [1 - P(E_i)], \quad (3)$$

odnosno,

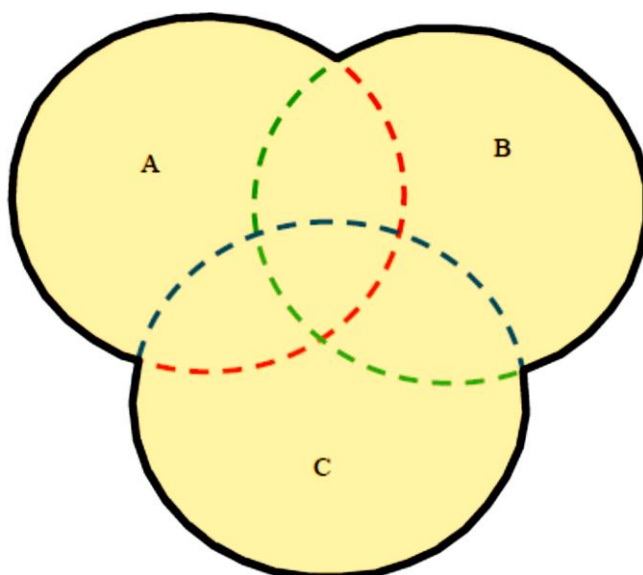
$$\max\{P(E_1), P(E_2), P(E_3)\} \leq P(\text{udesa}) \leq 1 - (1 - P(E_1)) \cdot (1 - P(E_2)) \cdot (1 - P(E_3)) \quad (4)$$

Donja granica važi ako su događaji savršeno korelirani, što znači da jedan događaj može prouzrokovati pojavu drugog, a gornja ako su događaji nekorelirani, odnosno, statistički nezavisni, što znači da jedan događaj nema uticaja na pojavu drugog.

Kada je verovatnoća jednog događaja veća od verovatnoće drugog, tada je mala razlika između gornje i donje granice ukupne verovatnoće.

Ukoliko su verovatnoće pojedinačnih događaja manje od 0,1, tada se gornja granica ukupne verovatnoće može dobiti sabiranjem pojedinačnih verovatnoća sa greškom aproksimacije od 5%.

Ovi događaji i njihove verovatnoće se mogu predstaviti i grafički. Na slici 30 prikazan je Venov dijagram u kom svaki skup u obliku kruga predstavlja pojedinačni događaj.



Slika 29. Venov dijagram za procenu gornje granice ukupne verovatnoće [174]

Ukupna verovatnoća predstavlja procenu površine koju čine sva tri kruga, dok je gornja granica verovatnoće obuhvaćena površinom koja je ograničena isprekidanim linijama, a koja se dobija preklapanjem krugova. Verovatnoća unije dva ili više međusobno isključivih događaja jednaka je sumi njihovih verovatnoća. Na primer, česta je praksa da se seizmička nestabilnost deponije i prelivanje preko krune nasipa razmatraju kao dva međusobno isključiva tipa udesa, te bi ukupna verovatnoća bila jednaka verovatnoći

udesa po scenariju seizmičke nestabilnosti uvećanoj za verovatnoću udesa po scenariju preliivanja [174].

Ovakav način vrednovanja verovatnoće je svojstven tehnikama za kvantitativnu procenu rizika, poput Stabla događaja ili Stabla otkaza. Osnovni preduslov za njihovu primenu je da se verovatnoća događaja izrazi numerički, u rasponu od 0-1, idnisno od 0-100%.

Dobijena vrednost verovatnoće se može i kvalitativno izraziti pomoću tumačenja koja su predložena u tabeli 19.

Tabela 19. Kvalitativni opis verovatnoće [181]

Srednja vrednost verovatnoće, %	Odgovarajući opseg (gornja i donja granica)	Izraz
2	0,5-5	Skoro nemoguće
5	1-15	Veoma neverovatno
10	2-15	Vrlo neverovatno
10	5-15	Vrlo male šanse
15	5-20	Neverovatno
15	10-25	Malo verovatno
20	10-20	Male šanse
40	40-70	Moguće
50	40-60	Srednje šanse
50	45-55	Dobre šanse
70	60-75	Verovatno
70	65-85	Izvesno
80	70-87,5	Vrlo verovatno
80	75-92	Vrlo izvesno
85	80-92	Velike šanse
90	75-90	Veoma verovatno
90	85-99	Veoma velike šanse
90	90-99,5	Gotovo izvesno

Verovatnoća događaja koji je izvestan da će se dogoditi se usvaja kao 99,5%, nikada kao 100%, iz razloga što se tada smatra da rizik ne postoji.

4. POSLEDICE UDESA

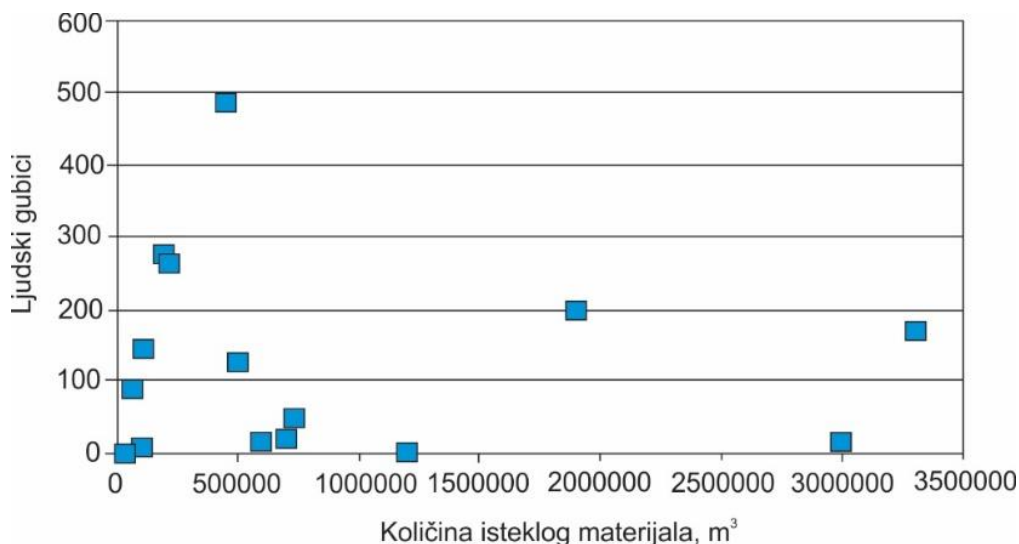
Udesi na deponijama industrijskog otpada mogu nositi sa sobom različite posledice. Bitno je prilikom razmatranja posledice po okolinu, poput ljudskih žrtava, ne poistovećivati sa efektima udesa *in situ*, poput oštećenja drenažnog sistema deponije [33].

Procena posledica podrazumeva u prvom redu analizu poplavnog talasa do čijeg formiranja može doći usled udesa na deponiji, a od čijih veličina zavisi realna procena posledica.

Posledice se mogu svrstati u tri glavne grupe:

- ljudske žrtve,
- ekonomske i
- ekološke.

Zanimljivo je to da, na osnovu zabeleženih slučajeva udesa u prošlosti, ne postoji nikakva funkcionalna zavisnost između količine isteklog materijala i ljudskih gubitaka, kao što se može videti na slici 30. Nedostatak adekvatnih informacija dovodi do toga da se u medijima sve vrste otpada smatraju „toksičnim“, a svi udesi „katastrofalnim koji uzrokuju ogromnu ekološku štetu“ [80].



Slika 30. Količine isteklog materijala prema zabeleženim ljudskim gubicima prilikom udesa na deponijama industrijskog otpada [80]

Ekonomске posledice predstavljaju materijalnu štetu nastalu usled udesa i one obuhvataju:

- Troškove saniranja degradiranih površina;
- Štete na infrastrukturnim objektima (kućama, putevima, dalekovodima...);
- Privremeni ili trajni prekid eksploatacije deponije, koji se nužno odražava na rad privrednog subjekta u čijem je vlasništvu deponija.

Ove posledice su kratkoročne i njihovo saniranje je izvesno i moguće.

Ekološke posledice su posledice čiji su efekti najčešće dugoročni i čije ublažavanje iziskuje puno vremena i sredstava. Ove posledice u globalu podrazumevaju degradiranje kvaliteta površinskih i podzemnih voda, zemljišta i vazduha u okolini deponije, što preciznije obuhvata:

- Dugoročno izluživanje metala iz izlivenog otpada u okolinu;
- Narušavanje vegetacije;
- Narušavanje životinjskih staništa;
- Emisiju prašine i gasova sa skorele površine izlivenog otpada itd.

4.1. Analiza poplavnog talasa

Korak koji je krucijalan za predviđanje posledica udesa jeste razmatranje karakteristika poplavnog talasa. Poplavni talas, osim što može izazvati dugotrajno zagađenje životne sredine, može prouzrokovati i ljudske žrtve. Od njegove veličine zavisi magnituda posledica udesa, a samim tim i nivo rizika jedne deponije.

Poplavni talas je pojava koja nastaje kada:

- Voda u otpadu povećava porni pritisak i smanjuje čvrstoću na smicanje materijala od kog je nasip deponije izgrađen, čime nestaje sila kohezije koja drži čestice na okupu, pa dolazi do proboja nasipa, što uzrokuje isticanje materijala iz deponije, i
- Dolazi do preliivanja vode preko krune nasipa usled priliva velike količine atmosferskih padavina u akumulacioni prostor deponije.

Do tečenja sedimenata dolazi kada se deo potencijalne energije vode pretvori u kinetičku energiju sedimenata [182].

Kako je navedeno u [56], analizu poplavnog talasa bi trebalo sprovesti bez obzira na zapreminu deponije ili visinu nasipa. Prilikom analize poplavnog talasa uvode se određene pretpostavke vezane za trajanje rušenja nasipa deponije, kao i način rušenja.

Trajanje rušenja može biti [56]:

- skoro trenutno – kada se radi o branama izrađenim od betona, ili o udesima usled likvefakcije, i
- postepeno – kada se radi o jalovišnim nasipima i udesima koji nisu izazvani likvefakcijom.

Način rušenja može biti [60]:

- potpun – uz formiranje breše u telu nasipa, kada je nasip koji pregrađuje izrazito usku dolinu, i
- delimičan – ako je dolina široka.

Takođe, treba uzeti u obzir izdeljenost deponije na kasete, kao i raspored tih kaset. Ako se radi o kaskadnim deponijama, može se manifestovati “domino” efekat. Rušenje jedne brane i isticanje materijala može uzrokovati rušenje drugih nizvodnih brana. Takav slučaj je zabeležen kod deponije Stava u Italiji 1985. godine [169].

Sa druge strane, ako je nizvodna brana kod kaskadne deponije takvih dimenzija da ima dovoljnu zapreminu sigurnosnog nadvišenja da prihvati istekli materijal iz prethodne kasete, ona može stvoriti „tampon” efekat i sprečiti, ili bar ublažiti posledice [71].

4.1.1. Faktori koji utiču na tok materijala

Prilikom razmatranja isticanja odloženog materijala izvan akumulacionog prostora deponije, treba uzeti u obzir nekoliko najznačajnijih faktora kako bi se doneli što realniji zaključci.

Na tečenje otpada prilikom njenog isticanja preko krune nasipa ili kroz brešu utiču:

1. Događaj koji inicira isticanje materijala;
2. Masena koncentracija čvrstog u jalovini;
3. Reološke karakteristike hidromešavine;
4. Mineraloške karakteristike otpada;
5. Operativne karakteristike deponije;

6. Topografske karakteristike terena u okolini deponije;
7. Karakteristike vodotokova u okolini deponije;
8. Mesto razvoja i karakteristike breše (ukoliko se radi o proboju nasipa).

Događaj koji inicira tečenje otpada

Kada se govori o događaju koji je „okidač“ udesa, prvenstveno se razmatra po kom mehanizmu bi se udes mogao dogoditi.

Specifičnosti tečenja otpada po različitim mehanizmima su:

- Prelivanje – isticanje otpada relativno dugo traje. Tada može doći do isticanja nešto veće količine otpada iz deponije, usled veće količine slobodne vode u deponiji, u odnosu na druge tipove udesa, izuzev likvefakcije [183];
- Isticanje materijala kroz brešu – isticanje traje kraće nego kod prelivanja, a duže nego kod likvefakcije kao inicijalnog događaja;
- Likvefakcija – isticanje traje kratko, gotovo trenutno, uz isticanje velike količine materijala.

Masena koncentracija čvrstog u jalovini

Što je veći udeo čvrstog u hidromešavini, to je potrebna veća potencijalna energija da se ona pokrene. Generalno, „gušće“ tehnologije odlaganja otpada doprinose većoj stabilnosti deponija. Što je veća koncentracija hidromešavine, to je i kretanje talasa usporenije [184].

Takođe, što je veći udeo čvrstog u hidromešavini, to je veća visina poplavnog talasa [60]. Pri koncentracijama čvrstog od 4-36% javljaju se dubine talasa od 10 do 25% veće od talasa čiste vode [185].

Reološke karakteristike otpada

Reologija je nauka o fluidnosti materijala koji obuhvata čvrstu i tečnu fazu i sklono je plastičnim deformacijama [31]. U reologiji, otpad u obliku hidromešavine se može klasifikovati kao njutnovski sistem, koji podleže Njutnovom zakonu viskoziteta u oblasti laminarnog kretanja, i nenjutnovski sistem, koji ne podleže Njutnovom zakonu viskoziteta. Nenjutnovski sistemi (fluidi) pokazuju i laminarno i turbulentno kretanje, dok se razlike između njutnovskih i nenjutnovskih fluida uočavaju isključivo prilikom režima laminarnog kretanja.

Tok hidromešavine se može podeliti i na laminarni i turbulenti tok [186]. Najpre se pojavljuje turbulentni tok, koji je vrtložni tip toka, pri kom se fluid kreće u svim pravcima, stvarajući vrtloge. Tada dolazi do intenzivnog mešanja čestica fluida. Nakon njega nastupa laminarni tok koji je relativno miran, u paralelnim slojevima koji se ne mešaju, bez turbulencija. Prilikom turbulentnog toka dolazi do veće potrošnje energije, te su naponi koji prate ovaj tok veći, nego prilikom laminarnog toka [187].

Kada su u turbulentnom režimu kretanja, nenjutnovski fluidi se ponašaju isto kao njutnovski [188].

Njutnov zakon viskoziteta glasi [106, 187, 189, 190, 191, 192]:

$$\mu = \frac{F}{A} \cdot \frac{dx}{dv} \quad (5)$$

gde je:

μ - viskozitet, [Pa·s]

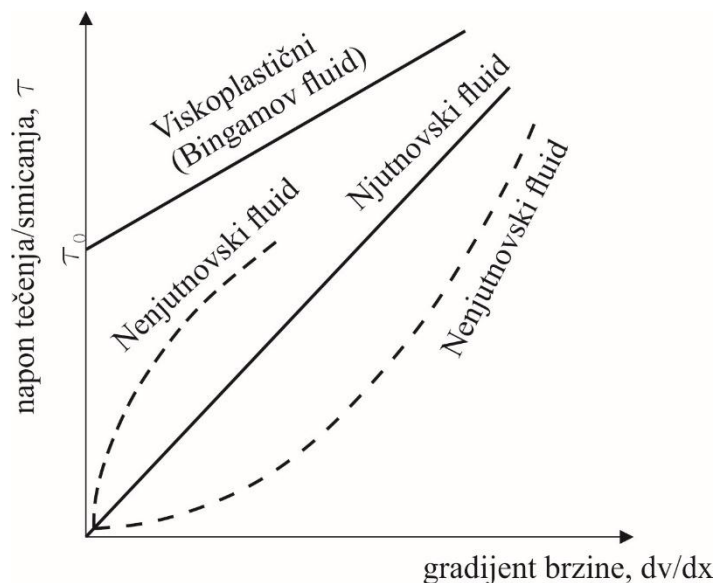
F- sila koja inicira tečenje fluida, [N]

A – površina između dva sloja fluida na rastojanju dx koja se kreću različitim brzinama, [m²]

dv/dx – gradijent brzine [m/s/m]

Količnik F/A se naziva napon smicanja (τ). Gradijent brzine dv/dx se drugačije naziva brzina smicanja.

Na slici 31 prikazani su reološki modeli fluida. Kod klasičnih njutnovskih fluida, kakav je voda, postoji linearna zavisnost između napona smicanja i brzine smicanja. Nagib krive fluida određuje viskoznost fluida.



Slika 31. Reološki modeli fluida [188, 189, 191, 192, 193]

Bingamov plastični fluid je vremenski nezavisan fluid čiji viskozitet opada sa brzinom smicanja i najčešće ima laminarni tok. Industrijski otpadi mineralnog porekla u obliku hidromešavine se najčešće poistovećuju sa idelnim plastičnim sistemima, odnosno, Bingamovim fluidima. Ovaj tvrdnja jedino ne može da se primeni na otpad koji nastaje prilikom prerade fosfatne rude, čije tečenje ima karakteristike turbulentnog toka i parametri viskoziteta i snaga su niži nego kod ostalih otpadnih materijala [193, 189, 191, 192, 188].

Napon smicanja se razvija kod hidromešavina čiji je maseni udeo vode ispod 30%, što ih čini klasičnim Bingamovim fluidima. Na manjem sadržaju vode u hidromešavini, granični napon smicanja počinje da dominira nad viskozitetom [136]. U njutnovske fluide se ubrajaju hidromešavine sa masenim udelom čvrstog do 10% [194].

Pod ključnim reološkim karakteristikama otpada koji je sklon tečenju ubrajaju se:

- viskozitet,
- čvrstoća smicanja,
- napon tečenja,
- napon smicanja, τ
- brzina smicanja.

Viskozitet ili unutrašnje trenje predstavlja svojstvo otpada u obliku hidromešavine da pruža otpor kretanju svojih čestica. Ovo je jedno od najbitnijih svojstava bilo kog tečnog materijala. Podstiče se unutar molekularnim kretanjem tečnosti, a manifestuje se tako što, prilikom premeštanja slojeva tečnosti (deformacijom zapremine), u njoj nastaju sile trenja [190].

Čvrstoća smicanja predstavlja veličinu sile smicanja koju otpad može da podnese, a da ne dođe do klizanja, i zavisi od mineraloških karakteristika otpada, granulometrijskog sastava i sadržaja vode u otpadu [41].

Čvrstoća smicanja raste sa povećanjem masene koncentracije čvrstog u hidromešavini, a zavisi i od inicijalnog događaja udesa. Takođe, što su čestice sitnije u hidromešavini, to je čvrstoća smicanja manja. Što više vode ima u deponiji, odloženi otpad je „teži“ i usled sile gravitacije vrši veći pritisak na nasip, pa čvrstoća smicanja nadmašuje otpor na smicanje materijala od kog je izgrađen nasip. Tada dolazi do porasta pornog pritiska unutar deponije, što čini da voda utiče na pokretanje zrna.

Suvi otpad ima oko 5000 puta veću čvrstoću smicanja od mokrog otpada, što ga čini stabilnijim [195], dok je pri jednom od najvećih udesa na deponijama industrijskog otpada pri kojoj je došlo do isticanja likvefikovanog otpada koji je putovao čak 32 km, na Bafokeng deponiji, zabeležena čvrstoća smicanja od oko 2 kPa [196].

Čvrstoća smicanja deponovanog materijala po zonama segregacije unutar deponije iznosi [197]:

- Zona 1 (plaža, pesak): 20 - >50 kPa;
- Zona 2 (prostor između plaže i mulja): 5-50 kPa;
- Zona 3 (mulj): <5 kPa (na površini), 5-20 kPa (po dubini).

Ako se čvrstoća smicanja smanjuje sa smanjenjem krupnoće čestica, napon tečenja raste, jer raste učešće glinovitih čestica. Napon tečenja (τ_0) je kritična veličina napona smicanja ispod koje se viskoplastični materijali ponašaju kao čvrsti materijali, a iznad koje se plastični materijali deformišu i počinju da teku [198]. Definiše se kao minimalni napon potreban da izazove tečenje hidromešavine, a drugačije se naziva i prinosni napon. Plastični sistemi ne pokazuju tečenje pri naponima koji su manji od napona tečenja za te

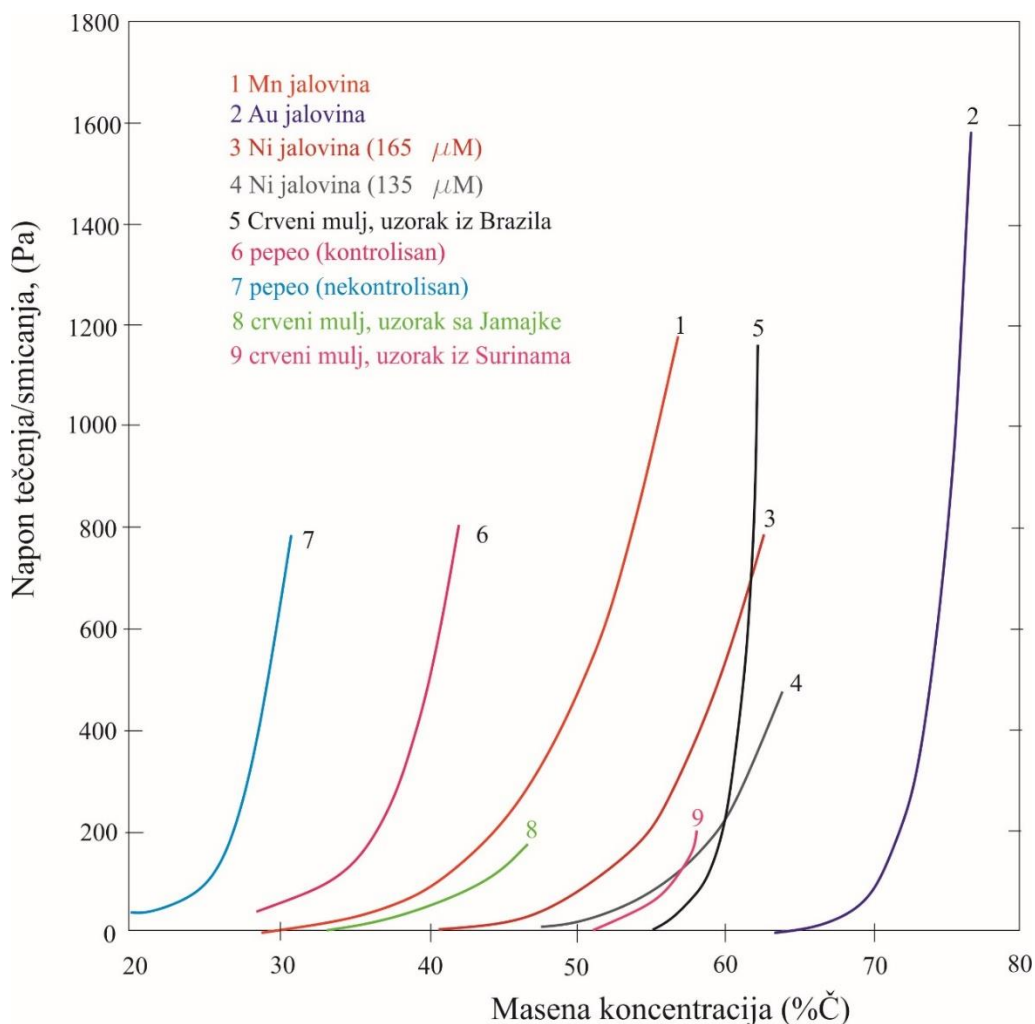
sisteme. Kada se ovi naponi dostignu, plastični sistemi počinju da se ponašaju kao tečnost. Uzrok tome je stalno uzajamno dejstvo čestica hidromešavine [189].

Na slici 32 je prikazana zavisnost između napona tečenja/smicanja i koncentracije otpada. Može se zaključiti da vrednost napona tečenja/smicanja raste sa povećanjem koncentracije otpada, odnosno gustine. Ose grafikona nisu dimenzionisane jer položaj krive u odnosu na ose je prvenstveno u funkciji veličine čestica i mineraloških karakteristika otpada [199].



Slika 32. Vrednosti napona tečenja/smicanja u zavisnosti od koncentracije otpada, modifikovano prema [199]

Ovakve krive se mogu uspostaviti za različite vrste otpada mineralnog porekla. Na osnovu slike 33 se može ustanoviti da jedino pepeo, bilo da se radi o kontrolisanom (sa dodatkom Ca) ili nekontrolisanom, od prikazanih vrsta otpada ima određeni prinosni napon, potreban da krene njegovo tečenje. Iako su nepoznate krupnoće uzoraka prikazanih otpada, može se zaključiti da što je materijal sitniji i uniformniji, pri malom povećanju koncentracije čvrstog u hidromešavini, veće je povećanje napona. Ovo je pogotovo uočljivo kod crvenog mulja, koji spada u sitne otpade. Generalno, crveni mulj je, sudeći po malim naponima tečenja potrebnim da dođe do njegovog tečenja, najfluidniji otpad od svih razmatranih.



Slika 33. Napon tečenja/smicanja različitih vrsta otpada, modifikovano prema [193]

Napon smicanja je otpor po jedinici površine nekog tela koja se razvija kada na telo deluje sila smicanja. Čvrstoća smicanja je konstantna veličina, dok napon varira u zavisnosti od sile koja deluje na telo. Takođe, čvrstoća je svojstvo tela da podnese neko opterećenje koje deluje na njega, dok je napon sila koja se razvija u samom telu, kao efekat delovanja eksterne sile na telo. Zapravo, čvrstoća smicanja je maksimalni napon smicanja koji se razvija u trenutku rušenja deponije [187].

Do nestabilnosti nasipa može doći ukoliko se napon smicanja izjednači sa čvrstoćom na smicanje [200].

Na osnovu formule za Njutnov zakon viskoziteta (formula 5) može se izvesti formula za napon smicanja, koja za njutnovske tečnosti glasi [106, 187, 189, 190, 191, 192]:

$$\tau = \mu \cdot \frac{dv}{dx} \quad (6)$$

gde je:

τ - napon smicanja, [Pa=N/m²]

μ – viskozitet, [Pa·s=N/m²·s], i

$\frac{dv}{dx}$ – gradijent brzine (brzina smicanja) [m/s/m]

Nejutnovske tečnosti počinju da teku kada napon smicanja prekorači napon tečenja, pa je tada brzina smicanja jednaka nuli [106, 187, 189, 190, 191, 192, 198]:

$$\frac{dv}{dx} = 0, (\tau < \tau_0) \quad (7)$$

gde je

τ_0 – napon tečenja, (Pa)

Kod neutnovskih tečnosti, viskozitet je u funkciji napona smicanja koji se računa kao [106, 187, 189, 190, 191, 192, 198]:

$$\tau = \tau_0 + \mu \left(\frac{dv}{dx} \right), (\tau > \tau_0) \quad (8)$$

Gradijent brzine je pokazatelj koliko se brzo materijal smiče [188, 198].

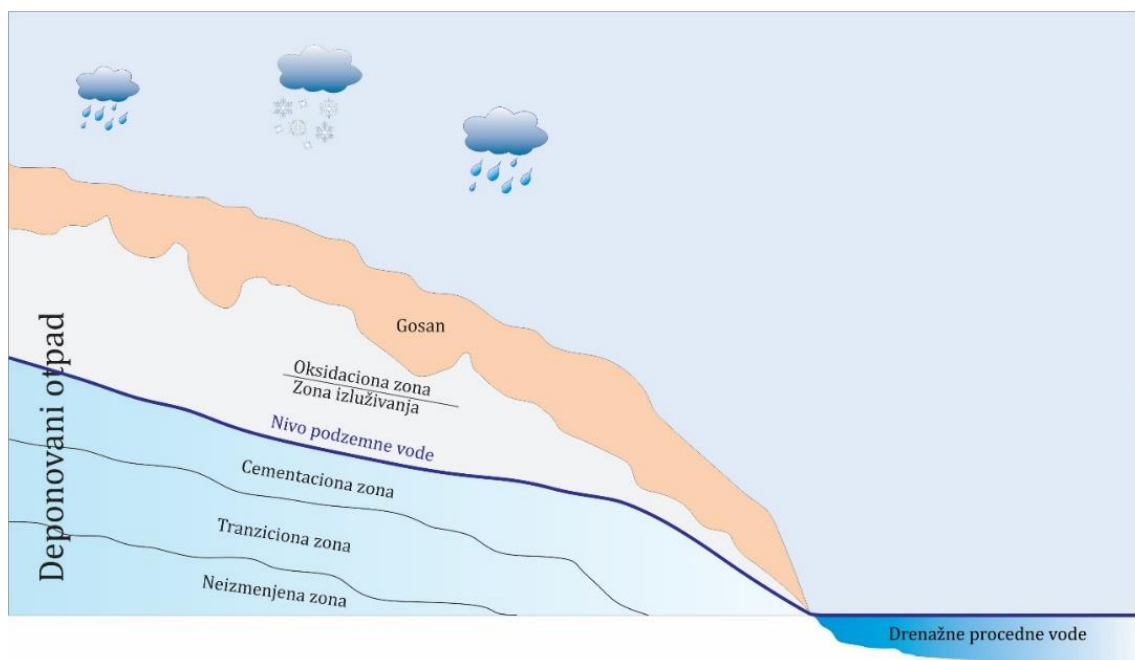
Mineraloške karakteristike otpada

Kod mineraloških karakteristika otpada od važnosti za razumevanje njegovih geomehaničkih karakteristika misli se prvenstveno na sposobnost alteracije minerala otpada – stepen cementacije, oksidacije i redukcije.

Novi minerali nastaju u zonama sekundarnog bogaćenja precipitacijom iz rastvora usled intenzivne oksidacije postojećih minerala. Svi procesi koji menjaju mineraloški sastav i strukturu deponovanog otpada unutar deponije se mogu podeliti u tri zone [90]:

- Oksidaciona zona - Prva zona u kojoj je oksidacija i izluživanje metala najintenzivnije uz pomoć kiseonika i atmosferskih voda;
- Redukciona zona - koja se nadovezuje na oksidacionu zonu u nivou podzemnih voda, i, nakon nje dolazi
- Zona sekundarnog obogaćivanja sulfidnih minerala.

Na slici 34 je dat presek kroz flotacijsku jalovinu iz procesa koncentracije sulfidnih minerala na jednoj deponiji.



Slika 34. Presek kroz flotacijsko jalovište, jalovina iz procesa koncentracije sulfidnih minerala, modifikovano prema [90]

Mineraloške karakteristike otpada, posebno cementacija materijala može da poveća otpornost na likvefakciju za 250% tokom 30 god [88]. Ova reakcija je posebno izražena kod pepela. Međutim, ako do cementacije dođe brzo nakon odlaganja, usled pucolanske reakcije, može se stvoriti krut matriks, sklon pucanju pod dinamičkim udarom poput zemljotresa [137]. Takođe, oksidacijom sulfidnih minerala otpada doprinosi se izluživanju toksičnih supstanci u okolinu [136]. Koliko su mineraloške karakteristike bitne za geotehničku stabilnost deponije, toliko su bitne i za ekološku stabilnost.

Operativne karakteristike deponije

Pod operativnim karakteristikama deponije se prvenstveno misli na njenu visinu i zapreminu. Potom treba razmotriti položaj i dubinu taložnog jezera, dužinu plaže, dužinu nasipa, slivno područje i tip deponije.

Iako se u prvi mah čini da je kod većih deponija - veći potencijal tečenja otpada, statistika pokazuje drugačije. U prošlosti su se češće udesi dešavali na malim deponijama (visine

<15 m), što se može pripisati činjenici da se velikim deponijama posvećuje više pažnje od projektovanja do održavanja [82].

Tip deponije svakako može diktirati tok otpada. Deponije u udubljenju, ukoliko se održavaju u stabilnom operativnom stanju, imaju manji potencijal tečenja otpada nego deponije koje su omeđene nasipom.

Taložno jezero koje je locirano bliže nasipu može prouzrokovati njegovu nestabilnost. Što je plaža deponije šira, to je taložno jezero dalje od krune brane, te je manja verovatnoća da dođe do udesa.

Topografske karakteristike terena u okolini deponije

Uticaj topografskih karakteristika terena na tečenje materijala je jasan. Što je reljef terena ravniji, to će poplavni talas imati manju brzinu, nego kod strmijih terena. Uzima se u obzir i nadmorska visina okolnog terena, a njen rast nizvodno od deponije može imati funkciju tampon zone u slučaju isticanja materijala izvan deponije. Takođe, ukoliko teren nizvodno od deponije ima dosta prirodnih uvala one mogu biti u funkciji kanala koje bi talas sledio.

Na tok guste hidromešavine na ravnom terenu u većoj meri utiču viskozitet i napon tečenja, dok na tok ređe hidromešavine na strmom terenu, veći uticaj ima napon turbulencije [60]. Kako hidromešavina uspostavlja tok, on će biti ometan silom trenja i viskoziteta, koje nastaju usled kontakta površine zemlje i hidromešavine, a koji može biti ubrzan ili usporen usled nagiba terena, u zavisnosti od toga da li tok ide uzbrdo ili nizbrdo [201].

Topografske podloge se sastoje od geodetskih karata u razmerama 1:5000 ili 1:10000. U slučaju kada je zapremina osnovnog korita mnogo manja od zapremine poplavnog talasa, mogu se koristiti i karte razmere 1:25000. Topografske podloge obuhvataju i poprečne profile snimljene na terenu, kao i krive zapremine i površine deponije, određene planimetrisanjem situacionih planova [56].

Karakteristike vodotokova u okolini deponije

Otpad prilikom isticanja iz deponije teži da pruži manji otpor tečenju, i često se pridružuje vodotoku nizvodno od deponije, kada se razmatra kao jednodimenzionalni model tečenja.

Sve karakteristike toka poplavnog talasa otpada se tada poistovećuju sa karakteristikama vodotoka koji sudeluje u tečenju.

U te svrhe, potrebno je prikupiti hidrološke podloge koje se sastoje od karakterističnih srednjih nivoa/protoka, a koji su dobijeni statističkom obradom rezultata merenja u profilima vodomernih stanica, kao i ekstremnih nivoa/protoka ocenjenih na osnovu sintetičkih hidrograma velikih voda određene verovatnoće pojave [56].

Mesto razvoja i karakteristike breše

Od mesta razvijanja breše u telu nasipa deponije zavisi koji će stratum odloženog otpada biti zahvaćen. Što se breša razvije u višim delovima nasipa, bliže kruni, to će nekonsolidovaniji delovi otpada biti zahvaćeni.

Prema najgorem mogućem scenariju, može se pretpostaviti da je konačna visina breše jednaka visini nasipa deponije, dok je konačna širina breše u dnu reda veličine 1-3 visine nasipa. Pretpostavlja se da je breša jednostavnog geometrijskog oblika, trapeznog ili pravougaonog [56, 194, 202].

4.1.2. Mehanizam tečenja

Kod deponija industrijskog otpada mineralnog porekla isticanje otpada se odigrava kroz dva mehanizma [203]:

- inicijalni poplavni talas, i
- tok likvefikovanog materijala.

Ovi mehanizmi se mnogo razlikuju prema riziku koji sa sobom nose, tako da likvefikovani otpad stvara talas daleko većih razmera, pa tako i veće posledice može prouzrokovati.

Inicijalni poplavni talas se dešava neposredno nakon prelivanja/rušenja nasipa deponije. Slobodna voda iz taložnog jezera ističe izvan deponije i istovremeno pokreće odloženi otpad, kao i materijal od kog je nasip izgrađen [203]. Do ovakvog mehanizma tečenja dolazi kod deponija sa fimiranim taložnim jezerom.

Tok likvefikovanog materijala je mehanizam koji je uslovljen pozitivnim potencijalom likvefakcije materijala. Kod deponija sa malo ili bez slobodne vode, mehanizam tečenja likvefikovanog materijala može biti jedini mehanizam tečenja. Ovaj tok karakteriše

izuzetno velika brzina, >5 m/s [204]. Likvefikovani materijal se u potpunosti može poistovetiti sa Bingamovom plastičnim fluidom [205, 206, 207, 208].

Ako se inicijalni poplavni talas donekle i može modelirati kao voda, s obzirom da se ovaj mehanizam najčešće dešava usled priliva velike količine atmosferskih padavina, tok likvefikovanog otpada ne može ni u kom slučaju [203].

4.1.3. Tip toka

Postoje 4 tipa toka sitnozrnog materijala koji su definisani prema reološkom ponašanju materijala i karakteristikama toka (udeo čvrstog i brzina) [209]:

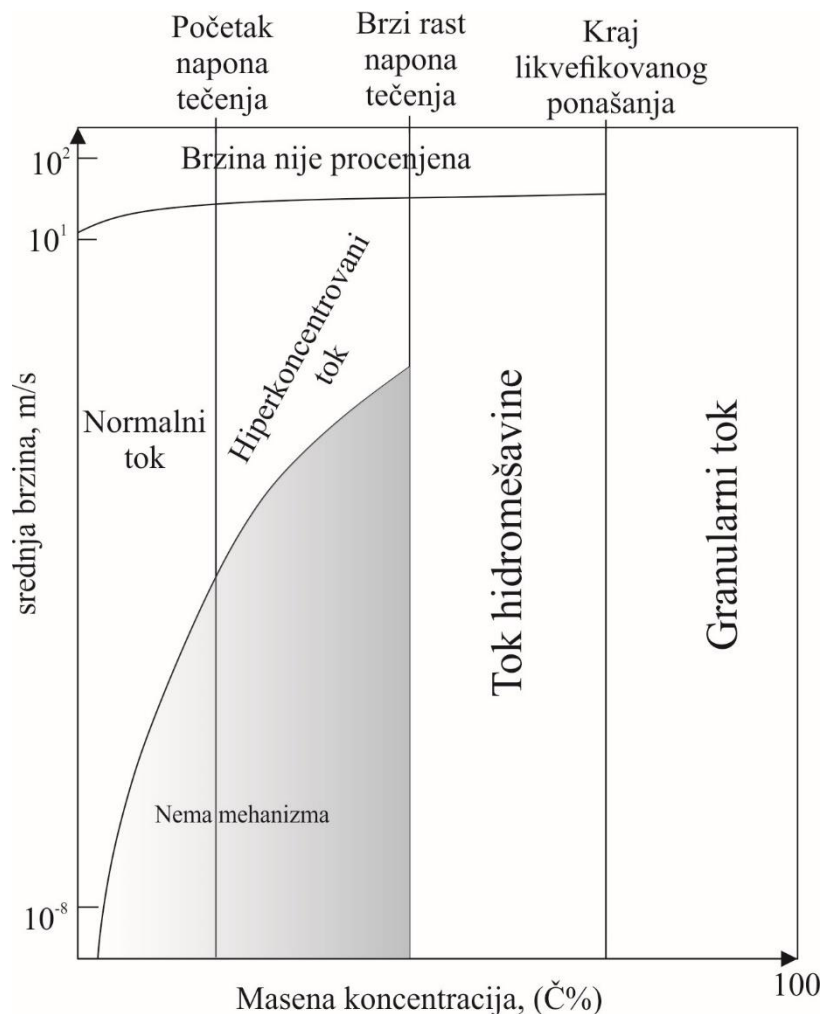
- Normalni tok – tok vode sa malim udelom suspendovanih sitnih čestica koje ne remete ponašanje toka voda. To je klasičan njutnovski fluid.
- Hiperkoncentrovan tok – tok koji odlikuje masena koncentracija čestica od 40-80%. Tok opisuje fluid koji je blago plastičan i spada u grupu nenjutnovskih fluida. Ovaj tok zajedno sa normalnim tokom spada u grupu “tečnih” tokova.
- Tok hidromešavine – sa povećanjem udela čvrstog tok poprima karakteristike plastičnog fluida i biva delimično likvefikovan. Indeks tečenja je >1 .
- Granularni tok – počinje kada je udeo čvrstog toliki da tok više ne pokazuje likvefikovano ponašanje. Indeks tečenja je <1 . Ovaj tok zajedno sa tokom hidromešavine spada u grupu „plastičnih” tokova.

Tačne reološke granice zavise od napona tečenja hidromešavine, koji zavisi od koncentracije čvrstog i granulometrijskog sastava čestica, tabela 20.

Tabela 20. Modifikovana reološka klasifikacija tokova hidromešavine prema [195]

Tip fluida	Njutnovski	Nenjutnovski		
Meduprostorni fluid	voda	Voda+čvrsti otpad		Voda+čvrsti otpad+vazduh
Kategorija toka	Normalni tok	Hiperkoncentrovani tok	Tok hidromešavine	Granularni tok
Ponašanje toka	Tečno		Plastično	

Sa povećanjem napona tečenja usled povećanja udela čvrstog, normalni tok prelazi u hiperkoncentrovani tok, pa zatim u tok hidromešavine. Granularni tok počinje kada je udeo čvrstog toliki da tok kontroliše kolizija između čestica, slika 35 [195].

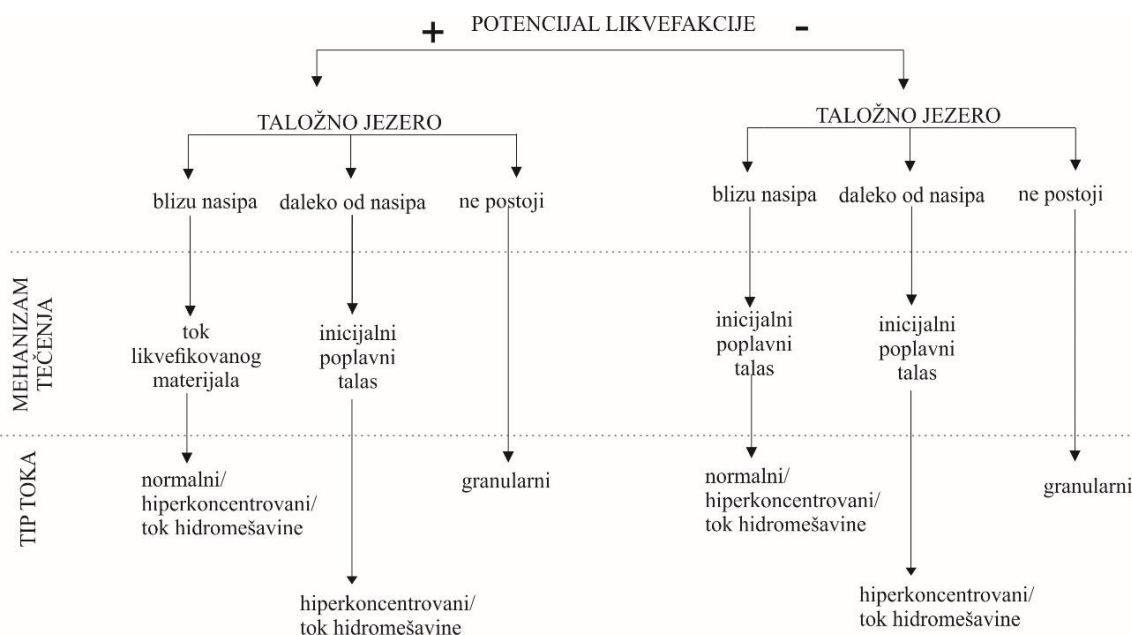


Slika 35. Promena tipa toka u zavisnosti od napona tečenja i udela čvrstog u hidromešavini, modifikovano prema [195]

Prema Kanadskom udruženju za brane (CDA) prilikom razmatranja toka materijala, u prvoj iteraciji bi trebalo razmotriti potencijal likvefakcije odloženog materijala, a zatim konstatovati postojanje taložnog jezera na deponiji. Postojanje taložnog jezera na deponiji automatski znači da može doći do formiranja poplavnog talasa. Kada materijal ima pozitivan potencijal likvefakcije i postoji taložno jezero blizu nasipa, to znači da se može stvoriti poplavni talas koji pokreće veliku količinu materijala [210]. Tada dolazi do toka likvefikovanog materijala. Takav mehanizam isticanja, u zavisnosti od udela čvrstog u hidromešavini, može imati karakteristike normalnog (retko) ili hiperkoncentrovanog toka koji brzo prelazi u tzv. tok hidromešavine.

Ukoliko je potencijal likvefakcije pozitivan, a jezera nema ili je daleko od nasipa, pa ne može inicijalno sudelovati u rušenju nasipa, dolazi do fomiranja plastičnog toka, koji

varira od toka hidromešavine do granularnog, u zavisnosti od udela vode u otpadu. Negativan potencijal likvefakcije i postojanje taložnog jezera ukazuju na formiranje poplavnog talasa pri kom voda iznosi erodovani čvrsti materijal koji dalje biva transportovan vodom. Tada dolazi do isticanja materijala po mehanizmu inicijalnog poplavnog talasa. Tip toka može biti normalni (retko), hiperkoncentrovani ili tok hidromešavine, u zavisnosti od udela čvrstog u hidromešavini. I na kraju, kada je potencijal likvefakcije negativan i nema taložnog jezera, ili je ono daleko od nasipa, tada dolazi do klasičnog odronjavanja materijala nasipa, bez tečenja materijala, slika 36 [210].



Slika 36. Mehanizma tečenja i tip toka materijala u zavisnosti od potencijala likvefakcije i taložnog jezera, sublimirana razmatranja prema [210, 211]

Iako prema Kanadskom udruženju za brane nema potrebe da se u ovom slučaju razmatra rastojanje i uticaj odronjenog materijala na okolinu nizvodno, kod hidrauličkih deponija, mogućim superponiranjem udesa, mogu se stvoriti uslovi za naknadno isticanje dodatnih količina materijala iz deponije usled deformisanja nasipa, te se preporučuje preventivno predviđanje tipa toka i svih njegovih parametara (količine i rastojanja) potrebnih za procenu rizika.

Dakle, granularni tok se može stvoriti samo u slučaju suvih deponija, dok taložno jezero, bilo ono blizu ili daleko od nasipa, može inicirati formiranje poplavnog talasa.

Na osnovu iznetih činjenica može se zaključiti da će poplavni talas biti najvećih razmera kada je velika verovatnoća da do likvefakcije materijala dođe i kada je taložno jezero blizu nasipa koji se ruši. Tada se može smatrati da će isteći veće količine materijala, nego u bilo kom drugom slučaju.

4.1.4. Modeliranje poplavnog talasa

U svetskoj praksi postoji malo istraživanja koja su se bavila modeliranjem poplavnog talasa usled proboja nasipa deponija. Pretpostavke, pristupi i interpretacije rezultata koje postoje variraju široko [91].

Najosetljiviji parametri poplavnog talasa, a ujedno i najbitniji za predviđanje značajnosti potencijalnih posledica usled udesa su:

- Količina isteklog materijala izvan deponije i
- Pređeno rastojanje.

Ako se ova dva parametra adekvatno procene, proceni posledica se može pristupiti na realan način.

Parametri poplavnog talasa hidromešavine koji su pored nabrojanih podložni modeliranju su:

- Maksimalna tačka isticaja;
- Vreme trajanja isticanja;
- Brzina isteklog materijala;
- Visina talasa.

Parametri talasa koji se ekspertski predviđaju su [201]:

- Dimenzije i mesto razvoja breše;
- Ruta poplavnog talasa;
- Visina deponije u trenutku proboja.

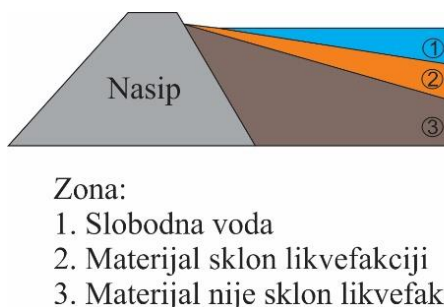
U literaturi se pominju različite metode i alati za modeliranje poplavnog talasa poput:

- Numeričkih simulacija poplavnog talasa pomoću nekog softvera – poput DAMBRK-a, FLO-2D-a, BREACH-a itd. Relevantnost dobijenih podataka umnogome zavisi od stručnosti lica koje vrši modeliranje i njegovog poznavanja zakona mehanike fluida i

hidraulike. Takođe, neki aspekti softverskog modeliranja uključuju i subjektivne procene određenih parametara talasa, kao i idealizovanje određenih uslova, te se ne može garantovati pouzdanost i objektivnost dobijenih podataka.

- Pisanih uputstava za usvajanje ključnih parametara poplavnog talasa – koji su se pokazali kao površan pristup modeliranju poplavnog talasa jer su uglavnom bazirana na karakteristikama brana za akumulaciju vode.
- Statističkih analiziranja istorijskih podataka i uspostavljanja korelacije između parametara talasa – najlakši metod predviđanja parametara potencijalnog poplavnog talasa, koji je u potpunosti objektivan, premda relevantnost zavisi od kvaliteta, kvantiteta i istinitosti zabeleženih podataka.

Na slici 37 mogu se uočiti zone koje se modeliraju pomoću različitih softvera. Na primer, zona 1 je sačinjena od slobodne vode koja se može modelirati pomoću HEC-RAS softvera. Za zonu 2 pogodan je softver poput FLO-2D, dok je za zonu 3 pogodan DAN3D.



Slika 37. Zone koje se mogu izdvojiti pri modeliranju poplavnog talasa

Dakle, ne postoji jedinstven softver koji bi mogao obuhvatiti sve tri zone.

Na osnovu iznetih činjenica može se zaključiti da je predviđanje karakteristika poplavnog talasa kompleksna procedura koja iziskuje puno truda.

4.1.4.1. Količina isteklog materijala

Procena količine isteklog materijala je jedan od najkritičnijih parametara poplavnog talasa za procenu rizika eksploatacije na deponijama industrijskog otpada. Od realne procene ovog parametara u najvećoj meri zavisi ozbiljnost posledica nekog udesa.

Prema zabeleženim istorijskim slučajevima, te količine mogu biti i preko 10 Mm³, kao u slučaju udesa na kanadskoj deponiji Mount Polley, zabeleženoj 2014. godine, što je približno jednako zapremini skoro 3000 olimpijskih bazena [212].

Vrednosti ovog parametra, u prvom redu, zavise od mehanizma isticanja, bilo da dolazi do prelivanja preko krune nasipa ili kroz brešu, kao i od količine slobodne vode koja pokreće čvrsti otpad odložen unutar deponije. Nivo razvoja potencijalne breše u telu nasipa nije moguće inicijalno realno pretpostaviti, što otežava prognoziranje isteklih količina. Nije isto da li isticanje kroz brešu započinje na samom temelju nasipa, kada se kao potencijalno istekla količina razmatra ukupna količina odloženog otpada, ili pak na nekoj većoj visini, kada bi moglo doći do isticanja samo onog materijala koji se u trenutku proboja nalazi iznad donjeg nivoa breše.

U svetskoj literaturi se dosta pažnje posvetilo analizi ovog parametra na osnovu zabeleženih istorijskih slučajeva udesa na deponijama [62, 82, 213, 214, 215, 216].

U tabeli 21 prikazane su dobijene pretpostavke o količini isteklog otpadnog materijala po najgorem scenariju udesa, a prema veličini deponije i broju udesa koje su uzeti u obzir.

Tabela 21. Pretpostavke o količini isteklog materijala

Izvor	Broj razmatranih udesa	Visina deponije, [m]	Količina isteklog materijala, %	
			Opseg	Prosek
[62]	31	12-61	1-100	26
[82]	16	20-61	1-100	29
[213]	28	5-66	3-100	33
[214]	72	-	-	20
[215]	19	-	14-100	40
[216]	11	15-46	3-100	28

Ustanovljeno je da su se u proseku količine isteklog materijala kretale od 20 – 40% od ukupnih deponovanih količina, sa opsegom od 1-100%. Upostavljeni proseki najčešće odgovaraju scenarijima udesa po kojima dolazi do prelivanja ili proboja nasipa, dok kod udesa usled likvefakcije dolazi do isticanja većih količina, i do 100% od ukupnih deponovanih količina, najčešće kod malih, niskih deponija koje nisu izdvojene na kasete.

Trebalo bi napomenuti da je broj razmatranih udesa u navedenim studijama statistički isuviše mali, osim u u studiji koja je sprovedena u [214], da bi se doneli precizni zaključci.

4.1.4.1.1. Princip „1/3“

Najčešće citirana aproksimacija potencijalnih količina isteklog materijala je zasnovana na principu predloženog u [213], gde je ustanovljeno na osnovu zabeleženih slučajeva udesa da će u proseku oko 1/3 ukupno odloženih količina materijala unutar deponije isteći po najgorem mogućem scenariju (tzv. princip „1/3“). Testirana je korelacija između

zapremine odloženog materijala ($V_{odloženo}$) i zapremine isteklog materijala ($V_{isteklo}$) i dobijen visok koeficijent korelacije ($k=0,86$) i regresiona jednačina uz pomoć koje se može prognozirati količina isteklog materijala, a kojom se dobija da će 37% ukupno odloženog materijala isteći. Ona glasi [213]:

$$V_{isteklo} = 0,354 \cdot V_{odloženo}^{1,01} \quad (9)$$

Sprovedena analiza sa statističkog aspekta ima dva defekta:

- Prilikom analize korelacije i regresije korišćeni su parametarski testovi na podacima koji nemaju normalnu raspodelu.
- Analize su rađene na uzorku od 28 zabeleženih slučajeva udesa, što je relativno mali uzorak da bi se uspostavila neka zakonitost prema kojoj se mogu predviđati količine.

Shodno pomenutim manjkavostima, moguće je da su dobijeni rezultati u manjoj ili većoj meri nerealni, odnosno, da je statistička greška velika.

Ako bi se analize korelacije između $V_{odloženo}$ i $V_{isteklo}$ sporevele na većem uzorku iz ažurirane baze o udesima od ukupno 52 udesa, tabela 22, i primenile neparametarske metode, s obzirom na to da se radi o podacima koji nemaju normalnu raspodelu, može se zaključiti da između ova dva analizirana parametra postoji pozitivna korelacija sa koeficijentom korelacije $k=0,6$.

Tabela 22. Udesi koji su razmatrani prilikom procene količine isteklog materijala [47]

Velicina deponije	Lokacija	Godina	Ruda/sirovina	$V_{deponovano}, m^3$	$V_{isteklo}, m^3$	$\frac{V_{isteklo} \cdot 100}{V_{deponovano}} \%$
$> 10 Mm^3$	S. Karolina	2014	Pepeo	155.000.000	334000	0
	Filipini	2012	Cu, Au	102.000.000	13000000	13
	Ukrajina	1984	Fe	80.000.000	0	0
	Kanada	2014	Cu, Au	74.000.000	23600000	32
	Brazil	2015	Fe	56.400.000	43700000	77
	Bugarska	1992	Pepeo	52.000.000	500000	1
	Filipini	2002	Cu, Au	47.000.000	1000000	2
	Srbija	2010	pepeo	43.000.000	24.000	0,06
	Mađarska	2010	Al	30.000.000	1000000	3
	Rusija	1981	Fe	27.000.000	3500000	13
	Čile	1928	Cu	20.000.000	2800000	14
	Rusija	2004	Pepeo	20.000.000	160000	1
	J. Afrika	1974	Pt	17.000.000	3000000	18
	Španija	1998	Pb-Zn	15.000.000	6800000	45
Švedska	2000	Cu	15.000.000	1800000	12	

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

1-10 Mm ³	J. Afrika	1994	Au	7.040.000	600000	9
	SAD	1966	Gips	7.000.000	85000	1
	Gvajana	1995	Au	5.250.000	4200000	80
	Čile	1965	Cu	4.250.000	1900000	45
	Crna Gora	1992	Pb-Zn	3.500.000	0	0
	SAD	1988	Krečnjak	3.300.000	4600	0
	Bugarska	1975	Pb-Zn	3.000.000	250000	8
	N. Meksiko	1980	Cu	2.500.000	2000000	80
	Kina	2016	Al	2.000.000	2000000	100
	Čile	1985	Cu	2.000.000	500000	25
	Makedonija	2003	Pb-Zn	2.000.000	85000	4
	Kanada	2012	Pb Zn	1.800.000	0	0
	Bugarska	1996	Pb-Zn	1.520.000	220000	14
	Kazahstan	1958	U	1.200.000	600000	50
	Makedonija	1976	Pb-Zn	1.000.000	300000	30
	SAD	1988	Pepeo	1.000.000	250000	25
Zambija	1970	Cu	1.000.000	68000	7	
< 1 Mm ³	Rumunija	2000	Au	800.000	100000	13
	SAD	1975	Pb-Zn	750.000	150000	20
	Čile	1985	Cu	700.000	280000	40
	SAD	1973	Cu	500.000	170000	34
	Čile	1965	Cu	500.000	85000	17
	Japan	1978	Au	480.000	80000	17
	Čile	1965	Cu	450.000	70000	16
	Italija	1985	F	400.000	180000	45
	N. Meksiko	1979	U	370.000	370000	100
	Čile	1965	Cu	350.000	350000	100
	Japan	1968	Pb-Zn	300.000	90000	30
	SAD	1974	liskun	300.000	38000	13
	Kina	2008	Fe	290.000	190000	66
	Južni Vels	1966	Pepeo	230.000	162000	70
	Tasmanija	1995	Au	120.000	40000	33
	SAD	1985	Au	120.000	25000	21
	SAD	1989	K. pesak	74.000	38000	51
	Čile	1965	Cu	43.000	21000	49
	SAD	1985	K. pesak	38.000	11000	29
	SAD	1974	Ag	37.000	6000	16
Tasmanija	1995	Au	25.000	5000	20	

Ako se rezultat uporedi sa analizama predstavljenih u [213], može se konstatovati da je dobijeni koeficijent korelacije dosta niži i ukazuje na slabiju korelaciju između razmatranih parametara, nedovoljno jaku za precizno prognoziranje isteklih količina u slučaju potencijalnih udesa.

Takođe, prilikom razmatranja osetljivih parametara talasa kakav je količina isteklog materijala, poistovećivanje udesa koji su se desili po različitim mehanizmima i na deponijama različitih dimenzija može dovesti do netačnih zaključaka. Faktor koji je verovatno jedan od bitnijih za predviđanje isteklih količina je fluidnost materijala, pa se tako ne preporučuje poređenje isteklih količina mulja od prerade rude gvožđa, koji je izuzeno sitan i fluidan, i pepela iz termoelektrana uglja, koji spada u krupnozrni otpad.

Iz tabele 22, izdvojeni su samo neki karakteristični primeri udesa i razvrstani na udese zabeležene na deponijama različitog otpada i različitih veličina.

Deponije grube flotacijske jalovine (Cu, Cu-Au) su obuhvaćene tabelom 23, a fine flotacijske jalovine (Pb-Zn) tabelom 24.

Tabela 23. Udesi na deponijama grube flotacijske jalovine

Količine deponovanog otpada	Lokacija	Godina	Ruda	V _{deponovano} , m ³	V _{isteklo} , m ³	$\frac{\text{Visteklo} \cdot 100}{\text{Vdeponovano}} \%$
> 10 Mm ³	Filipini	2012	Au Cu	102.000.000	13.000.000	13
	Kanada	2014	Cu- Au	74.000.000	23.600.000	32
	Filipini	2002	Cu, Au	47.000.000	1.000.000	2
	Čile	1928	Cu	20.000.000	2.800.000	14
	Švedska	2000	Cu	15.000.000	1.800.000	12
	Σ			258.000.000	42.200.000	16
1-10 Mm ³	Čile	1965	Cu	4.250.000	1.900.000	45
	Novi Meksiko	1980	Cu	2.500.000	2.000.000	80
	Čile	1985	Cu	2.000.000	500.000	25
	Zambija	1970	Cu	1.000.000	68.000	7
	Σ			9.750.000	4.468.000	46
< 1 Mm ³	Čile	1985	Cu	700.000	280.000	40
	SAD	1973	Cu	500.000	170.000	34
	Čile	1965	Cu	500.000	85.000	17
	Čile	1965	Cu	450.000	70.000	16
	Čile	1965	Cu	350.000	350.000	100
	Čile	1965	Cu	43.000	21.000	49
	Σ			2.543.000	976.000	38

Ako se uporede podaci iz tabela 23 i 24 jasno se vidi da su veće razmere isteklih količina prilikom udesa na deponijama kod finih jalovina, nego kod grubih. Razlog tome je manja

čvrstoća smicanja sitnozrnog otpada, koja je direktno uslovljena manjom krupnoćom čestica, te i veća fluidnost.

Tabela 24. Udesi na deponijama fine flotacijske jalovine

Količine deponovanog otpada	Lokacija	Godina	Ruda	V _{deponovano} , m ³	V _{isteklo} , m ³	$\frac{V_{isteklo} \cdot 100}{V_{deponovano}} \%$
> 10 Mm ³	Španija	1998	Pb-Zn	15.000.000	6.800.000	45
1-10 Mm ³	Crna Gora	1992	Pb-Zn	3.500.000	0	0
	Bugarska	1975	Pb-Zn	3.000.000	250.000	8
	Makedonija	2003	Pb-Zn	2.000.000	85.000	4
	B. Kolumbija	2012	Pb-Zn	1.800.000	0	0
	Bugarska	1996	Pb-Zn	1.520.000	220.000	14
	Makedonija	1976	Pb-Zn	1.000.000	300.000	30
	Σ			12.820.000	855.000	7
< 1 Mm ³	SAD	1975	Pb-Zn	750.000	150.000	20
	Japan	1968	Pb-Zn	300.000	90.000	30
	Σ			1.050.000	240.000	23

U tabeli 25 podaci o udesima na deponijama finih i grubih otpada su sublimirani i može se zaključiti da što je veličina deponije manja, to su razmere isteklog otpada veće.

Tabela 25. Ukupne količine flotacijske jalovine obojenih metala

Količine deponovanog otpada	V _{deponovano} , m ³	V _{isteklo} , m ³	$\frac{V_{isteklo} \cdot 100}{V_{deponovano}} \%$
> 10 Mm ³	273.000.000	49.000.000	18
1-10 Mm ³	22.570.000	5.323.000	24
< 1 Mm ³	3.593.000	1.216.000	34

↓

Velike deponije su obično podeljene u kasete, eksploatacija se vrši dug vremenski period pa je i veći deo otpada stabilizovan. Deponije kapaciteta manjeg od 1 Mm³ se obično nalaze na postrojenjima za preradu nemetalčnih sirovina, postrojenjima za prečišćavanje otpadnih voda ili služe kao taložnici na postrojenjima za prosejavanje i pranje uglja. Dakle, radi se o malim deponijama, koje su obično privremeni objekti o kojima se manje vodi računa, te se radi o nestabilizovanom otpadu sa velikim udelom vode, što kao posledicu ima isticanje procentualno velikih količina deponovanog materijala. Deponije

do 10 Mm³ su uređeniji objekti, kojima se posvećuje više pažnje nego malim deponijama jer opslužuju postrojenja koja imaju nešto veći kapacitet i čija eksploatacija traje duže.

Shodno ovim konstatacijama, primetno je povećanje procenta isteklog materijala u odnosu na odložene količine, kako kapacitet deponije raste.

Na osnovu podataka iz tabele 26 može se uočiti da je prilikom udesa na deponijama mulja od prerade rude Fe isticao veliki procenat deponovanog materijala, bilo da se radi o malim ili velikim deponijama (osim u slučaju ukrajinske deponije).

Generalno, ako se upoređi ovaj otpad sa ostalim razmatranim otpadima, on ima manju čvrstoću, lošiju vodopropustljivost i manju otpornost na ciklične udare, usled sitnije granulacije koja ga karakteriše [217, 218]. To ga čini fluidnijim.

Tabela 26. Udesi na deponijama mulja od prerade rude Fe

Količine deponovanog otpada	Lokacija	Godina	Ruda	V _{deponovano} , m ³	V _{isteklo} , m ³	$\frac{V_{isteklo} \cdot 100}{V_{deponovano}}$ %
> 10 Mm ³	Ukrajina	1984	Fe	80.000.000	0	0
	Brazil	2015	Fe	56.400.000	43.700.000	77
	Rusija	1981	Fe	27.000.000	3.500.000	13
	Σ			163.400.000	47.200.000	29
< 1 Mm ³	Kina	2008	Fe	290.000	190.000	66

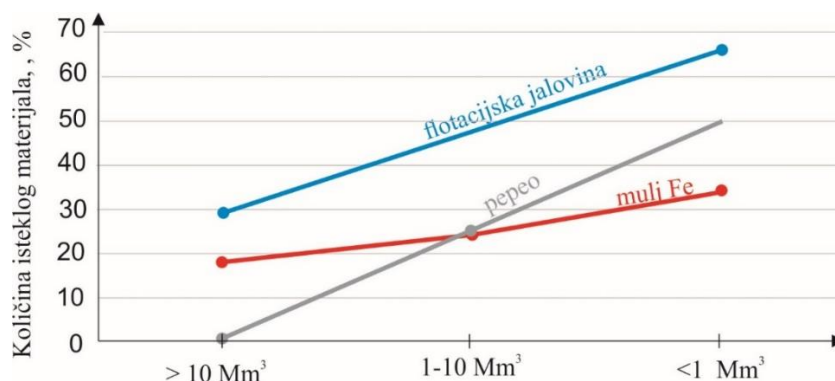
Udesi na deponijama pepela i šljake iz termoelektrana uglja obuhvaćeni su tabelom 27.

Ako se uporede količine isteklog otpada prilikom udesa na deponijama pepela i šljake sa količinama na ostalim deponijama, može se uočiti da su one procentualno manje, pogotovu kod deponija zapremina većih od 10 Mm³, gde je zabeleženo isticanje maksimalno 1% od odloženih količina. Ovakav ishod se može pripisati većoj krupnoći pepela i šljake koja doprinosi njegovoj većoj čvrstoći smicanja, a samim tim i manjoj fluidnosti.

Tabela 27. Udesi na deponijama pepela i šljake

Količine deponovanog otpada	Lokacija	Godina	Otpad	V _{deponovano} , m ³	V _{isteklo} , m ³	$\frac{V_{isteklo} \cdot 100}{V_{deponovano}}$ %
> 10 Mm ³	Severna Karolina	2014	pepeo	155.000.000	334.000	0
	Srbija	2010	pepeo	43.000.000	24.000	0,06
	Rusija	2004	pepeo	20.000.000	160.000	1
	Bugarska	1992	pepeo	52.000.000	500.000	1
				227.000.000	994.000	0,5
1-10 Mm ³	SAD	1988	pepeo	1.000.000	250.000	25
	SAD	1988	pepeo	1.000.000	250.000	25
				2.000.000	500.000	25

Sumarni podaci o zabeleženim količinama iz tabela 23-27 su prikazani grafički na slici 38.



Slika 38. Procentualno istekle količine otpada u odnosu na deponovane količine prema veličini deponije

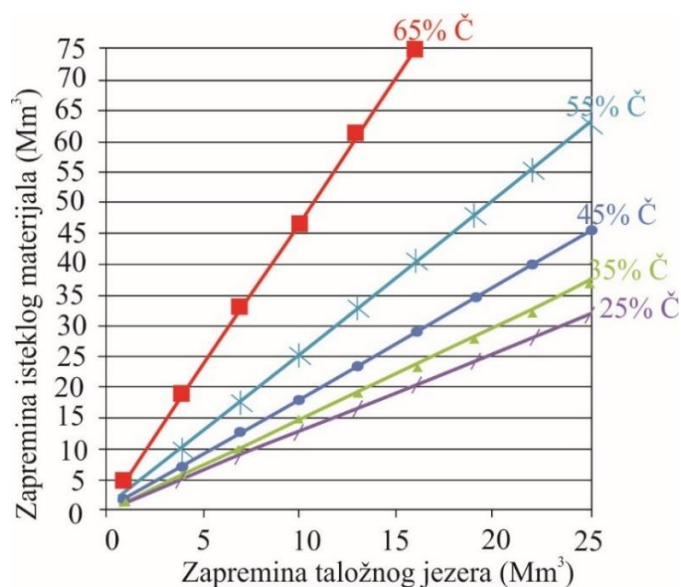
Na osnovu slike 38 se jasno vidi linearan rast procentualnih količina isteklog otpada, sa smanjenjem veličine deponije. Očekivano, istekle količine su znatno veće kod deponija mulja Fe, nego kod deponija pepela i šljake, s obzirom na veću fluidnost mulja Fe, a manji sadržaj gline u pepelu, koji usled toga ima bolju vodopropustljivost.

Na osnovu ovih činjenica može se zaključiti da je procena isteklih količina prilično kompleksna i da se aproksimacija po principu „1/3“ treba uzeti sa rezervom.

4.1.4.1.2. Princip „65% čvrstog“

Količina otpada koja bi istekla iz deponije u slučaju udesa se može pretpostaviti na osnovu karakteristika odloženog otpada, količine odloženog otpada, porne vode i slobodne vode u taložnom jezeru. Ovakav konzervativni princip uzima u obzir da se prilikom isticanja materijala ukupna količina slobodne vode momentalno maseno „meša“ sa 65% čvrstog otpada u deponiji (tzv. princip „65% čvrstog“) [211]. Ova pretpostavka je bazirana na sposobnosti tečenja mulja i uzima u obzir gornju granicu tečenja njutnovskih fluida. Ona se, međutim, ne može primeniti na sve tipove otpada i trebalo bi da se razrađuje od slučaja do slučaja.

Odložena hidromešavina u trenutku proboja nasipa je u funkciji masenog udela čvrstog, gustine čvrstog u hidromešavini i prosečne „suve“ gustine hidromešavine. Sva hidromešavina može isteći prilikom proboja ako se radi o malim deponijama na kojim je odložena relativno mala količina otpada sa relativno velikom količinom vode u taložnom jezeru. Nasuprot ovom tumačenju, ako je količina čvrstog otpada relativno velika u deponiji, a taložno jezero relativno malo, samo mali deo otpada bi mogao isteći. Na slici 39 je prikazana zavisnost između zapremine vode u taložnom jezeru i količine istekle hidromešavine (praktično mulja), zasnovane na ovom principu. Može se uočiti da je veza gotovo linearna: što je veće taložno jezero, to će više materijala isteći, sa učešćem čvrstog koje varira između 25 i 65%, i korakom povećanja udela čvrstog od 10% [211].



Slika 39. Odnos između zapremine taložnog jezera i zapremine isteklog materijala [211]

Kod ovog principa potrebno je raspolagati nekim polaznim parametrima. Proračun na primeru koji je predložen u [211] prikazan je u tabeli 28.

Tabela 28. Proračun prema principu „65% Č“ [211]

Polazni parametri	
<ul style="list-style-type: none"> • Masa čvrstog otpada: $M_{\check{c}} = 200 \text{ Mt}$ • Zapremina slobodne vode u taložnom jezeru: $V_v = 10 \text{ Mm}^3$ • Gustina odložene hidromešavine na suvo: $\rho_s = 1,4 \text{ t/m}^3$ • Gustina čvrstog u hidromešavini: $\rho_{\check{c}} = 2,7 \text{ t/m}^3$ • Gustina vode $\rho_v = 1 \text{ t/m}^3$ • Stepenn saturacije: $S = 100\%$ (ili 1) • Procenat čvrste faze: $\% \check{C} = 55$ ($\% T = 45$) 	
Ukupna zapremina hidromešavine (V_h)	Zapremina čvrstog u hidromešavini ($V_{\check{c}}$)
$V_h = \frac{M_{\check{c}}}{\rho_s} = \frac{200 \text{ Mt}}{1,4 \text{ t/m}^3} = 143 \text{ Mm}^3$	$V_{\check{c}} = \frac{M_{\check{c}}}{\rho_{\check{c}}} = \frac{200 \text{ Mt}}{2,7 \text{ t/m}^3} = 74 \text{ Mm}^3$
Zapremina pora (V_p)	Poroznost (n)
$V_p = V_h - V_{\check{c}} = 143 \text{ Mm}^3 - 74 \text{ Mm}^3 = 69 \text{ Mm}^3$	$n = \frac{V_p}{V_h} = \frac{69 \text{ Mm}^3}{143 \text{ Mm}^3} = 0,48$
Koeficijent poroznosti (e)	Zapremina porne vode ($V_{p.v.}$)
$e = \frac{V_p}{V_{\check{c}}} = \frac{69 \text{ Mm}^3}{74 \text{ Mm}^3} = 0,93$	$V_{p.v.} = S \cdot V_p = 1 \cdot 69 \text{ Mm}^3 = 69 \text{ Mm}^3$
Masa porne vode ($M_{p.v.}$)	Udeo vlage ($\%v$)
$M_{p.v.} = V_{p.v.} \cdot \rho_v = 69 \text{ Mm}^3 \cdot 1 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 69 \text{ Mt}$	$\%v = \frac{M_{p.v.}}{M_{\check{c}}} = \frac{69 \text{ Mt}}{200 \text{ Mt}} = 0,34 = 34\%$
Nasipna gustina hidromešavine (ρ_n)	Masa slobodne vode u taložnom jezeru (M_v)
$\rho_n = \frac{M_{\check{c}} + M_{p.v.}}{V_h} = \frac{200 \text{ Mt} + 69 \text{ Mt}}{143 \text{ Mm}^3} = 1,9 \text{ t/m}^3$	$M_v = V_v \cdot \rho_v = 10 \text{ Mm}^3 \cdot 1 \frac{\text{t}}{\text{m}^3} = 10 \text{ Mt}$
Masa čvrstog otpada u istekloj hidromešavini ($M_{\check{c}.isteklo}$)	
$M_{\check{c}.isteklo} = \frac{M_v}{\left(\frac{1}{\% \check{C}} - 1 - \% T\right)} = \frac{10 \text{ Mt}}{\left(\frac{1}{0,55} - 1 - 0,45\right)} = 27 \text{ Mt}$	
Masa istekle porne vode ($M_{p.v.isteklo}$)	
$M_{p.v.isteklo} = \left(\frac{M_{\check{c}.isteklo}}{\rho_s} - \frac{M_{\check{c}.isteklo}}{\rho_{\check{c}}}\right) \cdot S \cdot \rho_v = \left(\frac{27 \text{ Mt}}{1,4 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}} - \frac{27 \text{ Mt}}{2,7 \frac{\text{t}}{\text{m}^3}}\right) \cdot 1 \cdot \frac{1 \text{ t}}{\text{m}^3} = 9 \text{ Mt}$	
Zapremina istekle hidromešavine ($V_{h.isteklo.}$)	
$V_{h.isteklo.} = \frac{M_{\check{c}.isteklo} + M_{p.v.isteklo}}{\rho_n} = \frac{27 \text{ Mt} + 9 \text{ Mt}}{1,9 \text{ t/m}^3} = 19 \text{ Mm}^3$	
Ukupna zapremina isteklog otpada (voda+hidromešavina) ($V_{isteklo}$)	
$V_{isteklo} = V_v + V_{h.isteklo.} = 10 \text{ Mm}^3 + 19 \text{ Mm}^3 = 29 \text{ Mm}^3$	
Procenat isteklog otpada u odnosu na ukupno deponovane količine	
$\frac{V_{isteklo}}{V_v + V_h} \cdot 100 = \frac{29 \text{ Mm}^3}{10 \text{ Mm}^3 + 143 \text{ Mm}^3} \cdot 100 = 19\%$	

Glavna mana ovog principa jesu nerealne količine isteklog materijala koje se dobijaju kod deponija sa velikim taložnim jezerom, što će se pokazati u narednim razmatranjima.

Takođe, prilikom proračuna predložen je stepen saturacije $S=100\%$, koji je realan samo za nivo deponije ispod linije provirne vode i ispod taložnog jezera, iako prema [219] čak ni u tom delu materijal ne mora biti u potpunosti saturisan. Materijal iznad linije provirne vode, bliže nasipu i iznad linije provirne vode ima manji stepen saturacije. Na hidraulički formiranoj deponiji gotovo se nikad ne sreće potpuno suv materijal [34].

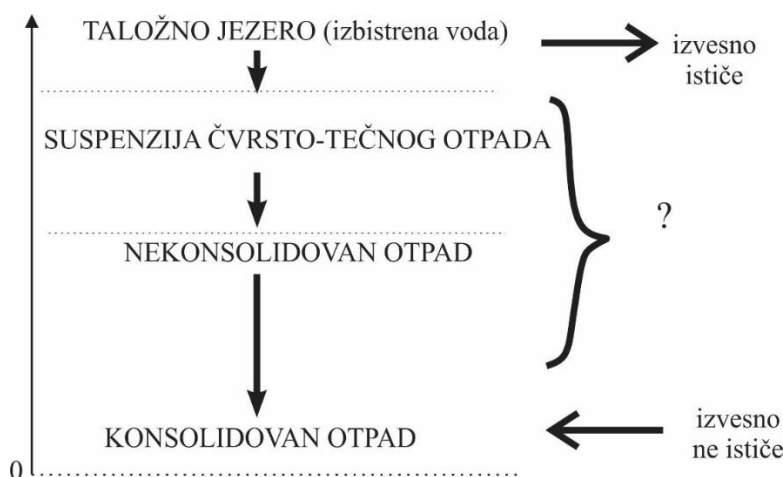
4.1.4.1.3. Predloženi princip „faznog isticanja“

Kod deponija otpada zajedno se nalaze voda, kao tečni fluid, i otpad, kao čvrsti materijal. Svako pokretanje materijala iz deponije otpada podrazumeva davanje energije tečnoj fazi koja će, pod određenim uslovima, nositi i čvrstu fazu. Tečna faza je u obliku slobodne, ujezerene vode i zarobljene vode unutar pora, između zrna otpada. Zarobljena voda je delom slobodna jer prosto ispunjava formirani prostor između zrna, a delom je vezana adhezionim silama za česticu. Distribucija i slobodne i zarobljene vode unutar deponije je neravnomerna, posmatrano u horizontalnoj i vertikalnoj ravni, ali su promene, u obe ravni, kontinuirane.

Slobodna ujezerena voda se može posmatrati na isti način kao i voda u akumulacijama, a voda unutar pora daje vlažnost deponovanoj masi.

Ako dođe do pokretanja deponovane mase onda je nosilac toga uvek slobodna voda, a nikada deponovani materijal. Izuzetak se događa kod likvefakcije, kada sile koje drže čvrste čestice na okupu budu manje od intergranularnih sila pa dolazi do razvodnjavanja otpada.

Prilikom proboja nasipa, slobodna voda gotovo izvesno ističe, dok konsolidovani otpad ne ističe u potpunosti. Sve nedoumice prilikom prognoziranja isteklih količina se vezuju za sloj nekonsolidovanog otpada, odnosno suspenziju čvrstog i tečnog, slika 40. Taj sloj se u najvećoj meri sastoji od muljevitih frakcija male brzine taloženja i slabe vodopropustljivosti, što ga čini osetljivim na rast pornog pritiska.



Slika 40. Slojevi otpada u deponiji

Dakle, ako isključimo likvefakciju kao uzrok udesa, onda se može zaključiti da će pri udesu doći do isticanja sledećeg:

- sve slobodne vode čiji je položaj ravan ili iznad donje kote breše koja se pojavi u nasipu u aktivnom delu deponije (ukoliko se deponija deli na kasete),
- dela čvrstog otpada kojeg će zahvatiti slobodna voda iz taložnog jezera i koja će se pokrenuti kao nevezana voda unutar pora.

Odnos između količine slobodne vode u taložnom jezeru i količine deponovanog čvrstog otpada zavisi od veličine deponije i vremena njene eksploatacije. Kod velikih deponija koje se koriste desetinama godina taj odnos je obično iznad (tečno:čvrsto, $m^3:m^3$) 1:50.

Dakle, u svakoj varijanti će samo deo deponovanog materijala isteći u slučaju udesa, dok će kod akumulacija vode sva raspoloživa voda isteći. U oba slučaja se podrazumeva da je to iznad donjeg nivoa breše. Razume se, delovanjem otpada, odnosno vode koja se prazni i dimenzije breše se menjaju. S obzirom da voda u svim delovima akumulacije ima iste karakteristike, moguće je da se sva izgubi iz akumulacije, dok to kod deponije otpada praktično nije moguće jer se donji konsolidovani slojevi bitno razlikuju od površinskih i njihovo pokretanje je teško ili nemoguće.

Ako se za primer uzme neka hidraulička deponija grube flotacijske jalovine, gde se odlaže hidromešavina u odnosu Č:T=25:75%, kod koje je zapremina slobodne vode u taložnom jezeru 2.500.000 m^3 , a zapremina deponovane hidromešavine 170.000.000 m^3 (što ukupno daje 172.500.000 m^3 odloženog otpada), istekle količine otpada prema principu

„1/3“ bi iznosile oko 64.000.000 m³, pri čemu se smatra da bi se u okviru tih količina obuhvatila celokupna voda iz taložnog jezera, što daje zapreminski odnos tečno: čvrsto=1:26. Čak i kada bi se sva vlaga uključila, koja varira od 10 do 30% na plaži, od 25 do 65% između plaže i jezera i od 45 do 96% ispod jezera [58], došlo bi se do toga da je količina čvrstog materijala veća od količine vode, pa je tok takve mešavine i njeno pokretanje sumnjivo.

Količina isteklog otpada prema principu „65% Č“ bi bila oko 7.500.000 m³, i po istoj analogiji kao kod principa „1/3“, ako se iz prognozirane količine isključi sva količina slobodne vode iz taložnog jezera, dobija se da svaki m³ slobodne vode pokrene 2 m³ odložene hidromešavine.

Kod deponija gde je taložno jezero male zapremine u odnosu na ukupnu zapreminu deponije, prognozirane količine isteklog otpada po ovom principu se mogu donekle tolerisati, međutim, to nije slučaj kod deponija kod kojih taložno jezero zauzima i do 20% od ukupne zapremine deponije, pa istekle količine idu i do 80% od ukupno odloženih količina unutar deponija, a takav scenario se toleriše uslovno samo kod slučajeva udesa usled likvefakcije kakav je zabeležen kod deponije rudnika gvožđa Fundao u Brazilu [47].

Realnija je procena da istekne sva slobodna voda i da ona sa sobom „ponese“ maksimalno 50% hidromešavine u odnosu na svoju masu, tj. sa 2,5 miliona m³ vode, u slučaju prethodno razmatrane deponije, isteklo bi i oko 1,25 milion m³ otpada u obliku hidromešavine, što bi ukupno bilo 3,75 miliona m³ hidromešavine. To u odnosu na ukupnu deponovanu masu iznosi 4:230, ili oko 2%.

Preciznije rečeno, isticanje bi se odvijalo po principu faznog isticanja kroz ukupno 5 faza, pri čemu, izuzev u prvoj fazi, isticanje biva praćeno povećanjem gustine hidromešavine. Svaka petina slobodne vode iz taložnog jezera, izuzev prve, pokreće određeni procenat odloženog otpada.

Te se tako, u slučaju prethodno razmatrane deponije, procenjuje da će 1/5 (ili 500.000 m³) vode isteći iz deponije bez značajnijeg pokretanja čvrste deponovane mase, da će naredna 1/5 teći u obliku retke hidromešavine (do 10% čvrstog) što daje 500.000 m³ vode + 50.000 m³ hidromešavine, posle čega će se povećavati gustina hidromešavine koja otiče. U trećoj fazi će oteći 1/5 vode sa koncentracijom čvrstog od 20 %, u četvrtoj fazi,

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

naredna 1/5 vode sa koncentracijom čvrstog od 40 % i u petoj, poslednjoj fazi, 1/5 vode sa koncentracijom od 60% čvrstog.

Na osnovu iznetih pretpostavki mogao bi da se uspostavi poredak:

FAZA	Istekla slobodna voda, m ³ ($V_{istekla_voda}$)	Hidromešavina, m ³ ($V_{istekla_hidromešavina}$)
1.	$V_{istekla_voda} = \frac{1}{5} \cdot V_v$	0
2.	$V_{istekla_voda} = \frac{1}{5} \cdot V_v$	$V_{istekla_hidromešavina} = V_{istekla_voda} \cdot 10\%$
3.	$V_{istekla_voda} = \frac{1}{5} \cdot V_v$	$V_{istekla_hidromešavina} = V_{istekla_voda} \cdot 20\%$
4.	$V_{istekla_voda} = \frac{1}{5} \cdot V_v$	$V_{istekla_hidromešavina} = V_{istekla_voda} \cdot 40\%$
5.	$V_{istekla_voda} = \frac{1}{5} \cdot V_v$	$V_{istekla_hidromešavina} = V_{istekla_voda} \cdot 60\%$
Σ	$\Sigma V_{istekla_voda}$	+ $\Sigma V_{istekla_hidromešavina}$ = $V_{isteklo_ukupno}$

Na razmatranom primeru hidrauličke deponije neke grube jalovine, ovaj princip daje sledeće rezultate:

- 1. faza 500.000 m³ vode
- 2. faza 500.000 m³ vode + 50.000 m³ hidromešavine
- 3. faza 500.000 m³ vode + 100.000 m³ hidromešavine
- 4. faza 500.000 m³ vode + 200.000 m³ hidromešavine
- 5. faza 500.000 m³ vode + 300.000 m³ hidromešavine
- Ukupno 2.500.000 m³ vode + 650.000 m³ hidromešavine = 3.150.000 m³ hidromešavine

To znači da bi isteklo oko 2% od ukupno deponovane količine otpada.

Radi uporednog pregleda sva tri obrazložena principa prognoziranja isteklih količina, proračuni koji su izvedeni u [203], dopunjeni su sa primenjenim principom „faznog isticanja“ na predloženim primerima. Dobijeni rezultati su zaokruženi na cele vrednosti i prikazani u tabeli 29.

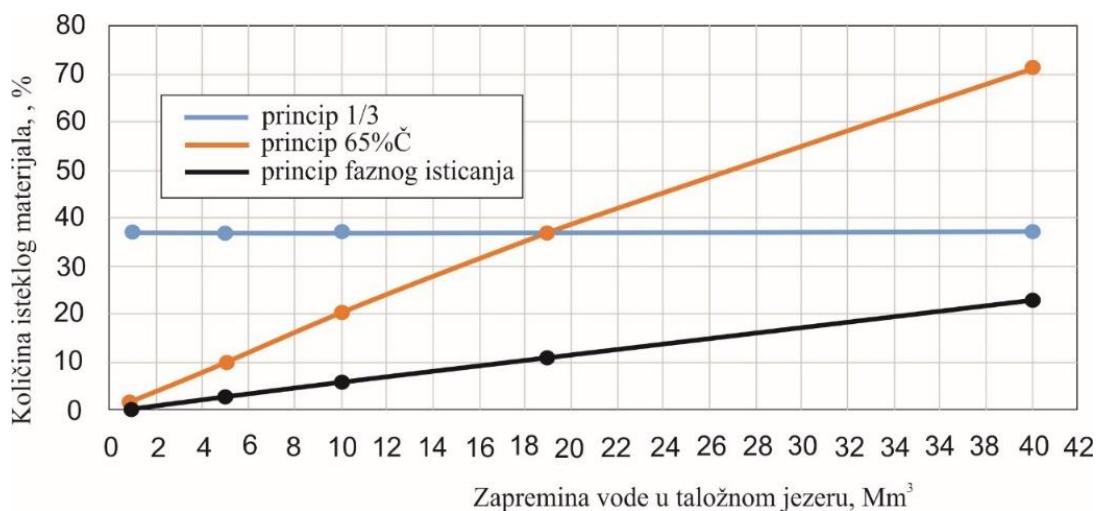
Tabela 29. Uporedni proračun količina istekle hidromešavine, dopunjeno na osnovu razmatranja prema [203]

Zapremina vode u taložnom jezeru (V_v), [Mm ³]	Zapremina deponovanog otpada u obliku hidromešavine (V_h), [Mm ³]	Ukupna zapremina odloženog materijala u deponiji (V_{u+h}), [Mm ³]	$V_{istekle_hidromešavine}$, [Mm ³]		
			Princip „1/3“	Princip „65% Č“ ⁹	Princip „faznog isticanja“
1	214	215	80 (37%)	5 (2%)	1 (0,5%)
5	214	219	82 (37%)	23 (10%)	6 (3%)
10	214	224	84 (37%)	45 (20%)	13 (6%)
19	214	233	87 (37%)	97 (37%)	24 (11%)
40	214	254	95 (37%)	181 (71%)	50 (23%)

Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da što je zapremina taložnog jezera veća, to je i proračunata zapremina istekle hidromešavine prema principu „65% Č“ i „faznog isticanja“ veća, dok je prema principu „1/3“ ta količina konstanta, i uvek iznosi 37% od ukupne deponovane količine hidromešavine. Tako za najveću razmatranu zapreminu taložnog jezera od 40 Mm³, količina istekle hidromešavine po principu „65% Č“ dvostruko je veća od one po principu „1/3“, a skoro trostruko od količine po principu „faznog isticanja“.

Prema slici 41 može se zaključiti da se najrealnije procene istekle količine otpada dobijaju prema principu „faznog isticanja“, kojim je zadovoljena zakonitost da će sa porastom količine slobodne vode u taložnom jezeru, porasti i količina istekle hidromešavine, pri čemu bi slobodna voda pokrenula do 50% odloženog otpada u odnosu na svoju zapreminu, maksimalno.

⁹ proračun rađen za $\rho_c=2,7 \text{ t/m}^3$ i $\rho_s=1,4 \text{ t/m}^3$



Slika 41. Uporedni prikaz isteklih količina hidromešavine u odnosu na ukupno odložene količine prema različitim principima

Količine koje se dobiju primenom principa „1/3” ili „65 Č%” je realnije uzeti u razmatranje prilikom procene isteklih količina usled likvefakcije, i to kada je taložno jezero blizu nasipa koji se ruši. Princip „faznog isticanja” je realnije uzeti u obzir kod ostalih slučajeva. Međutim, ovako predloženo razmatranje isteklih količina ne treba usvojiti kao šablon, već svaku deponiju treba razmatrati kao slučaj za sebe, shodno velikom dijapazonu faktora koju utiču na količine isteklog materijala.

Ono što se svakako može usvojiti kao pravilo je, da što je deponija manjeg kapaciteta (<1 Mm³), i što je odloženi otpad sitniji, to će veće količine isteći, a čak se može uzeti u obzir da će većina odloženog materijala isteći.

Kod deponija kapaciteta >10 Mm³ bi trebalo razlučiti deponije grube flotacijske jalovine, deponije mulja od prerade rude gvožđa i sitne flotacijske jalovine zajedno od deponija pepela i šljake. Ove tri grupe deponije se međusobno razlikuju prvenstveno po fluidnosti odloženog materijala, a samim tim i po količinama isteklog otpada u slučaju proboja nasipa.

U obzir treba uzeti, pored fundamentalnih podataka o samom otpadu i topografiji okolnog terena, mehanizmu i tipu toka koji bi se razvio, i informacije i zabeleženim sličnim slučajevima isticanja materijala u istoriji. Tako bi se za deponije grube flotacijske jalovine mogao primeniti predloženi princip „faznog isticanja”, dok za deponije mulja od prerade rude Fe i sitne flotacijske jalovine realnije količine daju principi „1/3” i „65% Č”. Kod

deponija pepela i šljake, shodno zabeleženim slučajevima u prošlosti, količine isteklog otpada nisu prelazile 1% od ukupno odloženih količina.

Dakle, tek posle opsežne analize više faktora koji imaju uticaj, može se pristupiti analizi količina isteklog materijala i svaku deponiju razmatrati kao slučaj za sebe, prilikom procene rizika.

4.1.4.2. Rastojanje koje pređe istekli materijal

Rastojanje i smer kretanja hidromešavine zavise od inicijalnih uslova, topografije terena nizvodno od deponije i čvrstoće smicanja materijala od kog je izgrađen nasip deponije [196]. Takođe, visina nasipa, zapremina odloženog materijala, kao i fluidnost samog otpada imaju svoju ulogu u maksimalnom rastojanju koji poplavni talas može dostići, dok je najbitniji faktor količina isteklog materijala.

Za aproksimaciju rastojanja poplavnog talasa korisno je ustanoviti tzv. „zonu opasnosti“. „Zona opasnosti“ je zona koja bi mogla biti zahvaćena poplavnim talasom. Granice ove zone utvrđuju se na sledeći način [61]:

- uzvodno od bilo koje tačke krune nasipa, do rastojanja od $5 \times H$ od nožice nasipa (pri čemu je H ukupna planirana visina nasipa), s tim što je ovo rastojanje manje od 5 km,
- u ravni paralelnoj nagibu tla – rastojanje od $10 \times H$ od nožice nasipa,
- nizvodno od najniže tačke krune nasipa, rastojanje veće od $100 \times H$, ili
- $2 \times$ najstrmiji nagib terena (%) meren 200 m od najniže tačke nasipa, pomnožen sa visinom nasipa, pri čemu je minimalno rastojanje 0,5 km, a maksimalno 6 km.

Ovakva analiza zone koja je potencijalno ugrožena u slučaju izlivanja materijala iz deponije je gruba procena i može se koristiti za preliminarnu procenu, ili ako je jedina primenjiva metoda za procenu rastojanja.

Istraživanja koja su izvršena u [213] pokazala su da jednačina za proračun maksimalnog rastojanja ($D_{max} = 1.61 \times (HV_F)^{0.66}$) ima relativno slabu pozitivnu korelaciju $r^2=0,57$, te ona nije dobar način da se dođe do ovog podatka.

Pređeno rastojanje poplavnog talasa se može razmatrati u odnosu na visinu nasipa, koeficijente dinamičkog viskoziteta i nagiba terena po kom talas teče.

Grupa autora iz Kine je upravo na osnovu ova tri parametra sproveda istraživanja na modelu sa karakteristikama Bingamovog plastičnog fluida i došla je do zaključaka prikazanih u tabeli 30 [220].

Tabela 30. Uticaj određenih parametara na karakteristike talasa [220]

Rastojanje i visina poplavnog talasa u zavisnosti od visine nasipa				
Visina nasipa, m	Dinamički viskozitet, Pa·s	Nagib terena, °	Rastojanje, m	Visina talasa, m
0	5,2	0	5	0,056
0,1	5,2	0	5,1	0,055
0,2	5,2	0	5,2	0,055
Rastojanje i visina poplavnog talasa u zavisnosti od dinamičkog viskoziteta				
Visina nasipa, m	Dinamički viskozitet, Pa·s	Nagib terena, °	Rastojanje, m	Visina talasa, m
0	3	0	6,5	0,046
0	5,2	0	6	0,056
0	7	0	4,4	0,063
Rastojanje i visina poplavnog talasa u zavisnosti od nagiba terena				
Visina nasipa, m	Dinamički viskozitet, Pa·s	Nagib terena, °	Rastojanje, m	Visina talasa, m
0	5,2	0	5	0,056
0	5,2	2,5	5,4	0,050
0	5,2	5	6,2	0,041

Ustanovljeno je da sa porastom dinamičkog viskoziteta, rastojanje opada, dok maksimalna visina talasa raste. Drugo, sa porastom visine nasipa, blago raste i rastojanje, dok je visina talasa prilično statična. I treće, sa porastom nagiba terena po kom talas teče, raste i rastojanje, ali visina talasa opada [221].

Nakon upoređivanja ova tri parametra, došlo se do zaključka da dinamički viskozitet zapravo ima najveći uticaj na pređeno rastojanje.

Svetski informacioni servis o energiji (WISE) je razvio alat za simuliranje talasa pod nazivom „Tailings Flow Slide Calculator“ [222]. Alat je jednostavan za korišćenje i tumačenje, a razmatra tečenje likvefikovane jalovine, te je poistovećuje sa Bingamovim plastičnim fluidom koji ima laminaran tok. Autori naglašavaju da je ovaj alat primenljiv isključivo u edukativne svrhe, bez garancije kvaliteta rezultata, ali u svakom slučaju može poslužiti za formiranje pretpostavki o karakteristikama talasa, sa naglaskom na rastojanju poplavnog talasa. U obzir uzima visinu brane deponije kao obavezan parametar koji se unosi, gustinu otpada, Bingamov napon tečenja i Bingamov plastični viskozitet, nagib

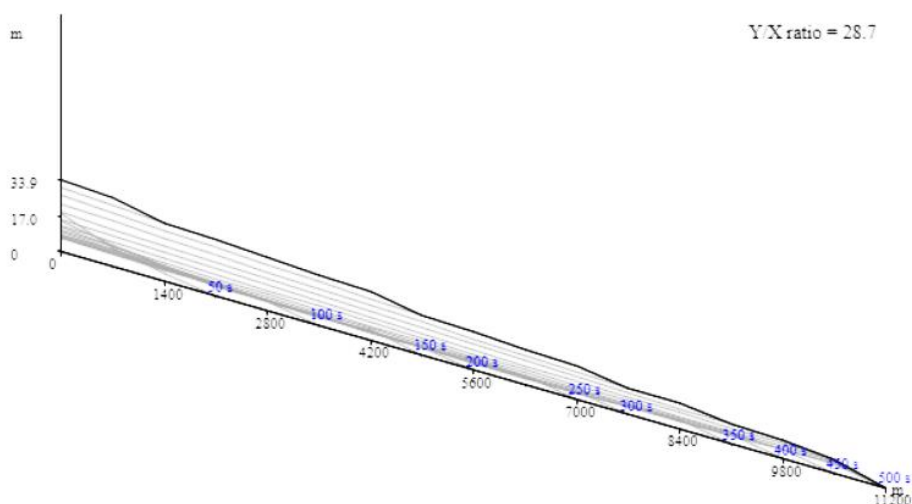
terena kao proizvoljne parametre, a kao rezultat daje animaciju i proračune talasa sa prognoziranim rastojanjem, brzinom, vremenom zaustavljanja i visinom talasa koja se može poistovetiti sa visinom na kojoj se breša može razviti. Alat nije aplikativan na otpad od prerade rude fosfata.

Ako se razmatra samo ravničarski teren (nagib 0°), za različite visine nasipa deponije i uobičajene karakteristike otpada u obliku Bingamovog plastičnog fluida (gustina $15,71 \text{ kg/m}^3$, Bingamov napon tečenja 1 kPa i Bingamov plastični viskozitet $0,1 \text{ kPa}\cdot\text{s}$), u tabeli 31 prikazane su prognozirane karakteristike talasa.

Tabela 31. Karakteristike poplavnog talasa dobijene pomoću alata „Tailings Flow Slide Calculator“

Visina nasipa	Maksimalna visina talasa, m	Maksimalna brzina, m/s	Prosečna brzina, m/s	Rastojanje, m	Vreme dostizanja maksimalnog rastojanja, s	Vreme zaustavljanja talasa, s
10	4,40	9,53	5,56	300	54	114
30	13,18	17,7	11,9	3200	270	660
50	22,01	22,4	15,1	9800	650	1450
100	44,2	37,5	24,7	42000	1700	4200

Sa strmijim nagibom plavnog terena, nužno se povećava brzina talasa i rastojanje, ali se visina talasa smanjuje. Tako na primer za visinu nasipa od 50 m i nagib terena nizvodno od 1% ($0,57^\circ$), maksimalna brzina talasa je $26,2 \text{ m/s}$, prosečna brzina 21 m/s , rastojanje 10500 m koja se dostiže za 500 s , a talas biva zaustavljen za 950 s , slika 42.



Slika 42. Maksimalno rastojanje poplavnog talasa pri visini nasipa 50 m i nagibu terena 1% prema alatu „Tailings Flow Slide Calculator“ [222]

Zavisnost rastojanja poplavnog talasa od nabrojanih karakteristika deponije i njene okoline prakazana je na slici 43.



Slika 43. Rastojanje poplavnog talasa

Ovaj često korišćen metod je ocenjen kao konzervativan i smatra se da se njime precenjuje/potcenjuje pređeno rastojanje isteklog materijala, s obzirom da je jalovina predstavljena ravnom vertikalnom linijom i nije u obzir uzeto trenje između površine po kojoj materijal teče i samog materijala, kao i količina isteklog materijala, što je ključan faktor u proceni [223]. Takođe, podaci o rastojanju koji se dobiju njime ne pokazuju jaku korelaciju sa količinom isteklog materijala i zapreminom materijala odloženog u deponiji [224]. Na osnovu mišljenja iznetog u [224] model potcenjuje realno rastojanje čak i kada se koriste maksimalne predložene vrednosti svih fizičkih i geomehaničkih parametara materijala.

Uz svest o svim manjkavostima ovakvog alata uspostavljen je realan poredak za pretpostavljanje rastojanja poplavnog talasa, koji obuhvata korake [223]:

1. Poistovećivanje oblika isteklog materijala sa pravougaonim klinom, čija je početna visina jednaka visini deponije, a finalna visina H_f se računa kao [216]:

$$H_f = 4 \cdot \frac{\tau}{\gamma}, [\text{m}] \quad (10)$$

gde je τ čvrstoća smicanja otpada nakon isticanja [kN/m^2], a γ prirodna gustina otpada [kN/m^3]. Uz finalnu visinu treba aproksimirati i nagib (α) isteklog materijala prema tlu nizvodno od deponije [216].

2. Projektovanje klina¹⁰ sa pretpostavljenom finalnom visinom u nekom specijalizovanom softveru, poput Autocad-a.
3. Merenje zapremine iscrtanog klina i poređenje sa predviđenom količinom isteklog materijala.
4. Proces se ponavlja sve dok zapremina talasa i zapremina isteklog materijala ne budu jednake.

Pre sprovođenja ove metodologije potrebno je definisati količinu isteklog materijala, pribaviti mapu okoline nizvodno¹¹ i ustanoviti osnovne geomehantičke i fizičke parametre otpada, među kojima su najbitnija čvrstoća na smicanje i gustina [223].

Na osnovu zabeleženih slučajeva udesa na deponijama, ustanovljeno je da je ugao izlivenog materijala obično između 4-7° (1,7-7%) [216, 225], te se ugao iz ovog opsega može usvojiti za potrebe procene rastojanja. Pri ovom pristupu trebalo bi pretpostaviti i visinu i širinu talasa, te se za te potrebe mogu koristiti pretpostavke za najgori mogući scenario udesa, po kom se visina poistovećuje sa visinom deponije, dok je širina talasa pri dnu u opsegu od 1-3 od visine, pod uslovom da je nagib isteklog materijala u prethodno definisom opsegu [56, 194, 202].

Kod ovog modela, pri aproksimaciji finalne visine isteklog materijala, treba biti svestan da vrednost pomenutih parametara nije ista pre i nakon proboja nasipa i isticanja. Čvrstoća na smicanje, u prvom redu je neznatno iznad nule nakon proboja, i shodno tome finalna visina je mnogo manja. Međutim, kako se prilikom procene rizika uglavnom ne zna vrednost čvrstoće nakon proboja (osim ukoliko se razmatra deponija gde je u prošlosti već zabeleženo isticanje materijala izvan nje), a s obzirom da se rizik najčešće procenjuje preventivno, a ne retroaktivno, za aproksimaciju se može koristiti regularna vrednost ovog parametra.

¹⁰ Potrebno je naglasiti da oblik isteklog materijala u najvećoj meri diktira topografija terena. Međutim kod ravničarskog terena teško je predvideti oblik i iz tog razloga se uzima idealizovani oblik klina.

¹¹ Može se koristiti i Google Earth Pro softver u te svrhe.

4.1.4.3. Ostale karakteristike poplavnog talasa

Što se ostalih karakteristika poplavnog talasa tiče, teško ih je ekspertski pretpostaviti, ali podležu numeričkoj simulaciji pomoću nekog specijalističkog softvera.

Kako je navedeno u [203], najrealnija procena maksimalnog isticaja poplavnog talasa se vrši na osnovu tzv. faktora nasipa, koji se dobija kao proizvod istekle količine i visine deponovanog materijala iznad dna breše. Kako dinamički viskozitet i inicijalni napon smicanja raste, maksimalni isticaj opada i dubina toka raste [226].

Brzina poplavnog talasa se prema modifikovanoj klasifikaciji tokova klizišta izloženoj u [227], karakteriše kao „veća od veoma brze“, a koja u proseku iznosi više od 5 m/s [195, 204], a može dostići i brzinu od preko 20 m/s kada se smer kretanja talasa poklopi sa prirodnom kotlinom ili koritom nekog vodotoka [34].

Takođe, voda i mešavina vode i čvrstog otpada ne teku istom brzinom. Istekla čista voda će najdalje dogurati i najbrže putovati. Visina poplavnog talasa raste sa porastom nagiba plavnog terena, dinamičkog viskoziteta i visinom breše u telu nasipa. Najveća visina talasa se dostiže neposredno uz deponiju.

Verovatno najvarijabilniji parametar talasa je vreme isticanja. On zavisi od mnogo faktora, poput uzroka udesa, količine i karakteristika deponovanog materijala, topografije terena i još mnogo drugih.

4.2. Procena posledica

4.2.1. Procena broja ljudskih žrtava

Ljudske žrtve su najznačajnije posledice jednog udesa i imaju veliku ulogu u proceni rizika eksploatacije deponije. Često se prilikom razmatranja tolerantnosti procenjenog nivoa rizika uzima u obzir upravo broj ljudskih žrtava, kao glavni kriterijum [21]. Rizik ne može biti mali ukoliko postoji verovatnoća da udes prouzrokuje čak i samo jednu ljudsku žrtvu. Zato je od velike važnosti realna procena ovog tipa posledica.

U te svrhe može se koristiti tzv. Grejemova metoda [21, 228]. Ova metoda je zasnovana na fiksnim stopama smrtnosti i pretpostavci da će doći do formiranja poplavnog talasa usled udesa.

Iako je metoda prvenstveno definisana na osnovu brana za akumulaciju vode, njena upotreba kod deponija se može argumentovati činjenicom da je ovaj tip posledica najkritičniji u čitavom procesu procene rizika, i prilikom uzbunjivanja okolnog stanovništva poželjno je koristiti strože stope smrtnosti. Takođe, jalovišni nasipi se mogu u ovom slučaju postovetiti sa zemljanim branama gravitacionog tipa za akumulaciju vode [229, 230].

Tri parametra sudeluju u proceni stope smrtnosti [228]:

- Ozbiljnost poplave;
- Vreme upozorenja;
- Razumevanje ozbiljnosti poplave.

Uzimajući u obzir ova tri parametra, predložene su stope smrtnosti, tabela 32.

Da bi se dobio konačan broj potencijalnih ljudskih žrtava, usvojena stopa smrtnosti se množi sa ukupnim brojem potencijalno ugroženih ljudi. Dakle, ulazni podatak za procenu ovih posledica je broj ljudi koji se nađe na ruti poplavnog talasa.

Tabela 32. Predložene stope smrtnosti za proračun potencijalnih ljudskih žrtava u slučaju udesa [228]

Ozbiljnost poplave	Vreme upozorenja (min)	Razumevanje ozbiljnosti poplave	Stopa smrtnosti (udeo ugroženih ljudi)	
			Prosečna	Opseg
Velika	Bez upozorenja	Nije primenljivo	0,75	0,3-1,00
	15 do 60	Nepotpuno Potpuno	*Nema odgovarajućih podataka	
	Više od 60	Nepotpuno Potpuno		
Srednja	Bez upozorenja	Nije primenljivo	0,15	0,03-0,35
	15 do 60	Nepotpuno	0,05	0,01-0,08
		Potpuno	0,02	0,005-0,04
	Više od 60	Nepotpuno	0,03	0,005-0,06
		Potpuno	0,01	0,002-0,02
Mala	Bez upozorenja	Nije primenljivo	0,01	0-0,02
	15 do 60	Nepotpuno	0,007	0-0,015
		Potpuno	0,002	0-0,004
	Više od 60	Nepotpuno	0,0003	0-0,0006
		Potpuno	0,0002	0-0,0004

Ugroženo ljudstvo je ono koje se privremeno ili stalno nalazi na ruti polavnog talasa. Tu spada stanovništvo nastanjeno na području koje biva pogođeno poplavnim talasom, kao i ljudstvo zaposleno na samoj deponiji i u okolini.

Ozbiljnost poplave predstavlja stepen degradacije objekata koji bi se našli na ruti poplavnog talasa.

Grejem je podelio ozbiljnost poplave u tri kategorije [228]:

- Velika ozbiljnost: kada poplavni talas dovodi do potpunog uništenja objekata i infrastrukture, prouzrokujući smrt većine ljudi koji bivaju pogođeni poplavnim talasom.
- Srednja ozbiljnost: kada neki objekti pretrpe ozbiljne štete, naročito stambene kuće, mada ostanu objekti u kojima ljudi mogu naći utočište.
- Mala ozbiljnost: nema potpuno uništenih objekata, a štete su samo površne.

Postoji nekoliko preporuka za opisivanje stepena ozbiljnosti. Velika ozbiljnost je adekvatna samo za područja koja su u neposrednoj blizini deponije i koja bi bila poplavljena brzo, i to u takvoj razmeri da je izvestan gubitak svih ljudskih života.

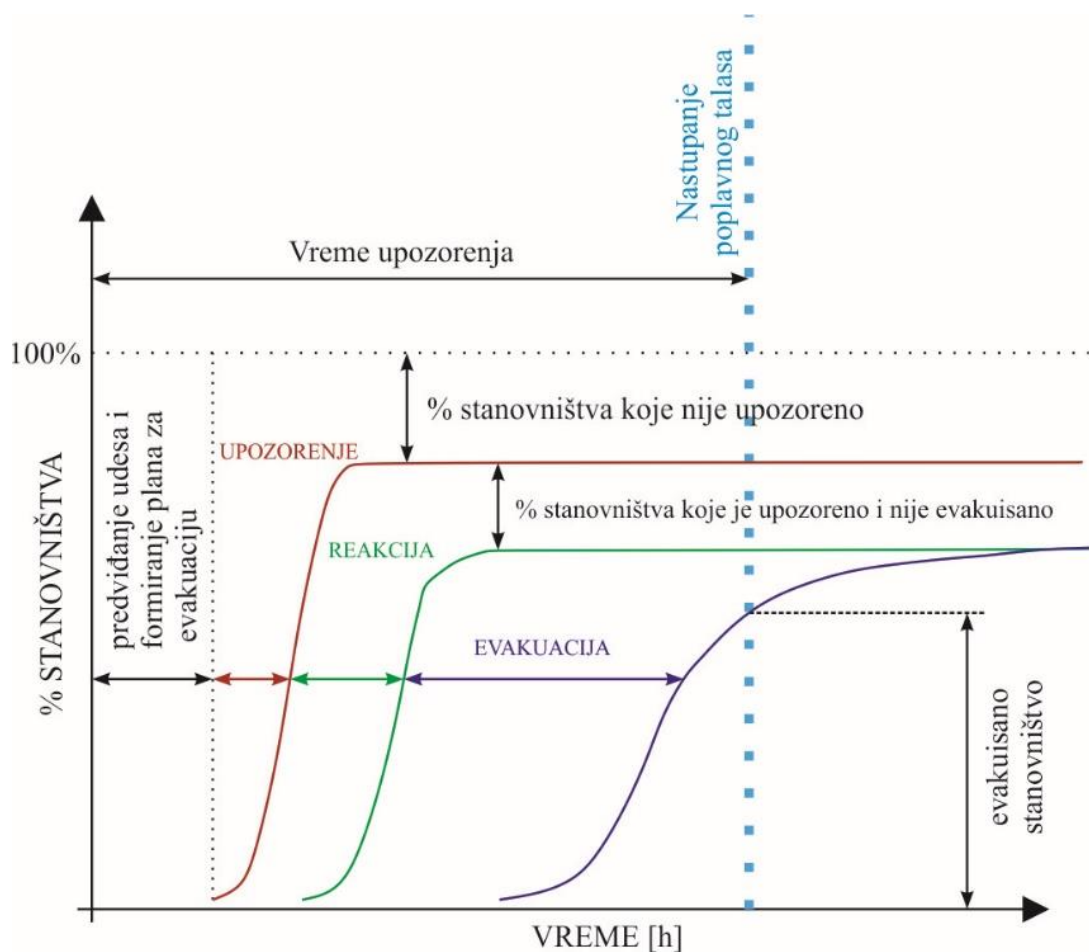
Na osnovu analize 16 udesa kod kojih su zabeležene ljudske žrtve, ustanovljeno je da najviše žrtava bude neposredni uz branu. Oko 60% žrtava je ustanovljeno na udaljenosti do 5 km, 35% između 5. i 11. km i 4% dalje od 11. km [231].

Velika ozbiljnost se primenjuje za trenutno rušenje, što se u slučaju deponije može poistovetiti sa udesom usled likvefakcije čije je dejstvo trenutno [228].

Vreme upozorenja predstavlja vreme proteklo od prvog upozorenja koje se izdaje potencijalno ugroženom ljudstvu do trenutka kada poplava nastupa. To je indikator raspoloživog vremena za evakuaciju ljudi.

Vreme upozorenja bi trebalo da se izračuna za svaki klaster stambenih objekata ili stanovništva u poplavljenom području i ono je drugačije za svaki od njih. Štaviše, važno je ustanoviti nulto vreme, kao referentno vreme, pri svakom proračunu vremena upozorenja [21].

Na slici 44 prikazana su različita vremena koja se uzimaju u obzir.



Slika 44. Raspodela vremena u procesu evakuacije ugroženog ljudstva [232]

U okviru Grejemove metode, vreme upozorenja je podeljeno u tri kategorije [228]:

- Bez upozorenja: kada je vreme upozorenja manje od 15 min. Smatra se da nema adekvatnog upozorenja jer zvanični organi nemaju vremena da upozore ugroženo ljudstvo pre nastupanja poplave. Ljudstvo je upozoreno tek kada i samo postane svesno nastupajućeg poplavnog talasa.
- Neka vrsta upozorenja: kada je vreme upozorenja između 15 i 60 min. U ovom slučaju je izdato zvanično upozorenje pre samog poplavnog talasa. Upozorenje se izdaje putem zvaničnih sredstava komunikacije, mada to opet ne garantuje da će svi ugroženi ljudi biti upozoreni.
- Adekvatno upozorenje: kada je vreme upozorenja veće od 60 min. Smatra se da je izdato pravilno i adekvatno upozorenje pre poplavnog talasa. Većina ugroženih ljudi je obavešteno o nastupajućoj poplavi.

Za detaljne analize vremena upozorenja trebalo bi posvetiti više pažnje scenariju udesa i njihovom mehanizmu.

Drugi faktor koji je u stanju da utiče na vreme upozorenja je trenutak dana u kom se poplava dešava, kao i tip udesa. Grejem je predložio tabelu iz koje se mogu usvojiti podaci za neke tipove udesa, tabela 33.

Tabela 33. Podaci potrebni za proračun vremena upozorenja [228]

Udes	Posebna razmatranja	Doba dana	Upozorenje	
			Mnogo očevidaca	Bez očevidaca
Prelivanje	Drenažna površina nasipa < 250 km ²	Dan	15 min pre rušenja	15 min pošto poplavni talas zahvati naseljeno područje
		Noć	15 min posle rušenja	60 min pošto poplavni talas zahvati naseljeno područje
	Drenažna površina nasipa > 250 km ²	Dan	120 min pre rušenja	60 min pre rušenja
		Noć	50-120 min pre rušenja	0-60 min pre rušenja
Unutrašnja erozija	/	Dan	60 min pre rušenja	15 min pošto poplavni talas zahvati naseljeno područje
		Noć	30 min posle rušenja	60 min pošto poplavni talas zahvati naseljeno područje
Zemljotres	Trenutno rušenje	Dan	15 min posle rušenja	15 min pošto poplavni talas zahvati naseljeno područje
		Noć	30 min posle rušenja	60 min pošto poplavni talas zahvati naseljeno područje
	Odloženo rušenje	Dan	2 h pre rušenja	30 min pre nego što poplavni talas zahvati naseljeno područje
		Noć	2 h pre rušenja	30 min pre nego što poplavni talas zahvati naseljeno područje

Poslednji parametar koji se definiše u Grejemovoj metodi je razumevanje ozbiljnosti poplave. Ovaj parametar zavisi dosta od vrste izdatih upozorenja i načina na koji ih ugroženo ljudstvo prihvata. Definišu se dve kategorije razumevanja [228]:

- Nepotpuno razumevanje: kada ugroženo ljudstvo nema razvijenu svest o razmerama poplavnog talasa koji nastupa, niti je bilo svedok sličnoj situaciji, i
- Potpuno razumevanje: kada ugroženo ljudstvo pravilno shvata upozorenje, kao i razmere poplave.

Ono što je presudno u razumevanju poplave je vreme koje protekne između udesa na deponiji i nastupanja poplavnog talasa. Kada je to vreme dovoljno veliko, ugroženo ljudstvo se može informisati o posledicama poplave i tako postati svesno njene ozbiljnosti. Takođe, i tip upozoravajućih poruka je značajan faktor. Jasne i direktne poruke su mnogo efektivnije. Ukoliko je ugroženo ljudstvo već imalo iskustva sa ranijim udesima i svesni su efekata koji će ih pogoditi, brže i bolje će reagovati na izdata upozorenja [228].

4.2.2. Procena ekonomskih posledica

Sve ekonomske posledice se mogu svrstati u dve osnovne grupe [233]:

- Direktne – one koje direktno proističu iz udesa i momentalno su uočljive, i
- Indirektne – koje nemaju momentalni efekat, već se manifestuju nakon određenog vremena i proističu iz direktnih posledica.

Najčešće se izražavaju kroz troškove. Troškovi udesa se mere prvenstveno na osnovu sredstava potrebnih za obnovu i vraćanje u prvobitno stanje. U proseku ti troškovi iznose 543 miliona dolara, ako se uzmu u obzir udesi i predviđanja za period od 2010-2019. godine [80].

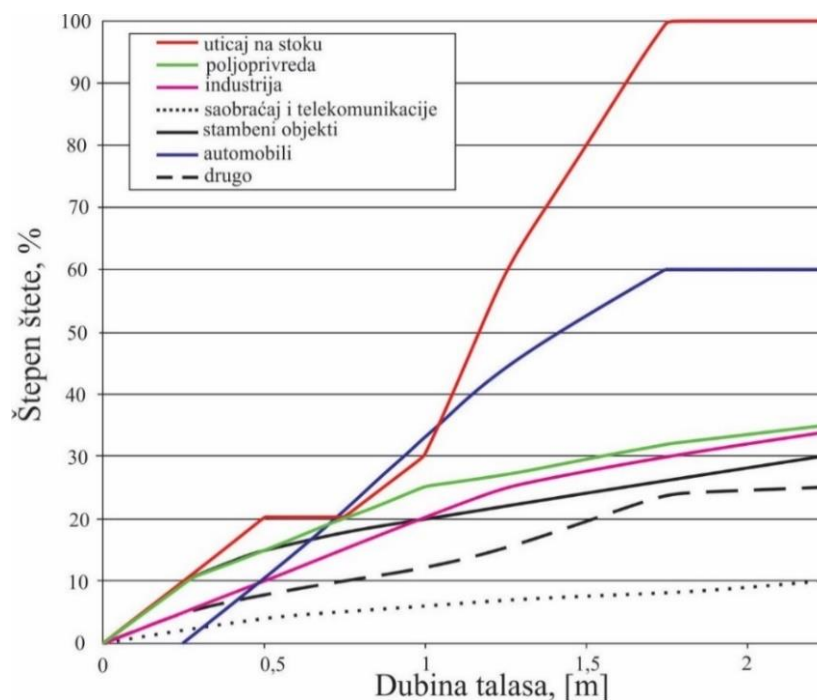
Postoje 3 različite skale za procenu direktnih ekonomskih posledica [234]:

- Makro-skala: kada procena obuhvata više opština i mogu se koristiti zvanični podaci. U ovom slučaju se uzimaju samo prosečne vrednosti za čitavo poplavljeno područje. Dakle, mogu se javiti neki neprecizni podaci poput nejednake naseljenosti, pa se usled toga uzimaju prosečne vrednosti.
- Srednja skala: isti princip kao sa makro-skalom samo se radi o manjim delovima poplavljeno područja. Bez obzira što se i kod ove skale koriste srednje vrednosti, moguće je razlikovati oblasti sa većom ili manjom gustinom naseljenosti, s obzirom da je bolja preglednost razmatranog područja, usled njegovog parcelisanja.

- Mikro-skala: Ova skala se najčešće koristi za mala urbana područja i kod ove skale se uzimaju u obzir vrednosti za svaku građevinu pogođenu poplavom, stoga zahteva detaljno prikupljanje podataka. Najpreciznija je, ali i najskuplja.

Procena ranjivosti pogođenog područja je dobar način za utvrđivanje ekonomskih posledica. U Španiji je u okviru Plana za prevenciju rizika od plavljenja u Valensiji razrađena metoda koja se zasniva na faktorima ranjivosti za direktnu štetu i gubitak upotrebne vrednosti zemljišta usled totalne destrukcije i naziva se „PATRICOVA“ (*Prevención de Riesgo de Inundación en la Comunidad Valenciana*) metoda. Faktori u okviru ove metode predstavljaju početnu procenu upotrebne vrednosti zemljišta u nedimenzionalnom obliku, u okviru skale od 0-100, pri čemu se za vrednost 100 vezuje trošak od 82 evra/m² za 2002. godinu. S obzirom da je ova konkretna vrednost predložena za zemljište u Valensiji, bitno je upostaviti sistem vrednosti za svaki region individualno. Nakon što se uspostavi ekonomska vrednost posledicem, potrebno je proceniti realan stepen štete usled plavljenja. U te svrhe, često se koriste krive „dubina talasa/šteta“ koje imaju „S“ oblik. Dubina plavljenja se koristi jer najbolje opisuje štete poplave, mada i drugi faktori poput vremena upozorenja, brzine vode i vremena trajanja poplave mogu imati znatnog uticaja. „PATRICOVA“ metod predlaže krive za sve upotrebne svrhe zemljišta. Dubina talasa od 0,8 m čini da posledice rastu strmo dok se ne dostigne visina od 1,2 m, odakle se razvijaju laganijim tempom. Od 2 m počinje stabilizacija štete koja i dalje raste ali postepeno.

Može se reći da je od ove tačke šteta konstantna. Postoje različite vrste ovih kriva u zavisnosti od toga šta je predmet proučavanja (poljoprivredna dobra, farme, infrastruktura...) Na slici 45 su prikazane krive za različite upotrebne svrhe zemljišta u Nemačkoj [235].



Slika 45. Krive za različite upotrebne svrhe zemljišta u Nemačkoj [235]

Ukoliko se samo bazira na kuće, stepen destrukcije zavisi od njene građe, broja spratova itd. Na primer, prvi sprat će biti poplavljen ukoliko je dubina talasa oko 0,8 m [236].

Vreme upozorenja se uzima u obzir u smislu vremena evakuacije. Vreme trajanja poplave je bitno jer šteta raste sa povećanjem ovog vremena. Brzina poplavnog talasa određuje vreme trajanja poplave, a zajedno sa dubinom poplavnog talasa određuje veličinu posledica. Naposletku, trebalo bi uzeti u obzir i uticaj na životne navike stanovništva [237].

Dakle, direktne posledice poplave se dobijaju kada se pomnoži upotrebna vrednost zemljišta i stepen štete koji se očitava sa krive. Krive bi trebalo revidovati svaki put kada se koriste za procenu štete, zbog fluktuacije faktora koji se uzimaju u obzir [21].

Prilikom procene ekonomskih posledica koje su nastale usled direktnog uticaja poplavnog talasa, trebalo bi uzeti u obzir i one indirektne, poput prestanka ekonomske aktivnosti na području zahvaćenom poplavom ili zbrinjavanja i udomljavanja ljudi čije su kuće uništene.

U tom slučaju se preporučuje računanje fiksnog procenta direktnih troškova. Tako je na primer u Japanu praksa da se indirektni troškovi računaju kao 6% direktnih [238], dok u Španiji ovi troškovi variraju od 0 do 55% [236].

Naposletku, trebalo bi uzeti u obzir i troškove rekonstrukcije same deponije do čijeg je rušenja došlo.

Za potrebe procene štete prouzorkovane nekom elementarnom nepogodom u Srbiji postoji „Uputstvo o jedinstvenoj metodologiji za procenu šteta od elementarnih nepogoda“ (Sl. list SFRJ, br. 27/87). U njemu su date smernice za procenu [239]:

- direktne štete na oštećenim i uništenim sredstvima, materijalnim i kulturnim dobrima, koji su u svojini građana i građanskih pravnih lica, koje se izražavaju u novčanom smislu, odnosno, iznosu potrebnom za dovođenje u prvobitno stanje,
- troškovi izazvani direktnom štetom, poput troškova odbrane, zdravstvenih usluga, zbrinjavanja ljudi, i
- indirektno štete, koje podrazumevaju izgubljeni dohodak zbog smanjenje proizvodnje, na teritoriji gde se javila šteta.

Iako je ovo uputstvo i dalje u upotrebi, njegov primena je prilično problematična, s obzirom da je izdato 1987. godine, otkada je došlo do velikih promena u tumačenju štete, pogotovu upotrebne vrednosti razmatranih dobara. Stoga je preporučljivije koristiti neki okvir kojim bi se procenila ranjivost objekata, po ugledu na špansku „PATRICOVA“ metodu.

U te svrhe u upotrebi je „Uputstvo o metodologiji za izradu procene ugroženosti od elementarnih nepogoda i drugih nesreća i planova zaštite i spasavanja u vanrednim situacijama“ koje je na snazi od 2017. godine. U okviru njega date su kategorije posledica po privredu, tabela 34, koje su obuhvatile direktnu i indirektnu štetu, kao i posledice po društvenu stabilnost, i to po kritičnu infrastrukturu, tabela 35, kao i građevine javnog društvenog značaja, tabela 36. Kategorija posledica se određuje na osnovu budžeta Srbije, na nacionalnom nivou, odnosno, budžeta autonomnih pokrajina i jedinica lokalne samouprave, a kada se radi o privrednim društvima i drugim pravnim licima, posledice se izražavaju zbirom vrednosti osnovnih sredstava i obrtnog kapitala. Svaka kategorija posledica je definisana na osnovu veličine opterećenja razmatranog budžeta [240].

U štetu po privredu spadaju troškovi obnove zgrada, javnog prevoza i infrastrukture, materijalnih dobara, kulturne baštine, troškove ekološke obnove, troškove prekida privrednih delatnosti i sl. [240].

Tabela 34. Posledice po privredu [240]

Kategorija	Veličina	Kriterijum
1	Minimalne	1-3% budžeta
2	Male	3-5% budžeta
3	Umerene	5-10% budžeta
4	Ozbiljne	10-15% budžeta
5	Katastrofalne	> 15% budžeta

Pod kritičnom infrastrukturom se u smislu ovog pravilnika podrazumeva elektroenergetska, telekomunikaciona, saobraćajna, vodoprivredna infastruktura, zdravstvena i socijalna zaštita, poput domova zdravlja, bolnica, apoteka, objekata za proizvodnju i distribuciju hrane, organa državne uprave i hitne službe (policija, hitna pomoć, vatrogasci), nacionalnih spomenika i vrednosti, naučnih i obrazovnih ustanova i sl. [240].

Tabela 35. Posledice po društvenu stabilnost – ukupna materijalna šteta na kritičnoj infrastrukturi [240]

Kategorija	Veličina	Kriterijum
1	Minimalne	<1% budžeta
2	Male	1-3% budžeta
3	Umerene	3-5% budžeta
4	Ozbiljne	5-10% budžeta
5	Katastrofalne	>10% budžeta

U građevine javnog značaja spadaju sportski objekti, objekti kulturne baštine, sakralni objekti i sl.

Tabela 36. Posledice po društvenu stabilnost – ukupna materijalna šteta na građevinama javnog društvenog značaja [240]

Kategorija	Veličina	Kriterijum
1	Minimalne	<0.5% budžeta
2	Male	0.5-1% budžeta
3	Umerene	1-3% budžeta
4	Ozbiljne	3-5% budžeta
5	Katastrofalne	>5% budžeta

Prilikom procene ekonomske štete u obzir bi trebalo uzeti jednične troškove izgradnje oštećenih objekata pa tek onda odrediti kategoriju posledice, pošto se procenjeni troškovi uporede sa budžetom.

U tabeli 37 je dat primer okvirnih troškova pojedinih građevina.

Tabela 37. Primer približnih jediničnih troškova izgradnje raznih kategorija građevina [241]

Tip građevine	Evra/ m ²
Jednostavne poljoprivredne građevine, pomoćne građevine i sl.	28,4
Rezervoari vode, štale, haustori i sl.	49,5
Vodotomljevi	78,4
Poljoprivredne građevine do jednog sprata, jednostavna industrijska postrojenja i sl.	146,4
Stambene zgrade do 4 sprata, lokalne sportske građevine, javne garaže, poslovne građevine...	175,8
Stambene i poslovne građevine, složenije poljoprivredne i industrijske građevine, građevine javnih institucija, domovi zdravlja i sl.	200,5
Privatne kuće, trgovački centri	226,3
Trgovački centri i hoteli viših kategorija	250
Bolnice, biblioteke i kulturne građevine	300,5
Obrazovne institucije	372,6
Aerodromi	451,6
Kliničko-bolnički centri	513,3
Koncertne dvorane	615,3

Za potrebe ocenjivanja ekonomskih posledica, mogu se koristiti i grafički prikazi referalne karte, pa tako na prostoru Republike Srbije u obzir dolaze [242]:

- referalna karta 1: „Korišćenje zemljišta i funkcionalna urbana područja”,
- referalna karta 2: „Mreža urbanih centara i regionalna organizacija”,
- referalna karta 3: „Transportna infrastruktura i elektronska komunikaciona mreža i oprema”,
- referalna karta 4: „Energetska i vodoprivredna infrastruktura”, i
- referalna karta 5: „Turizam i zaštita životne sredine, prirodnog i kulturnog nasleđa”, koje su izrađene u razmeri 1:300.000.

Ove karte mogu poslužiti za stvaranje šire slike o sadržaju i razvijenosti okoline deponije.

Kada se govori o kulturnom nasleđu, poput istorijskih/arheoloških spomenika, treba naglasiti da je procenu štete ovakvih objekata isključivo moguće izvesti kvalitativno, s obzirom da bi svaka novčana aproksimacija ovakve štete bila nerealna i neetička.

Takođe, postoje i metode za vrednovanje novčane štete prouzrokovane gubitkom ljudskog života, poput metode statističkog vrednovanja života, metode određivanja ukupnih društvenih troškova, metode oportunitetnih troškova i slično, međutim njihova upotreba je previše kontraverzna i može dovesti do grešaka u tumačenju [243].

4.2.3. Procena ekoloških posledica

Za razliku od procene ljudskih gubitaka i ekonomskih posledica, ekološke posledice je teško numerički izraziti, odnosno, proceniti kvantitativno. Bez obzira na ovu činjenicu, bitno je uzeti ih u obzir prilikom procene rizika zbog njihovog velikog uticaja na ostale posledice.

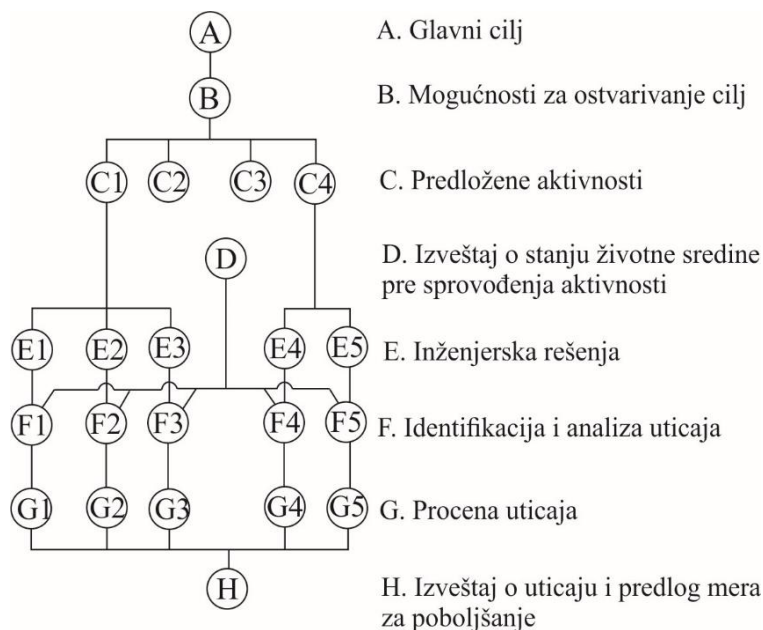
Ako se ove posledice razmatraju kroz troškove remedijacije onda se svrstavaju u ekonomske. Za integralnu procenu ovih posledica u obzir dolazi isključivo kvalitativna procena.

U te svrhe, kao koristan alat može se koristiti Leopoldova matrica. To je matrica koncipirana kao svojevrsna ček-lista svih mogućih uticaja određenih aktivnosti na životnu sredinu. Benefit ove matrice u tome što je fleksibilna za upotrebu i može se korigovati u skladu sa prirodom uticaja razmatranog slučaja.

Prilikom razmatranja uticaja na životnu sredinu potrebno je osvrnuti se na dva aspekta svake aktivnosti [244]:

- Magnitudu uticaja – pri čemu se misli na stepen ili skalu i podleže proceni na osnovu realnih činjenica. Izražava se poreko numeričkog indikatora od 1-10, od najmanje do najveće magnitude.
- Značajnost – pri čemu se misli na posledice usled promene stanja životne sredine. Ovaj faktor podleže ekspertskoj proceni i izražava se na skali od 1-10, od najmanje do najveće značajnosti.

Metodologija predstavlja popis svih mogućih uticaja i karakteristika životne sredine. Njen koncept je prikazan na slici 46.



Slika 46. Dijagram aktivnosti prema Leopoldovoj matrici [244]

Razmere skala za opis magnitude i značajnosti uticaja se mogu modifikovati. Kod najprostije Leopoldove matrice se ne uzimaju u obzir oba indikatora, već se svakom uticaju pripisuje ili ne pripisuje uticaj, bez skaliranja.

U tabeli 38 predložena je modifikovana Leopoldova matrica za procenu ekoloških posledica usled udesa na deponijama. U kolonama su predloženi svi mogući aspekti uticaja na životnu sredinu. Ovi aspekti se mogu predlagati od slučaja do slučaja.

Tabela 38. Modifikovana Leopoldova matrica za procenu ekoloških posledica [244]

UDES	KOMPONENTE OKRUŽENJA							
	Vazduh	Voda		Zemljište		Prirodni ekološki sistemi		
	Kvalitet	Kvalitet površinskih voda	Kvalitet podzemnih voda	Pejzaž/topografija	Kvalitet	Prirodna vegetacija	Prirodno stanište	Specijalni rezervati prirode
Značajnost								

Za razliku od klasične Leopoldove matrice, predlaže se da se uticaj ne ocenjuje dvoznačno (magnituda i značajnost), već isključivo na osnovu njegove značajnosti.

U zavisnosti od odabrane skale, u ćelije se unosi procenjena značajnost uticaja na razmatrane komponente okruženja, a u zavisnosti od scenarija udesa. U tabeli 39 date su predložene skale za opsege od 1-3 do 1-7, pri čemu se preporučuju skale sa neparnim brojem ćelija, radi lakšeg izdvajanja srednjih vrednosti.

Tabela 39. Skale posledica

3	Velike posledice	4	Katastrofalne posledice	5	Katastrofalne posledice	6	Katastrofalne posledice	7	Katastrofalne posledice
2	Značajne posledice	3	Velike posledice	4	Velike posledice	5	Veoma velike posledice	6	Veoma velike posledice
1	Male posledice	2	Značajne posledice	3	Značajne posledice	4	Velike posledice	5	Velike posledice
		1	Male posledice	2	Male posledice	3	Značajne posledice	4	Značajne posledice
				1	Zanemarljive posledice	2	Male posledice	3	Male posledice
						1	Zanemarljive posledice	2	Veoma male posledice
								1	Zanemarljive posledice

4.2.4. Ukupna značajnost posledica

Nakon što su se procenile sve posledice potencijalnog udesa na deponiji, potrebno je dodeliti im ukupnu značajnost, odnosno, ustanoviti jednoznačni težinski faktor na osnovu kog će se vrednovati rizik.

Jedan od najprostijih i najčešće korišćenih pristupa je model koji je razvio Australijski nacionalni komitet za visoke brane (ANCOLD), a koji je nastao kao alat za preliminarnu procenu rizika na osnovu kategorije posledica kojoj brana pripada. Prilikom kategorisanja se uzima u obzir broj lica izloženih riziku (broj ljudi na ruti poplavnog talasa), izražen kvantitativno, i sveukupna šteta, izražena kvalitativno, tabela 01. Ponuđeno je sedam kategorija posledica, i to: „veoma male“, „male“, „značajne“, „visoka C“, visoka B“, „visoka A“ i „ekstremne“ [245].

Tabela 40. Kategorije posledica zasnovane na populaciji izloženoj riziku prema ANCOLD-u [245]

Broj lica izloženih riziku	Značajnost ekonomskih i ekoloških posledica			
	Male	Značajne	Velike	Katastrofalne
<1	Veoma male	Male	Značajne	Visoka C
≥1-10	Značajne*	Značajne*	Visoka C	Visoka B
>10-100	Visoka C	Visoka C	Visoka B	Visoka A
>100 do 1000		Visoka B	Visoka A	Ekstremne
>1000			Ekstremne	Ekstremne

*Posledice prelaze u Visoku C kategoriju gde postoji verovatnoća da dođe do jedne ili više ljudskih žrtava.

Kao što se iz tabele 40 može videti, ukupna šteta izražena kroz ekonomske i ekološke posledice se izražava jednoznačno dok je broj lica izloženih riziku podeljen dekadno.

Samo u slučaju kada je taj broj <1, krajnja kategorija posledica se degradira za jedan nivo. U svim ostalim slučajevima, kategorija raste, sa izuzetkom „veoma malih“ i „malih“. Dakle, ukoliko se na ruti poplavnog talasa nalazi najmanje jedno lice, najniža kategorija posledica je „značajna“, a ukoliko se ispostavi da može doći do jedne ili više žrtava, najniža kategorija je „visoka C“.

Za potrebe utvrđivanja ukupne značajnosti posledica u ovom doktoratu usvaja se sličan princip uz manje izmene:

- Jednoznačni težinski faktor ekonomskih i ekoloških posledica se poistovećuje sa višim faktorom jedne od ovih posledica;
- Broj lica izloženih riziku se poistovećuje sa brojem potencijalnih žrtava, prethodno utvrđenih pomoću Grejemove metode;
- ANCOLD-ove kategorije posledice „visoka C“, „visoka B“ i „visoka A“ se objedinjuju u jedan kvalitativni težinski faktor, koji je ekvivalentan „velikim“ posledicama, nižeg, srednjeg i višeg težinskog faktora;
- Nekategorisane posledice (male i značajne ekonomske i ekološke posledice i broj lica izloženih riziku od 100-1000, odnosno, preko 1000) su vrednovane kao „velike (srednji faktor)“, odnosno, „velike (viši faktor)“;
- U zavisnosti od oblika izabrane matrice rizika, kvalitativnim faktorima se dodeljuju kvantitativni, radi lakšeg rangiranja krajnjeg rizika.

Ovako modifikovani ANCOLD-ov pristup prikazan je u tabeli 41.

Tabela 41. Predloženi pristup za utvrđivanje ukupne značajnosti posledica, zasnovan na ANCOLD-ovom pristupu

Broj potencijalnih ljudskih žrtava	Značajnost ekonomskih i ekoloških posledica			
	Male	Značajne	Velike	Katastrofalne
<1	Veoma male	Male	Značajne	Velike (niži faktor)
≥1-10	Velike (niži faktor)		Velike (srednji faktor)	Velike (viši faktor)
>10-100			Velike (srednji faktor)	Velike (viši faktor)
>100 do 1000	Velike (srednji faktor)		Velike (viši faktor)	Katastrofalne
>1000	Velike (viši faktor)		Katastrofalne	Katastrofalne

Najbitniji uslov koji treba ispoštovati je da broj potencijalnih ljudskih žrtava uvek bude najkritičniji element prilikom vrednovanja, odnosno, da <1 žrtve degradira težinski faktor ekonomskih i ekoloških posledica, a >1 žrtve isključi težinski faktor manji od „velikih“ posledica.

5. MODEL ZA PROCENU RIZIKA NA DEPONIJAMA INDUSTRIJSKOG OTPADA MINERALNOG POREKLA

Na osnovu svih dosadašnjih razmatranja, uspostavljen je model za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla.

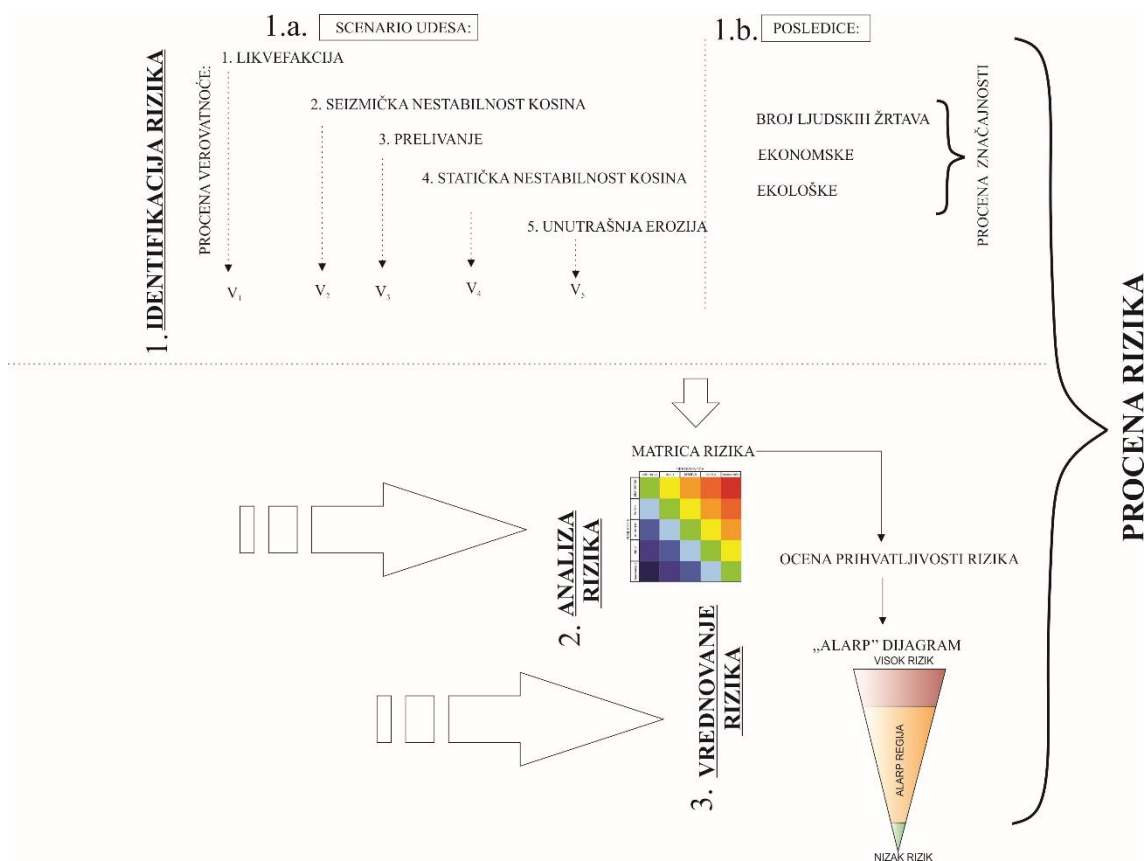
Model je razvijen za potrebe praktične i realne procene rizika. Njime su obuhvaćena sva saznanja do kojih se došlo dosad iz oblasti deponovanja industrijskog otpada sa ciljem da se uspostavi jasan okvir za procenu rizika namenjen isključivo deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla, čime bi se jednom za svagda ovi objekti razlučili od brana za akumulaciju vode, a čiji su se modeli za procenu rizika godinama zloupotrebljavali za potrebe deponija.

Na slici 47 prikazana je opšta šema za procenu rizika na deponijama, a koja obuhvata tri glavna koraka procene rizika prema standardu ISO 31000:2015: identifikaciju, analizu i vrednovanje rizika. Sva tri koraka su obuhvaćena modelom.

U okviru identifikacije rizika razvijaju se scenariji potencijalnih udesa, kao i posledice koje proističu iz njih.

Prilikom analize rizika uzimaju se u obzir verovatnoće nastanka udesa i značajnost posledica na osnovu kojih se određuje nivo rizika. Ovaj korak daje ulazne podatke za vrednovanje rizika.

Prilikom vrednovanja, prepoznati nivo rizika se poredi sa unapred definisanim kriterijumima prihvatljivosti rizika.

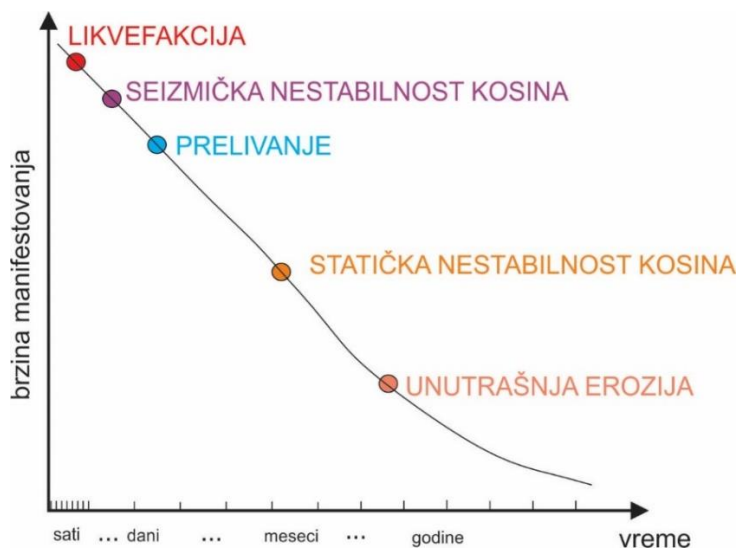


Slika 47. Procena rizika eksploatacije deponija industrijskog otpada

Model za procenu rizika se zasniva na principu uslovnog analiziranja udesa i posledica koje nastaju usled njega. Dakle, posledice se predviđaju u skladu sa mehanizmom delovanja udesa.

U okviru identifikacije rizika, prvi element modela je scenario udesa. Redosled razmatranja različitih scenarija udesa je uspostavljen prema brzini, odnosno vremenu njihovog manifestovanja, od najkraćeg do najdužeg.

Na slici 48 dat je prikaz mogućih udesa koji imaju različito vreme i brzinu delovanja, od momenta iniciranja do momenta nastanka.



Slika 48. Brzina i vreme manifestovanja udesa na deponijama

Scenario udesa se razmatra za svaki nasip deponije pojedinačno. Podrazumeva se da će udes imati najnepovoljniji ishod i rezultovati isticanjem materijala iz akumulacionog prostora i formiranjem poplavnog talasa. Smer kretanja kod brdsko-planinskih deponija je lako pretpostaviti, dok se kod ravničarskih deponija bira smer kretanja talasa koji ima najveće opterećenje po okolinu. Ukoliko su u okolini prisutni vodotokovi, velika je verovatnoća da će im se talas pridružiti, usled pružanja što manjeg otpora sredini. Kod kaskadnih deponija treba razmatrati i mogućnost „domino“ efekta..

Prvenstveno se uzima u obzir nivo održavanosti deponije, pa tek onda predloženi kriterijumski parametri za svaki scenario udesa pojedinačno. Preporuka je da se prilikom tumačenja nivoa održavanosti deponije osvrne na tabelu 13 (poglavlje 3.2.1), koja može ukazati na potencijalni scenario udesa na osnovu uočene anomalije.

Prilikom modeliranja scenarija udesa, kreće se od likvefakcije, kao udesa koji može prouzrokovati najznačajnije posledice, a ima i najkraće vreme manifestovanja. U te svrhe, ocenjuje se potencijal likvefakcije. Kako se u [123] sugeriše, trebalo bi koristiti bar dva modela za procenu potencijala likvefakcije.

Na slici 59.a prikazana je predložena ček-lista za skrining potencijala likvefakcije. Više modela i preporuka za skrining likvefakcije koji imaju široku upotrebu u svetu je sublimirano i predložen je jedinstveni poredak. U zavisnosti od kvantiteta i kvaliteta ulaznih podataka kojim se raspolaže, potencijal likvefakcije se može vrednovati sa manjom ili većom sigurnošću, ali po uzoru na sistem koji je predložila EPA, a koji se

zasniva na tome da će do likvefakcije doći samo ako je više od pola kriterijuma zadovoljena [139].

Dakle, ključni parametri za ocenu potencijala likvefakcije su obuhvaćeni ček-listom, a ukoliko se neki od njih za predmetnu deponiju nepoznati, oni dobijaju status neutralnih parametara i ne uzimaju se u obzir. Broje se samo kriterijumski parametri čijim se vrednostima raspolaže. Razume se, što se raspolaže većim brojem parametara, to će rezultati skrininga biti relevantniji.

U listi je navedeno ukupno 13 parametara, pri čemu je 7/13 pozitivnih odgovara dovoljno da se dokaže pozitivan potencijal likvefakcije. Među kriterijumskim parametrima na prvom mestu je zabeležen slučaj likvefakcije. Ukoliko je likvefakcija zabeležena na predmetnoj deponiji, postoji verovatnoća da se može ponoviti, osim ukoliko je došlo do velike promene u uslovima eksploatacije. Parametri koji se takođe uzimaju u obzir su: geološka starost terena na kom je locirana deponija¹², nivo podzemnih voda, srednji prečnik čestica otpada, učešće glinovitih čestica u otpadu, Heznov stepen uniformnosti, indeks relativne zbijenosti, indeks plastičnosti, stepen saturacije, seizmički hazard, kao i likvefakcijski faktor sigurnosti, SPT i CPT otpori.

Pored ove ček-liste predlaže se upotreba bar još jednog modela koji ima široku upotrebu, kao dodatnog testa. Posebno se preporučuju modeli koji u obzir uzimaju IP, w i LL poput modela predloženih u [148, 150], slika 49.b, ili tzv. „Japanski kriterijum“, zasnovan na granulometrijskom sastavu i Heznovom stepenu uniformnosti – slika 49.c [153].

Svakako, u zavisnosti od podataka o materijalu kojim se raspolaže, u obzir se mogu uzeti i drugi modeli za skrining potencijala likvefakcije, koji su navedeni u poglavlju 3.2.2.

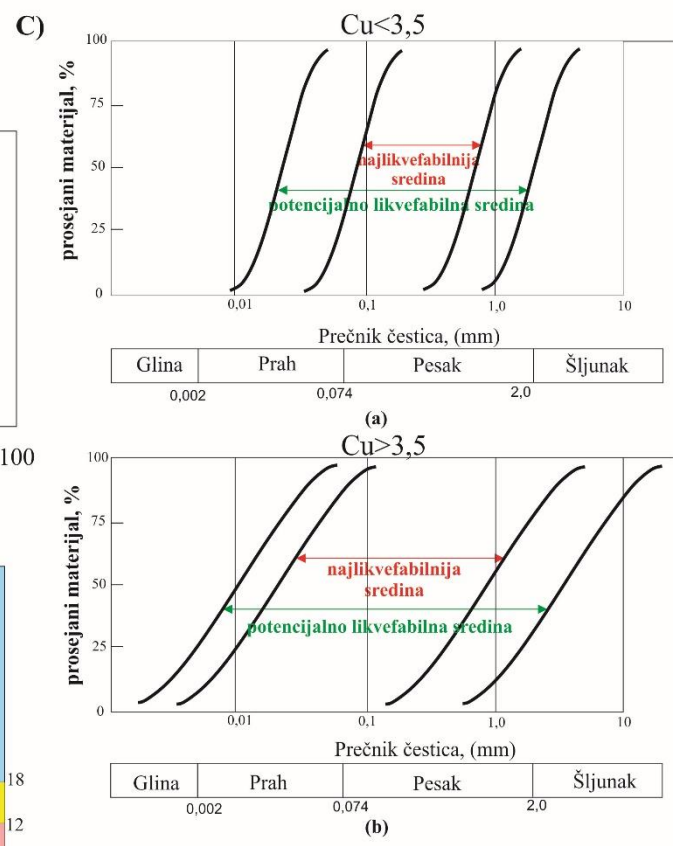
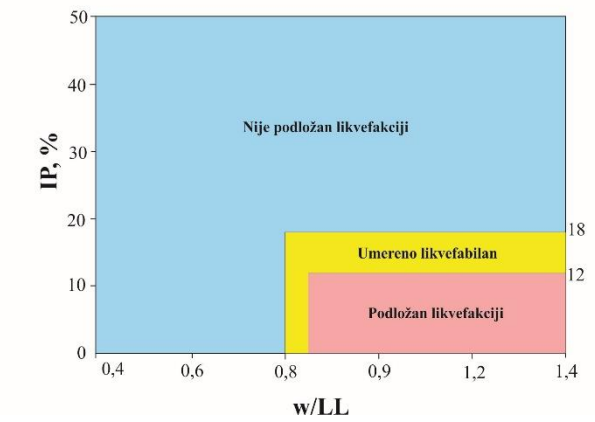
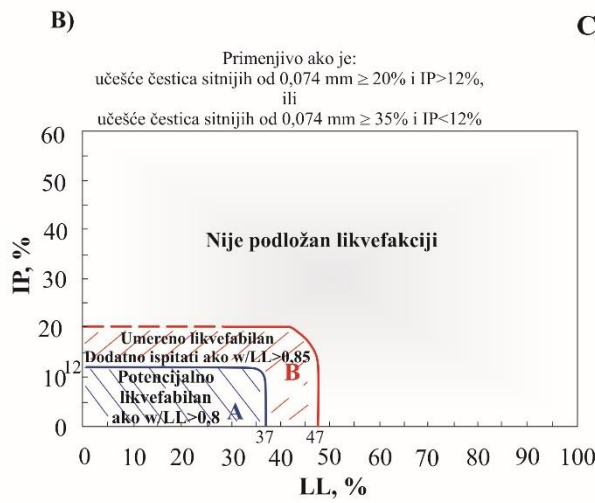
Kao što je napomenuto, pozitivan potencijal likvefakcije ne mora nužno ukazivati na veliku verovatnoću da do udesa usled likvefakcije dođe, već samo na sklonost materijala ka likvefakciji.

¹² Iako se geološka starost inicijalno odnosi na sam materijal čiji se potencijal likvefakcije razmatra, u ovom modelu se ovaj kriterijum odnosi samo tlo na kom se deponija nalazi, s obzirom da je sam otpad nužno iz skorašnje, holocenske epohe.

Potencijal likvefakcije

A) Do likvefakcije može doći ako je:

1. Zabeležen slučaj likvefakcije u prošlosti
2. Teren na kom se nalazi deponija je iz holocenskog doba
3. Nivo podzemnih voda <15 m
4. $d_{50}=0,02 \sim 1$ mm
5. Učešće glinovitih čestica <10%
6. $I_d < 75\%$
7. $IP < 7$
8. $Cu < 10$
9. $Sr > 80\%$
10. Zona seizmičkog hazarda - zemljotres intenziteta $\geq VI$ stepeni
11. CPT otpor <15 MPa
12. SPT otpor <22 MPa
13. $F_{s_{nk}} < 1,1$



Slika 49. Potencijal likvefakcije: A) ček-lista, B) modeli zasnovani na IP, w i LL C) „Japanski kriterijum“

Prema hijerarhiji, nakon likvefakcije, razmatra se:

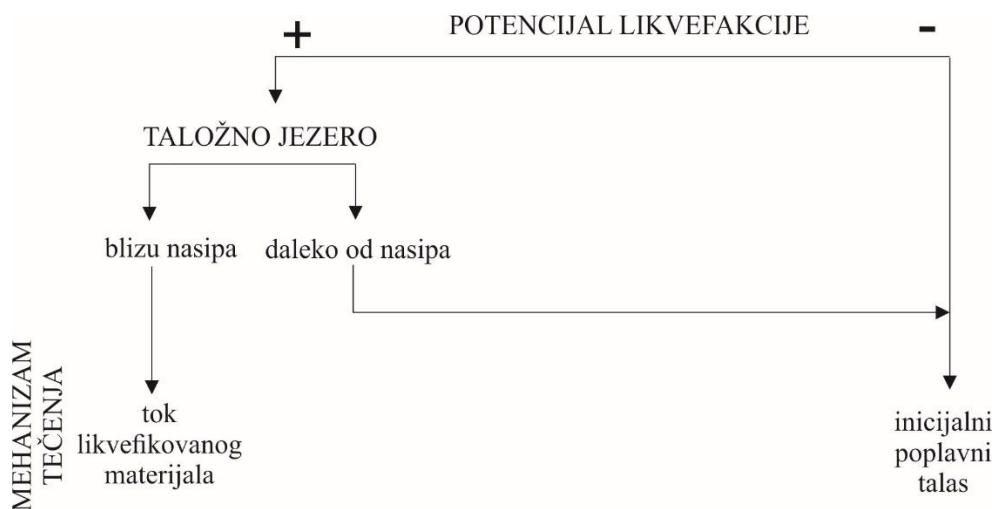
- Udes po scenariju seizmičke nestabilnosti - gde se u obzir uzima dinamički faktor sigurnosti. Uz njega, se uzimaju u obzir karta seizmičkog hazarda za odgovarajući povratni period i lokaciju na kojoj se deponija nalazi, kao i karta zabeleženih zemljotresa. Kod deponija sa malim inicijalnim rizikom, uzima se povratni period od 95 god, dok se u ostalim slučajevima razmatraju povratni periodi od 475 i 975 godina;
- Udes po scenariju preliivanja – gde se određuje potencijal plavljenja, odnosno, računa zapremina pale vode i upoređuje sa kapacitetom deponije da prihvati tu vodu;
- Udes po scenariju statičke nestabilnosti - gde se u obzir uzima statički faktor sigurnosti, i
- Udes po scenariju unutrašnje erozije – gde se u obzir uzima otpornost materijala na eroziju, eventualna prisutnost zona procurivanja, pukotina na kruni nasipa, kao i deformacije na kosinama.

Svim ovim scenarijima se dodeljuje verovatnoća. Vrednovanje verovatnoće je segment modela koji je najfleksibilniji i u najvećoj meri zavisi od eksperta koji vrši procenu. Izražavanje verovatnoće je u modelu zamišljeno kao slobodan izbor, kvalitativno ili kvantitativno, u opsegu koji zavisi od oblika izabrane matrice rizika. Ukoliko se verovatnoćama dodeli numerička vrednost, može se izvršiti procena ukupne verovatnoće svih scenarija udesa, u zavisnosti od toga da li se procena rizika neke deponije vrši jednoznačno ili pak za svaki scenario udesa pojedinačno.

Kod verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti, opciono je korišćenje metode koja je predložena u [118] ili jednostavne ekspertske procene na osnovu minimalnih vrednosti prema lokalnom standardu SRPS.U.C5.020.

Drugi najbitniji element modela su posledice. Pre same procene posledica, vrši se predviđanje mehanizma tečenja materijala, odnosno, tipa toka, na osnovu razmatranja iz poglavlja o analizi poplavnog talasa (poglavlje 4.1.2). U zavisnosti od blizine taložnog jezera nasipu i potencijala likvefakcije, bira se mehanizam tečenja, po algoritmu prikazanom na slici 50. Ovaj korak je krucijalan za realnu procenu količine isteklog materijala, jer bi nužno došlo do isticanja većih količina iz deponije, ukoliko je potencijal likvefakcije pozitivan i taložno jezero blizu nasipa, nego u bilo kom drugom slučaju. Kao kriterijum po kom se utvrđuje blizina nasipa uzima se zakonski propisana minimalna

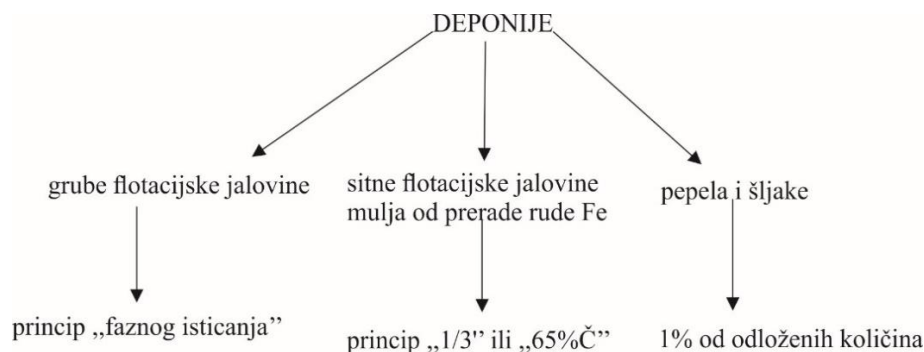
dužina plaže od 100 m. Dakle, ukoliko je plaža kraća od 100 m, smatraće se da taložno jezero blizu nasipa.



Slika 50. Mehanizam tečenja materijala

Nakon toga vrši se procena osnovnih karakteristika poplavnog talasa:

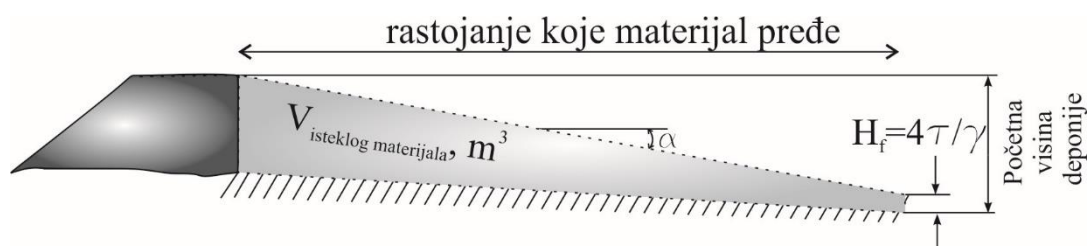
- Procena količine isteklog materijala – gde se preporučuje predloženi princip „faznog isticanja“ (poglavlje 4.1.4.1.3) po mehanizmu inicijalnog poplavnog talasa kod grube flotacijske jalovine, osim u slučaju kada je procenjeno da može doći do likvefakcije. Tada dolazi do isticanja po mehanizmu likvefikovanog toka materijala, pa se pretpostavlja da bi moglo doći do isticanja veće količine materijala, poput onih procenjenih pomoću principa “1/3” ili “65% Č”. Ipak, kod ovog koraka se prvenstveno sugeriše da se razmotre karakteristike otpada, deponije i okoline bitne za njegovo tečenje, kao i slični slučajevi u istoriji, pa tek onda procene realne količine. Kako je to izneto u poglavlju 4.1.4.1, kod deponija kapaciteta $<1 \text{ Mm}^3$ uzima se da najčešće dolazi do isticanja skoro svog odloženog materijala, dok se kod većih deponija te količine smanjuju i zavise od mnogo faktora. Eventualno bi, na osnovu mnogih zabeleženih slučajeva u prošlosti i inženjerske logike, mogla da se uspostave pravila za deponije kapaciteta $>10 \text{ Mm}^3$, u zavisnosti od karakteristika otpada, u prvom redu njegove fluidnosti, slika 51.



Slika 51. Predlog načina razmatranja količina isteklog materijala kod deponija kapaciteta $>10 \text{ Mm}^3$

Razume se, prihvatanje ovakvih sugestija sledi tek nakon opsežne analize svih faktora koji utiču na tečenje materijala.

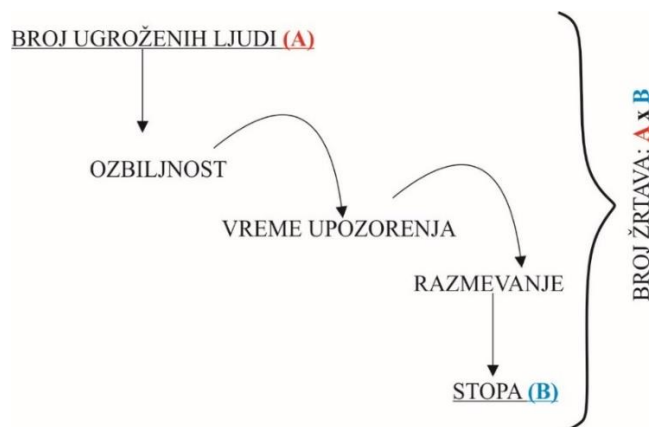
- Procena pređenog rastojanja isteklog materijala - koja uključuje procenu „zone opasnosti“, kao vid preliminarne procene ugroženog područja, uz procenu rastojanja koje bi istekli materijal prešao na osnovu modela predloženog u [223], slika 52 (poglavlje 4.1.4.2).



Slika 52. Pojednostavljen model rastojanja istekle hidromešavine, modifikovano prema [223]

Na osnovu ovih podataka se dalje procenjuje:

1. Broj ljudskih žrtava prema Grejemovoj metodi, pri čemu se kod likvefikovanog toka, kako je predloženo, usvajaju najviše vrednosti pojedinih parametara koji figurišu u proceduri: velika ozbiljnost i bez vremena upozorenja. Kod ostalih scenarija udesa, ovi parametri se usvajaju od slučaja do slučaja (poglavlje 4.2.1). Princip usvajanja broja potencijalnih ljudskih žrtava prikazan je na slici 53.



Slika 53. Princip usvajanja ljudskih žrtava prema Greijemovoj metodi

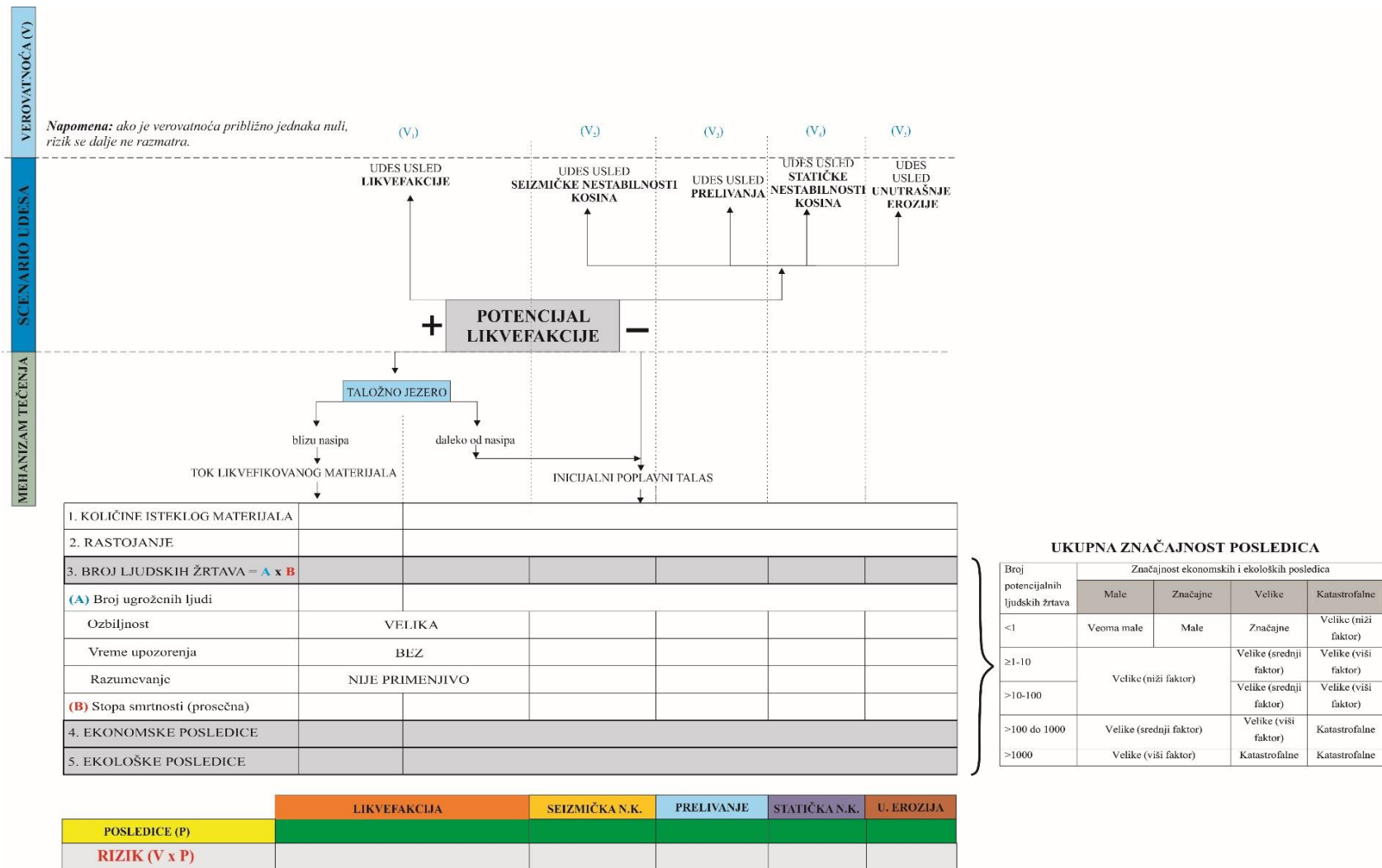
2. Ekonomske posledice, tačnije, posledice po privredu i društvenu stabilnost prema „Uputstvu o metodologiji za izradu procene ugroženosti od elementarnih nepogoda i drugih nesreća i planova zaštite i spasavanja u vanrednim situacijama“ (poglavlje 4.2.2), i
3. Ekološke posledice, prema modifikovanoj Leopoldovoj matrici (poglavlje 4.2.3).

Ukoliko se ispostavi da scenario nekog udesa nije uverljiv, odnosno, da je verovatnoća zanemarljivo mala (približno jednaka nuli), procena posledica i rizika po tom scenariju nije potrebna i ne uzima se dalje u razmatranje, kako se sugeriše u [175].

Osim u slučaju ljudskih žrtava, koje se računaju pomoću usvojene stope smrtnosti, te imaju kvantitativnu vrednost, značajnost svih ostalih posledica se izražava kvalitativno.

Pošto se odredi jednoznačna težina ekonomskih i ekoloških posledica, tako što se usvoji maksimalni težinski faktor iz ove grupe posledica, ukupna značajnost svih posledica se utvrđuje pomoću predloženog modifikovanog ANCOLD-ovog pristupa (poglavlje 4.2.4). Opisani model za procenu rizika je prikazan na slici 54. Njime se dobijaju svi potrebni ulazni podaci za analizu rizika.

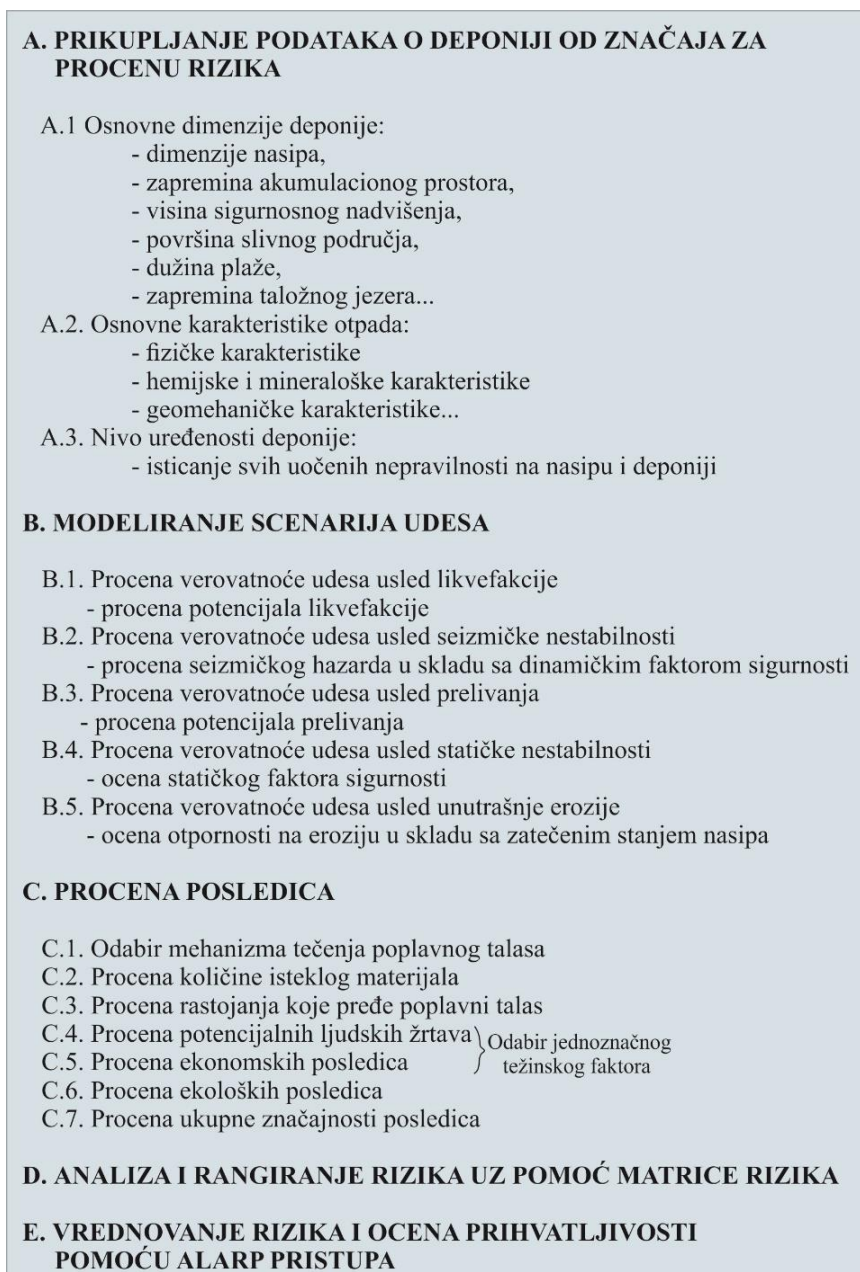
Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla



Slika 54. Model za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

Analiza rizika vrši se pomoću matrice rizika, odnosno, rangiranje nivoa rizika eksploatacije jedne deponije industrijskog otpada mineralnog porekla. Vrednovanje, odnosno, prihvatljivost procenjenog rizika se utvrđuje uz pomoć ALARP pristupa i tzv. “šargarepa” dijagrama.

Hijerarhija koraka prilikom procene rizika eksploatacije deponije industrijskog otpada mineralnog porekla, prema razvijenom modelu prikazana je na slici 55.



Slika 55. Hijerarhija koraka prilikom procene rizika prema razvijenom modelu

6. STUDIJE SLUČAJA

U ovom poglavlju izvršena je procena rizika eksploatacije dve deponije industrijskog otpada mineralnog porekla, koje se nalaze među najvećim deponijama u Srbiji.

Izabrano je flotacijsko jalovište rudnika bakra „Veliki Krivelj“, kao primer inicijalno visoko rizične deponije, koje je prostorno velika i visoka deponija, u dolini uređenog vodotoka, neposredno uz površinski kop, sa nekoliko zabeleženih udesa u eksploataciji, i deponija pepela i šljake termoelektrane „Nikola Tesla B“, kao primer inicijalno nisko rizične deponije, koja je prostorno velika, srednje visoka, dobro organizovana i potpuno uređena, udaljena od velikih vodotokova, industrijskih postrojenja i naselja, bez zabeleženih udesa u eksploataciji.

Procena rizika izvršena je po modelu za procenu rizika koji je razvijen u ovom doktoratu. U oba slučaja izabrana je istovetna matrica rizika, oblika 7x7, kao i ALARP dijagram, kako bi rezultati bili uporedivi.

Parametri rizika (verovatnoća i posledice) su kvalitativno ocenjeni i dodeljeni su im težinski faktori kako bi se lakše odredio rang rizika. Procena rizika je izvršena za svaki scenario udesa pojedinačno.

6.1. Procena rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta “Veliki Krivelj” u Boru

Rudnik bakra „Veliki Krivelj“ od početka eksploatacije 1982. godine, za deponovanje flotacijske jalovine koristi istoimeno flotacijsko jalovište.

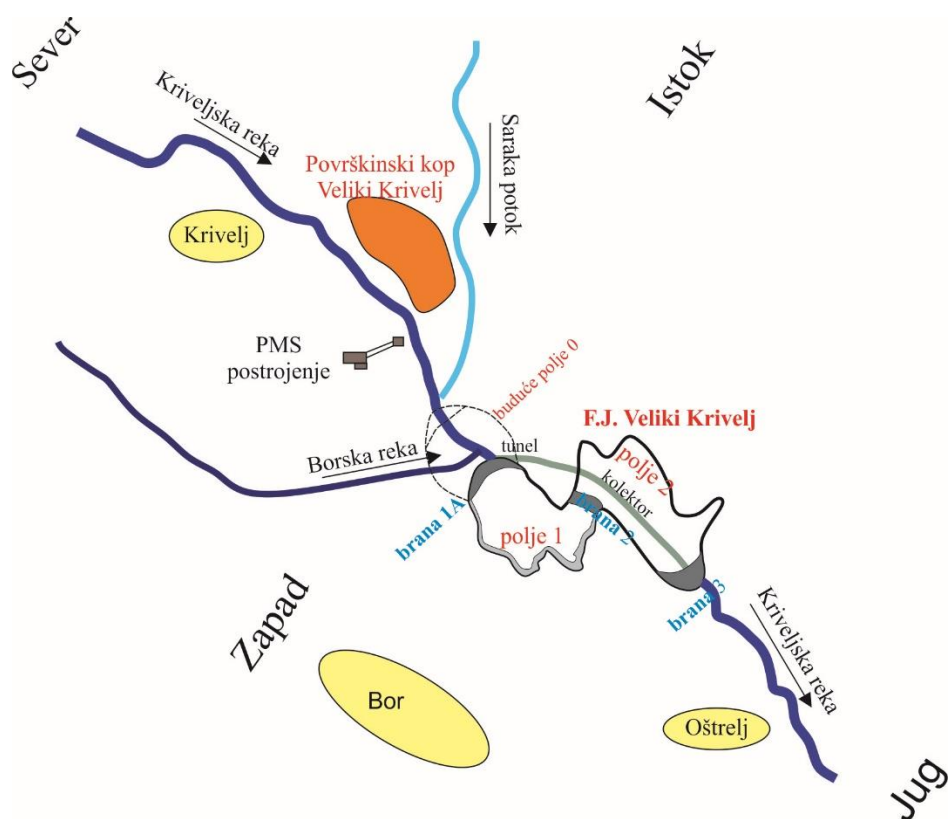
Flotacijsko jalovište „Veliki Krivelj“ je nastalo pregrađivanjem doline Kriveljske reke. Podeljeno je na dva nezavisna polja. Spada u hidraulički tip deponije, gde se jalovina odlaže u obliku hidromešavine, pri odnosu Č:T=25:75.

Glavni objekti jalovišta su: brana 1 (spoljašnja na polju 1), brana 2 (pregradna između polja 1 i 2), brana 3 (spoljašnja na polju 2), drenažni sistemi, sigurnosni prelivni kolektor, sistem za gravitacijski transport pulpe i sistem za povratnu vodu, kolektor i tunel za sprovođenje Kriveljske reke. Izgradnja nasipa vrši se od materijala koji se dobija hidrocikloniranjem jalovine. Nalazi se, vazdušnom linijom, na oko 3 km severoistočno

od Bora i na 4 km od sela Krivelj. Iznad flotacijskog jalovišta nalazi se ležište bakra „Veliki Krivelj” i istoimeni površinski kop.

Kako je trenutno u eksploataciji polje 1, za procenu rizika je odabran njen spoljašnji nasip, tzv. brana 1A.

Skica flotacijskog jalovišta i objekata koji ga okružuju data je na slici 56.



Slika 56. Flotacijsko jalovište „Veliki Krivelj“ sa okolinom

Prosečna površina polja 1 je oko 179 ha, trenutna visina brane 1A je 100 m, a do sada je deponovano oko 137 miliona tona jalovine, koja je zauzela 101 milion m³ zapremine. Trenutna zapremina slobodnog akumulacionog prostora je oko 9,5 miliona m³, dok slobodne vode u taložnom jezeru ima oko 2 miliona m³. Procenjuje se da je u porama deponovane jalovine akumulirano oko 50 miliona m³ vode [246].

Za potrebe procene rizika korišćene su sledeće podloge, elaborati i izveštaji [246, 247, 248, 249, 250, 251, 252]:

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

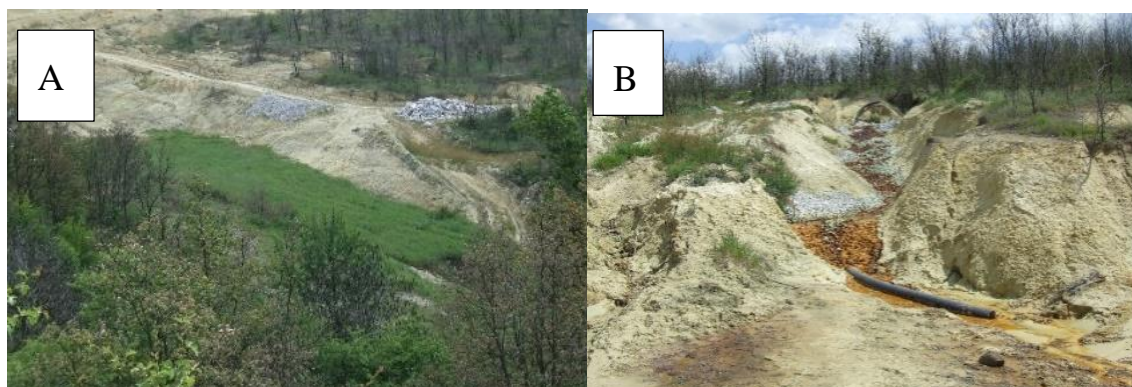
- Tehnički rudarski projekat nadvišenja Polja 1 flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj” do kote 390 mnv;
- Šestomesečni izveštaj o tehničkom osmatranju brana 1A i 2A i polja 1 flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“;
- Studija zaštite eksploatacionih polja „Veliki Krivelj“ i „Cerovo“ i naselja „Veliki Krivelj“ od površinskih voda i obezbeđivanje potrebnih količina tehničke vode za rudnik bakra „Cerovo“;
- Projekat geomehaničkih, inženjersko-geoloških i geoloških istraživanja na jezgrima istražnih bušotina na trasi kolektora u polju „O” u okviru proširenja flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj”;
- Elaborat o geotehničkim uslovima izgradnje pregradne brane u Polju „O” u okviru proširenja flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj”;
- Studija o proceni uticaja na životnu sredinu za sanaciju/izgradnju kolektora „Veliki Krivelj”;
- Analiza stanja životne sredine od šteta nastalih kao posledica prethodnog rada Rudarsko-topioničarskog basena (RTB) Bor.

Nivo održavanosti deponije

Na osnovu izveštaja o tehničkom osmatranju deponije mogu se izdvojiti neregularnosti [247, 246]:

1. Na brani 1 radi ukupno 10 baterija hidrociklona. Uočeno je da pojedine baterije daju manji sadržaj čvrstog od potrebnog (25%) u pesku hidrociklona. Krupnoća hidrocikloniranog materijala nije uvek zadovoljavajuća. Ova anomalija, ukoliko se ne predupredi na vreme, može vremenom dovesti do nestabilnosti nasipa.
2. Na brani 1A postoje dva drenažna sistema i uočeno je da donji drenažni sistem loše funkcioniše, dok je gornji drenažni sistem van funkcije i praktično je nemoguće obnoviti ga. To uzrokuje podizanje linije provirnih voda.
3. Utvrđeno je da postoji prodiranje vode na uzvodnoj kosini brane 1A na više mesta. Primetno je da voda vlaži uzvodnu kosinu po približno istoj koti. Usled toga, primetna je bujna vegetacija u vlažnoj zoni, slika 57.a. Na brani su takođe uočene i erodovane površine sa kanalima do 10 m, duboke više metara i dugačke i do 100 m.

Voda koja prodire za sobom ostavlja vododerine, a primetan je i sadržaj peska iznet iz tela brane na pojedinim mestima, slika 57.b.



Slika 57. Specifične pojave na spoljašnjoj kosini brane 1: (A) bujna trava u vlažnoj zoni, (B) jaruga nastala tečenjem vode koja izbija usled nefunkcionisanja drenaže

4. Usled kvara drenažne pumpe, uočeno je i prelivanje iz postojećih drenažnih šahti.
5. Dovodni kanal za gravitacijski transport pulpe od flotacije nije svuda u zadovoljavajućem stanju, slika 58.



Slika 58. Oštećeni deo kanala za gravitacijski transport pulpe

6. Tunel kojim se Kriveljska reka sprovodi bočno od polja 1 je saniran i u relativno dobrom je stanju. U nastavku tunela, direktno kroz polje 2, reka se sprovodi kroz kolektor koji je više puta saniran, ali je i dalje u lošem stanju i predstavlja najslabiju tačku u okruženju jalovišta. Ako bi došlo do ozbiljnijeg udesa na kolektoru efekti bi se videli i u potapanju tunela i retenzionog prostora uzvodno od tunela. Ovo ne bi

imalo direktne posledice na funkcionisanje polja 1, ali bi ugrozilo rad površinskog kopa i dovelo do prekida u radu, čime bi posredno i polje 1 bilo ugroženo.

7. U taložnom jezeru polja 1 generalno postoji višak vode koji ugrožava stabilnost brane 1, povećavajući nivo provirne vode. Ta anomalija se pripisuje lošem funkcionisanju drenažnog sistema i čestim kvarovima pumpnog sistema.

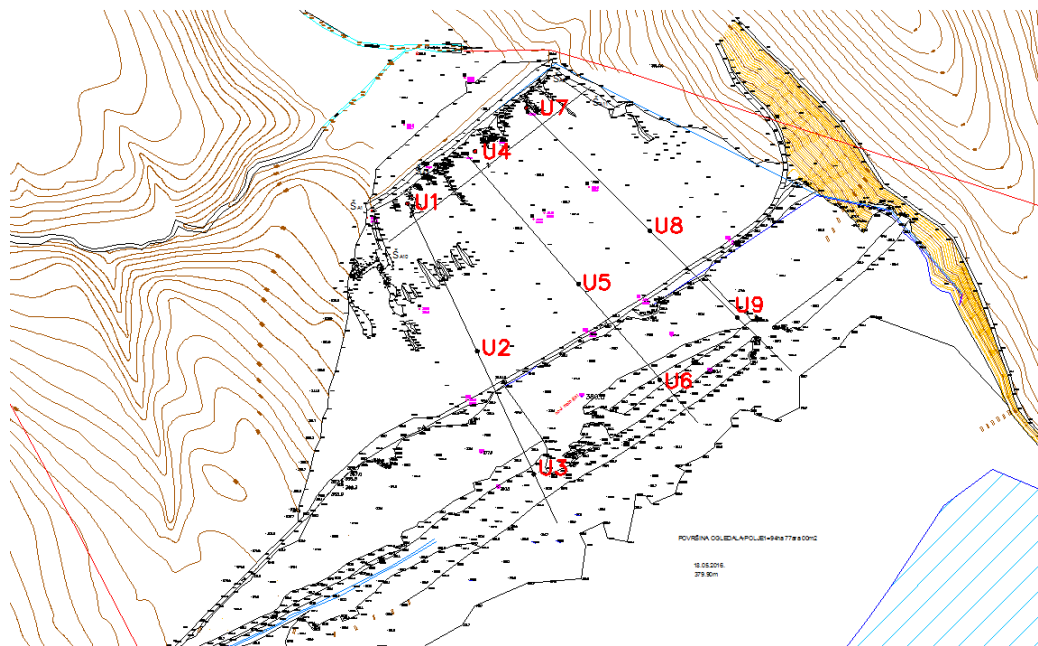
S obzirom na nivo održavanosti deponije i mnogo uočenih neregularnosti, u ovoj studiji se zauzeo stav da nijedan scenario udesa nema zanemarljivo malu verovatnoću (težinski faktor 1), zbog mogućeg superponiranja događaja.

6.1.1. Scenario udesa

6.1.1.1. Udes usled likvefakcije

Kako model za procenu rizika nalaže, prvo se razmatra potencijal likvefakcije.

U okviru Tehničko rudarskog projekta nadvišenja polja 1, u Institutu za rudarstvo i metalurgiju Bor izvršena je analiza 9 bušotina iz brane 1A. Uzorci iz određenih bušotina su podeljeni prema dubini uzorkovanja, a u svrhu skrininga potencijala likvefakcije, razmatrani su samo oni do dubine od 15 m, s obzirom na najveću podložnost likvefakciji. Lokacija ovih uzoraka prikazana je na slici 59.



Slika 59. Raspored uzoraka iz brane 1A

Raspoloživi podaci prikazani su u tabeli 42. Prema karti seizmičkog hazarda u Srbiji za povratni period od 475 godina i 975 godina region pripada makroseizmičkom intenzitetu VII stepena, odnosno VIII stepena [162]. Takođe, na jalovištu nije zabeležen slučaj likvefakcije do sad.

Tabela 42. Analizirani parametri na uzorcima iz brane 1A [246]

Nivo podzemnih voda	15,5-34,7 m
S_r	49,34-103%
C_u	9,3 (min)
d₅₀	0,07-0,125
Učešće glinovitih čestica	<10%
I_p	5,60-8,95%

Uzorci koje je laboratorija dobijala mogli su se malim prstom bušiti, što govori da su potpuno zasićeni vodom i poremećeni [246]. Iako nije dostupna tačna vrednost indeksa relativne zbijenosti, lako se može zaključiti na osnovu ovih zapažanja da je ona manja od 75%.

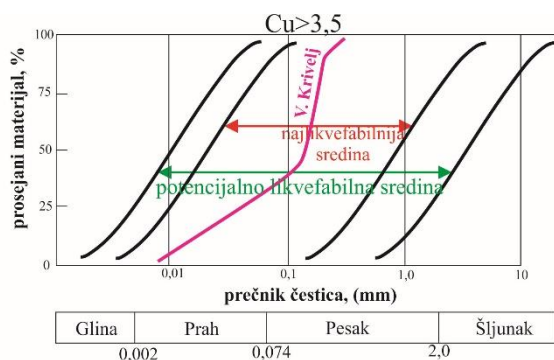
Šire područje u okolini jalovišta je sačinjeno od stena skoro svih geoloških doba i perioda - paleozoika, mezozoika i kenozoika. Jalovište je stacionirano na stenskom masivu iz epohe gornje krede [250]. Dakle, može se smatrati da teren jalovišta nije iz holocenskog doba.

Deset kriterijumskih parametara za utvrđivanje potencijala likvefakcije je dostupno, a 7/10 ukazuje na pozitivan potencijal, slika 60 (levo). Pored ček-liste primenjen je i „Japanski kriterijum” na bazi podataka o Heznovom stepenu neravnomernosti i granulometrijskog sastava. Sa slike 60 (desno), jasno se može videti da kriva proseva materijala brane 1A pripada najlikvefabilnijoj sredini.

Usled pozitivnog potencijala likvefakcije, a shodno uočenim filtracionim poremećajima u nasipu, lošem funkcionisanju drenažnog sistema i visokom seizmičkom hazardu može se zaključiti da je verovatnoća udesa usled likvefakcije “velika” (težinski faktor 5).

Do likvefakcije može doći ako je:

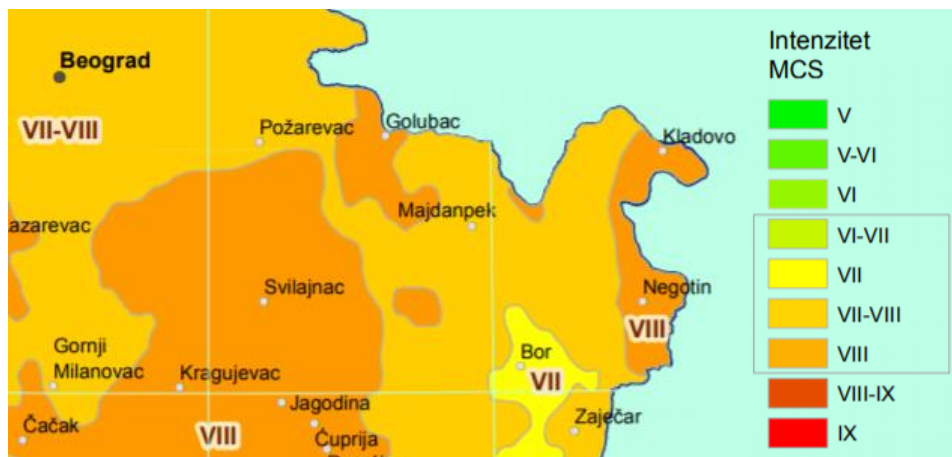
1. Zabeležen slučaj likvefakcije u prošlosti
2. Teren na kom se nalazi deponija je iz holocenskog doba
3. Nivo podzemnih voda <15 m
4. $d_{50}=0,02 \sim 1 \text{ mm}$ ✓
5. Učešće glinovitih čestica <10% ✓
6. $I_p < 75\%$ ✓
7. $IP < 7$ ✓
8. $Cu < 10$ ✓
9. $Sr > 80\%$ ✓
10. Zona seizmičkog hazarda - zemljotres intenziteta ≥ 6 ✓



Slika 60. Skrining potencijala likvefakcije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“: ček-lista (levo), „Japanski kriterijum” (desno)

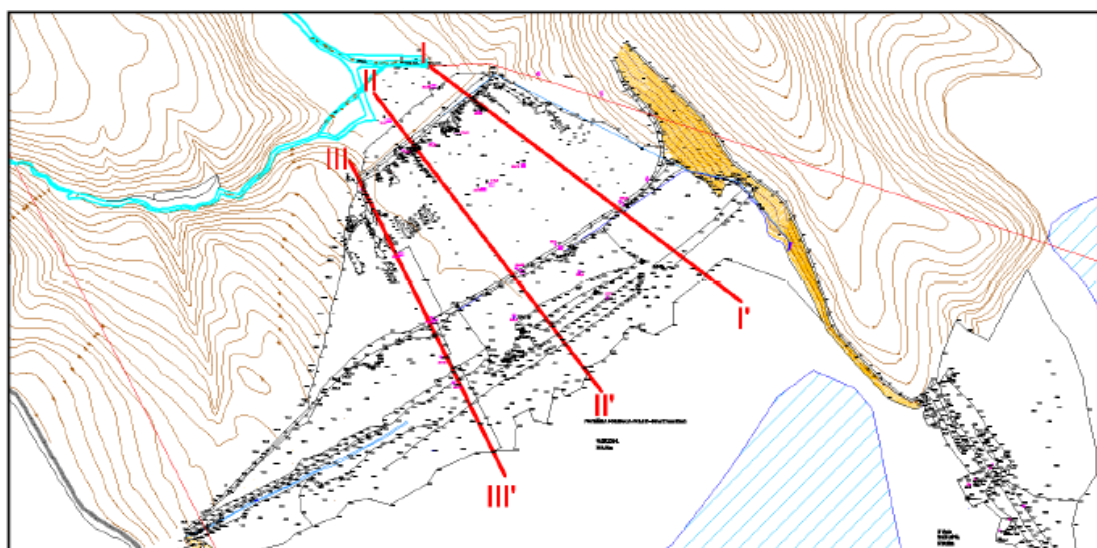
6.1.1.2. Udes po scenariju seizmičke nestabilnosti

Za potrebe procene verovatnoće udesa usled seizmičke nestabilnosti, s obzirom na nivo održavanosti deponije i dosta uočenih neregularnosti, bira se karta seizmičkog hazarda za povratni period od 475 god. Prema ovoj karti, region u kom se nalazi jalovište pripada makroseizmičkom intenzitetu VII stepena [162], slika 61. Zemljotresi ovakvog intenziteta mogu izazvati blage do znatne deformacije na nizvodnim kosinama nasipa i kruni [164].



Slika 61. Seizmički hazard u u regionu flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ za povratni period od 475 godina [162]

Analiza stabilnosti brane 1A za dinamička opterećenja izvršena je na tri profila, prikazanih na slici 62, korišćenjem metode Janbua.



Slika 62. Polje 1 flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ sa profilima na kojima je urađen proračun stabilnosti za statička i dinamička opterećenja [246]

Rezultati su prikazani u tabeli 43 i 44.

Tabela 43. Rezultati proračuna stabilnosti generalne kosine – dinamička opterećenja [246]

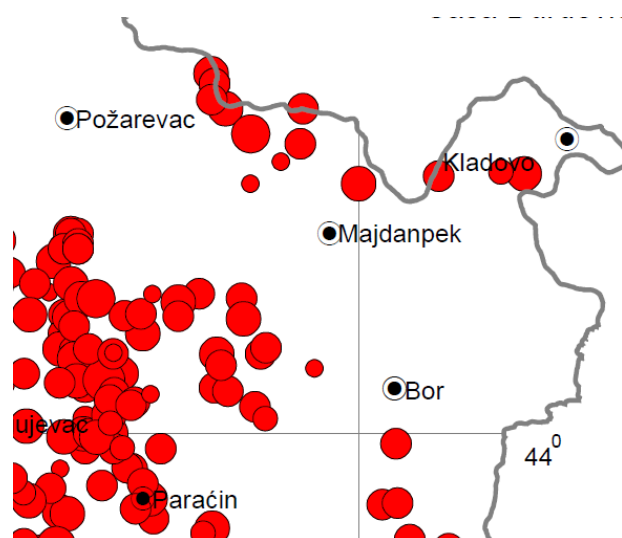
Profil	Fs	Dozvoljeni Fs prema lokalnom standardu SRPS U.C5.020
1-1'	1,491	>1,0
2-2'	1,540	
3-3'	1,625	

Tabela 44. Rezultati proračuna stabilnosti parcijalne kosine – dinamička opterećenja [246]

Profil	Fs	Dozvoljeni Fs prema lokalnom standardu SRPS U.C5.020
1-1'	1,092	>1,0
2-2'	0,895	
3-3'	1,382	

Poređenjem dobijenih rezultata sa dozvoljenim minimalnim vrednostima, može se zaključiti da su koeficijenti stabilnosti za generalne kosine u okviru propisanih vrednosti, tabela 43, dok za parcijalne kosine po profilu 2-2', tabela 44, nisu, te se može zaključiti da postoje zone u nasipu koje bi u slučaju zemljotresa bile nestabilne.

S obzirom da u ovom regionu više od poslednjih 500 godina nije bio epicentar nekog zemljotresa, slika 63, verovatnoća udesa po scenariju seizmičke nestabilnosti se može oceniti kao „srednja“ (težinski faktor 4).



Slika 63. Epicentri najvećih zemljotresa u okolini flotacijskoj jalovišta „Veliki Krivelj“ u periodu od 1456-2012. god. [253]

6.1.1.3. Udes po scenariju prelivanja

Sigurnosno nadvišenje polja 1 iznosi 5 m, te projektovani retenzioni prostor polja 1 ima zapreminu za prihvatanje ekstremnih padavina i vode sa slivnog područja od oko 7,2 miliona m³. Površina sliva polja 1 iznosi 356 ha [246].

Za različite verovatnoće pojave, numeričke vrednosti maksimalnih dnevnih padavina na hidrološkim stanicama koje se nalaze u okruženju jalovišta i na približno jednakoj nadmorskoj visini kao i jalovište prikazane su u tabeli 45.

Tabela 45. Maksimalne dnevne padavine za različite verovatnoće pojave [248]

Hidrološka stanica	Nadmorska visina, mmm	Maksimalna dnevna količina padavina, mm, za različite verovatnoće pojave		
		0.01%	0.1%	1%
Brestovača banja	350	265.5	175.6	112.3
Jošanica	360	262.3	181.6	120.2
Podgorac	370	156.0	119.3	87.4
Vlaole	400	189.7	142.7	103.5

Ako se uzme najveća maksimalna količina padavina iz tabele 45, koja iznosi 265,5 mm sa verovatnoćom pojavljivanja od 0,01%, prema formuli za zapreminu pale vode (formula 1) dobiće se:

$$V = P \cdot F = 3.560.000 \cdot 0,2655 = 945.180 \text{ m}^3$$

Kada se ova količina padavina uporedi sa zapreminom raspoloživog retenzionog prostora od 7,2 miliona m³, može se zaključiti da jalovište ima kapacitet da prihvati i do sedam puta veće količine, i i te kako postoji dovoljan prostor da primi sve padavine sa slivnog prostora, sve i da drenažni sistem i sistem za evakuaciju slobodne vode sa jalovišta nisu u funkciji.

Generalno, Bor i okolina spadaju u područja gde su pljuskovite padavine sa izlivom velikih količina vode retke, što je posledica zavetrenosti područja [254]. Dakle, verovatnoća havarije po hidrološkom scenariju je „veoma mala” (težinski faktor 2).

6.1.1.4. Udes po scenariju statičke nestabilnosti

Analiza stabilnosti brane 1A za statička opterećenja izvršena je na istim profilima kao i u slučaju dinamičkih opterećenja, korišćenjem metode Janbua. Poređenjem dobijenih rezultata sa dozvoljenim minimalnim vrednostima, može se zaključiti da su koeficijenti stabilnosti za generalne kosine u okviru propisanih vrednosti, tabela 46, dok za parcijalne kosine po profilima 1-1' i 2-2', tabela 47, nisu. Stoga će se upravo te vrednosti iskoristiti za procenu godišnje verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti kosina.

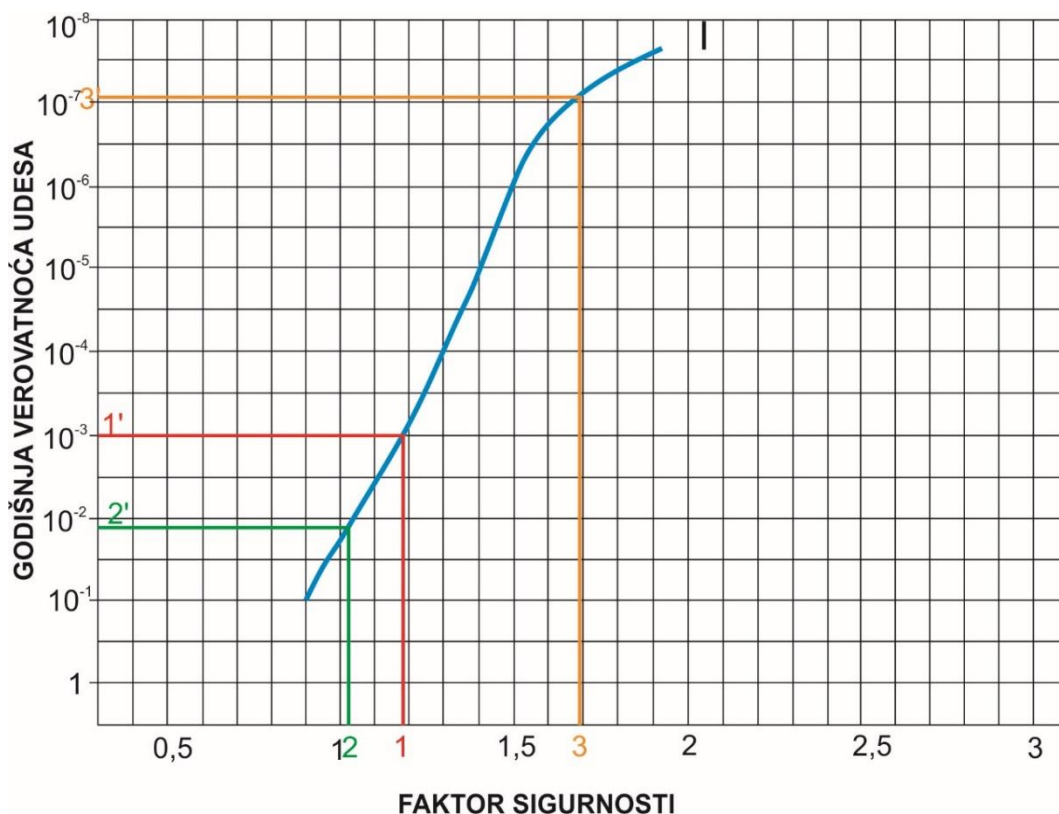
Tabela 46. Rezultati proračuna stabilnosti generalne kosine – statička opterećenja [246]

Profil	Fs	Dozvoljeni Fs prema lokalnom standardu SRPS U.C5.020
1-1'	1,868	>1,5
2-2'	2,141	
3-3'	1,976	

Tabela 47. Rezultati proračuna stabilnosti parcijalne kosine – statička opterećenja [246]

Profil	Fs	Dozvoljeni Fs prema lokalnom standardu SRPS U.C5.020
1-1'	1,288	>1,5
2-2'	1,176	
3-3'	1,695	

Flotacijsko jalovište „Veliki Krivelj” nesumnjivo pripada kategoriji I po svim kriterijumima predloženih u [118]. Na slici 64 su prikazane usvojene godišnje verovatnoće u zavisnosti od koeficijenta sigurnosti po profilima.



Slika 64. Godišnja verovatnoća prema faktorima sigurnosti za branu 1A prema metodi predloženoj u [118]

Ako se očitane kvantitativne vrednosti verovatnoće prevedu u kvalitativne, dobiće se sledeće vrednosti:

- Profil 1-1' – 10⁻³ = „velika” (težinski faktor 5)

- Profil 2-2' – 10^{-2} = „veoma velika” (težinski faktor 6)
- Profil 3-3' – 10^{-7} = „približno jednaka nuli” (težinski faktor 1)

Radi lakšeg tumačenja, kod profila 2-2' i 3-3' su se uzimale u obzir najbliže cele vrednosti verovatnoća.

Dakle, profil 2-2' je pokazao najveću ranjivost, stoga se kao jednoznačna verovatnoća udesa usled statičke nestabilnosti kosina uzima upravo verovatnoća usvojena po ovom profilu, a to je „veoma velika” (težinski faktor 6).

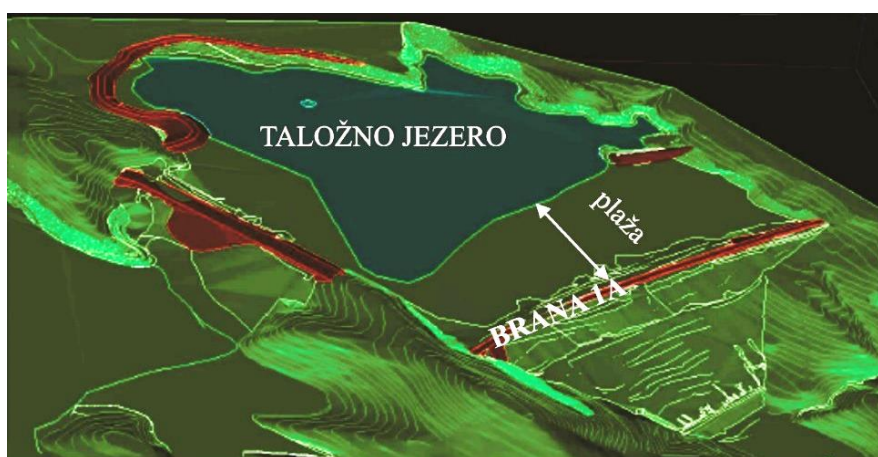
6.1.1.5. Udes po scenariju unutrašnje erozije

Na osnovu vrednosti indeksa plastičnosti materijala brane 1A, utvrđena je kategorija otpornosti na eroziju prema [173]. Materijal od kog je izgrađena brana varira od druge do treće kategorije, odnosno, od srednje do male otpornosti na eroziju.

Takođe, na osnovu nivoa održavanosti deponije, koje nesumnjivo ukazuje na pojavu erozije, što je direktna posledica nefunkcionisanja drenažnog sistema, može se zaključiti da udes po scenariju unutrašnje erozije ima „veliku” verovatnoću (težinski faktor 5).

6.1.2. Procena posledica

Pre same procene posledica potrebno je konstatovati da je taložno jezero udaljeno do brane 1A (oko 200 m), slika 65, te se može zaključiti da ne može doći do formiranja likvefikovanog toka materijala usled likvefakcije. Posledice, osim ljudskih žrtava, se razmatraju jednoznačno za sve scenarije udesa.



Slika 65. Udaljenost taložnog jezera od brane 1A

6.1.2.1. Procena količine isteklog materijala

Procena istekle količine hidromešavine usled proboja brane 1A, a prema principu „faznog isticanja” data je u tabeli 48.

Tabela 48. Procena istekle količine materijala iz flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj”

FAZA	Istekla slobodna voda, m ³ (V _{istekla_voda})	Istekla hidromešavina, m ³ (V _{istekla_hidromešavina})	
1.	$\frac{1}{5} \cdot V_v = 400.000$	0	
2.	$\frac{1}{5} \cdot V_v = 400.000$	$V_{istekla_voda} \cdot 10\%$ = 40.000	
3.	$\frac{1}{5} \cdot V_v = 400.000$	$V_{istekla_voda} \cdot 20\%$ = 80.000	
4.	$\frac{1}{5} \cdot V_v = 400.000$	$V_{istekla_voda} \cdot 40\%$ = 160.000	
5.	$\frac{1}{5} \cdot V_v = 400.000$	$V_{istekla_voda} \cdot 60\%$ = 240.000	
Σ	2.000.000	+ 520.000	=2.520.000

Dakle, 2.000.000 m³ slobodne vode u taložnom jezeru bi pokrenulo još 520.000 m³ hidromešavine iz deponije, što sumarno daje 2.520.000 m³ isteklog materijala i čini 2,5% od ukupno odloženih količina.

6.1.2.2. Procena rastojanja

Za potrebe procene rastojanja isteklog materijala urađen je profil terena ispred brane 1A koji se približno nadovezuje na njen profil 2-2', a koji je pokazao najmanji faktor sigurnosti na statička opterećenja, slika 66. Kao što se može videti sa slike, taj profil preseca korito Kriveljske reke, neposredno pre njenog uticanja u kolektor. Kriveljska reka spada u planinske reke, širine dna korita 4 m i često u letnjem periodu presuši. Kako je u [223] sugerisano, za potrebe prognoziranja rastojanja korišćen je Autocad softver, u kom je nacrtan profil okolnog terena i izmereno rastojanje talasa, a na osnovu prethodno procenjene količine isteklog materijala. Shodno preporuci, početna kota poplavnog talasa je poistovećena sa krunom brane 1A. Profil je potom precrtan u CorelDRAW-u, radi bolje vidljivosti. Za aproksimaciju finalne visine isteklog materijala, korišćena je vrednost čvrstoće na smicanje koja je određena za potrebe analize stabilnosti.

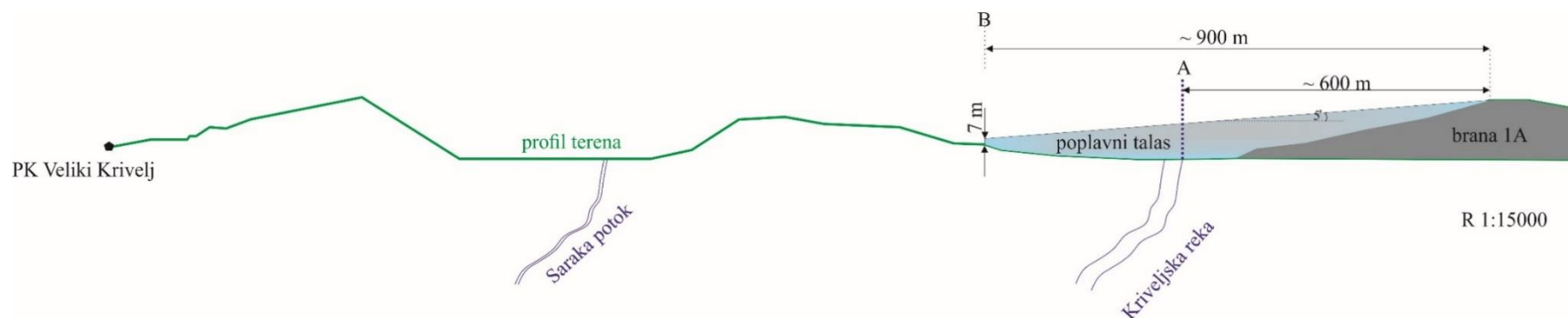
Ako se uzme u obzir minimalna čvrstoća od 35 kPa (35 kN/m²), koja je najpribližnija čvrstoći materijala nakon proboja brane, i specifična gustina materijala brane 1A od 20 kN/m³ [246], finalna visina isteklog materijala se može izračunati prema formuli 10:

$$H_f = \frac{4 \cdot 35 \text{ kN/m}^2}{22 \text{ kN/m}^3} = 7 \text{ m}$$

Na osnovu prethodno procenjene količine isteklog materijala od 2,5 Mm³, za formiranje poplavnog talasa te zapremine, finalne visine od 7 m, nagiba 5°, širine talasa 65 m, dobija se rastojanje od oko 900 m. Ovako formiran poplavni talas je širine koja je u okviru opsega navedenih od strane više autora [255, 256] .

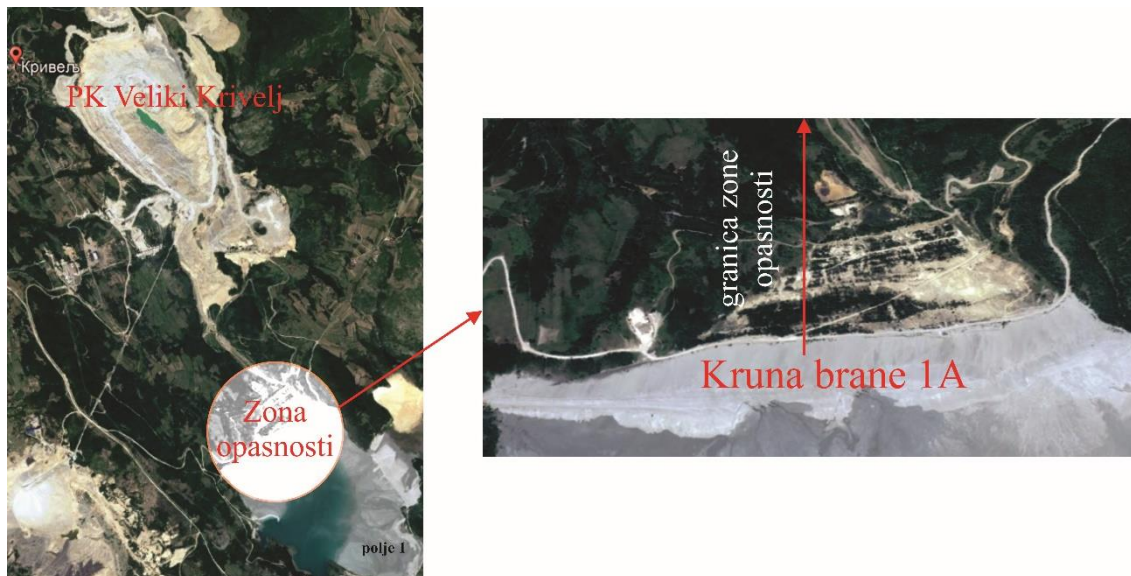
Međutim, može se desiti da Kriveljska reka prihvati talas, ukoliko se ne radi o letnjem periodu kada obično presuši, pa onog momenta kada stigne do nje on nastavlja njenim tokom. Rastojanje se do te tačke procenjuje na 600 m. Talas nakon toga poprima sve karakteristike reke, model jednodimenzionalnog tečenja.

Za potrebe ove disertacije, usvaja se veće rastojanje od 900 m.



Slika 66. Rastojanje koje pređe poplavni talas u slučaju udesa na flotacijskom jalovištu „Veliki Krivelj”: do Kriveljske reke (A), kad istekne kompletna procenjena količina materijala (B)

„Zona opasnosti“ je u opsegu od 500 m¹³ do 10 km¹⁴ u radijusu, te se može zaključiti da je prethodno procenjeno rastojanje u okviru predloženog opsega zone, bliže donjoj granici, slika 67.



Slika 67. Zona opasnosti u slučaju flotacijskog jalovišta Veliki Krivelj

6.1.2.3. Broj ljudskih žrtava

U okviru zone opasnosti nema stalno nastanjenog stanovništva. Jedino ugroženo ljudstvo je ono koje obuhvata zaposlene na samoj deponiji i koji rade na njoj izgradnji i održavanju. Među zaposlenima na jalovištu se ubrajaju rukovodilac, poslovođa, smenski nadzornik, smenski brigadir, pumpari i radnici [246]. Po jednoj smeni, maksimalno 10 radnika može u isto vreme biti prisutno na brani 1A.

Kako je predloženo u [228], kod udesa sa trenutnim efektom, poput likvefakcije čija je verovatnoća ocenjena kao velika, ozbiljnost poplave se usvaja kao velika.

Kod udesa usled seizmičke nestabilnosti kosina, u zavisnosti od toga da li se radi o trenutnom ili odloženom rušenju, ozbiljnost može varirati od male do velike, te se usvaja srednja vrednost. Kod ostalih scenarija udesa, ozbiljnost se ocenjuje kao mala.

¹³ „uzvodno od bilo koje tačke krune nasipa, do rastojanja od 5 x H od nožice nasipa (pri čemu je H ukupna planirana visina nasipa), s tim što je ovo rastojanje manje od 5 km...“ [57]

¹⁴ „nizvodno od najniže tačke krune nasipa, rastojanje veće od 100 x H...“ [57]

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

Vreme upozorenja se u slučaju udesa usled likvefakcije usvaja kao „bez upozorenja”, dok kod udesa usled seizmičke nestabilnosti to vreme može iznositi od 15 min, pa do 2 h, u zavisnosti od efekta rušenja. Kao srednja vrednost usvaja se od 15-60 min, dok se kod ostalih udesa to vreme usvaja da je preko 60 min. Razumevanje ozbiljnosti poplave je potpuno, s obzirom da su ugroženi ljudi kojima je u opisu posla da budu upoznati sa rizicima eksploatacije deponije, i to po svakom scenariju udesa, osim u slučaju likvefakcije, kada ovaj parametar nije primenljiv.

Na osnovu usvojenih parametara, u slučaju udesa usled likvefakcije dobijaju se sledeće stope smrtnosti [228]:

Ozbiljnost poplave	Vreme upozorenja (min)	Razumevanje ozbiljnosti poplave	Stopa smrtnosti	
			Prosečna	Opseg
Velika	Bez upozorenja	Nije primenljivo	0,75	0,3-1,00

Ako je broj ugroženih ljudi 10, a prosečna stopa smrtnosti 0,75, u slučaju udesa usled likvefakcije bilo bi do 8 žrtava, u proseku.

Na osnovu usvojenih parametara, u slučaju udesa usled seizmičke nestabilnosti kosina, dobijaju se sledeće stope smrtnosti [228]:

Ozbiljnost poplave	Vreme upozorenja (min)	Razumevanje ozbiljnosti poplave	Stopa smrtnosti	
			Prosečna	Opseg
Srednja	15-60	Potpuno	0,02	0,005-0,04

Ako je broj ugroženih ljudi 10, a prosečna stopa smrtnosti 0,02, prilikom udesa usled seizmičke nestabilnosti kosina bilo bi <1 žrtve.

U slučaju udesa po ostalim scenarijima, dobijaju se sledeće stope smrtnosti [228]:

Ozbiljnost poplave	Vreme upozorenja (min)	Razumevanje ozbiljnosti poplave	Stopa smrtnosti	
			Prosečna	Opseg
Mala	>60 min	Potpuno	0,0002	0-0,0004

Ako je broj ugroženih ljudi 10, a prosečna stopa smrtnosti 0,0002, prilikom udesa usled preliivanja, statičke nestabilnosti kosina i unutrašnje erozije bilo bi <1 žrtve.

Procena ekonomskih posledica

Prilikom izlivanja materijala iz polja 1, na osnovu prethodnih razmatranja vezanih za količinu materijala i rastojanje koje pređe, može se zaključiti da postoji pretnja da poplavni talas blokira ulaz Kriveljske reke u tunel, ili da dođe do zagušenja tunela i/ili kolektora. U ovome slučaju Površinski kop „Veliki Krivelj“ bi bio posebno ugrožen jer bi kontinuirano bio plavljen vodom iz reke. Ovo ne bi imalo velike posledice po mehanizaciju, ali bi se moglo reći da bi izazvalo poteškoće u radu kopa, što bi indirektno prouzrokovalo izvesne troškove po RTB Bor.

Troškovi sanacije nasipa jalovišta, lokalnog puta koji služi za transport mehanizacije, tunela i kolektora, usled eventualnog oštećenja, kao i čišćenja okolnog terena, su neminovni. Iako je teško utvrditi tačan novčanih iznos ovih troškova, moglo bi se grubom procenom odrediti da bi šteta bila u opsegu od 1-3% budžeta Srbije¹⁵, što posledice po privredu svrstava u „minimalne“, definisanih prema „Uputstvu o metodologiji za izradu procene ugroženosti od elementarnih nepogoda i drugih nesreća i planova zaštite i spasavanja u vanrednim situacijama“ [240].

U okviru definisane zone opasnosti nema bilo kakvih građevinskih objekata javnog i društvenog značaja i objekata kritične infrastrukture.

Sveukupne ekonomske posledice su pre svega, lokalnog karaktera, te se njihova značajnost vrednuje kao „veoma mala“ (težinski faktor 2).

¹⁵ Usvojeni budžet Republike Srbije za 2018. godinu iznosi 58.604.400.000 dinara [263].

6.1.2.4. Ekološke posledice

Potencijalno zagađenje vazduha usled izlivanja hidromešavine u najvećoj meri je u funkciji dispergovanja sitnih frakcija otpada sa suvih, skorelih površina i distribucije pod uticajem vetra. Trenutnih efekata tek izlivena hidromešavine ne bi bilo, međutim, nakon izvesnog vremena, kada izlivena masa počinje da se suši, sasvim je izvesno da bi u određenim uslovima sitne frakcije mogle biti nošene na veće udaljenosti od mesta izlivanja. Efekti ovoga zagađenja su ograničeni.

Ugroženi stalni vodotok je Kriveljska reka. Ako bi došlo do oštećenja njenog tunela i kolektora prilikom udesa na flotacijskom jalovištu, šteta po vode bi mogla biti značajna jer je voda najveći transportni medijum i svi lokalni efekti bi postali i regionalni. Procenjeno je prilikom ranijih istraživanja da bi koncentracija zagađenja flotacijskom jalovinom u Kriveljskoj reci na početku proboja iznosila 64,62% [257]. Ova reka nije kategorisana, ali se u praksi uzima da kvalitet vode treba da odgovara najmanje kvalitetu voda III klase. Rezultati hemijskih analiza uzoraka vode iz Kriveljske reke ukazuju na njenu istorijsku zagađenost [251]. Ona pripada crnomorskom slivu i indirektno utiče na reku Dunav. Međutim, ako se uzme u obzir negativan višedecenijski efekat rudarenja u ovom okrugu, i da Saraka potok koji ima skoro isti kvalitet kao rudničke kisele vode i koji je trajno zagađen, a koji se uliva u Kriveljsku reku, već pričinjena šteta vodnom ekosistemu ovog okruga bi samo bila nešto uvećana [258].

S obzirom da jalovište nije hidroizolovano, moguća je direktna komunikacija procednih voda sa podzemnim vodama i bez razmatranja izlivanja hidromešavine. U terenu duž toka Kriveljske reke može biti slobodne podzemne vode. U pitanju su izdani zbijenog ili razbijenog tipa. U višim delovima terena praktično nema slobodne podzemne vode, s obzirom da se radi vodonepropusnim i bezvodnim sredinama [248]. Kvalitet podzemne vode je u direktnoj vezi sa kvalitetom površinske vode.

Generalno, kvalitet zemljišta na ovom području je nizak i prouzrokovan je aerozagađenjem iz borskih postrojenja za pripremu rude, kao i emisijom prašine sa kopa, odlagališta otkrivke i flotacijskih jalovišta, koja pretežno zahvataju njegov površinski sloj [251]. Poljoprivredne površine koje sa južne strane okružuju jalovište predstavljaju oštećene smonice čije korišćenje je moguće tek posle primene meliorativnih mera [259].

Pejzaž okolnog terena je svakako oportunitetni trošak višedecenijskog rudarenja na ovom prostoru.

Najmarkantniji reljefni oblici u blizini jalovišta su blago zaobljeni vrhovi sa strmim padinama. Vegetacija u blizini je slabo razvijena, izuzev u dolini Kriveljske reke. Ostali deo terena je slabo pošumljen retkim žbunastim rastinjem i još ređom hrastovom i bukovom šumom [249]. Prisutna vegetacija na ruti talasa je u velikoj meri već uklonjena prilikom pripreme terena za potrebe proširenja jalovišta u budućem periodu.

Na datoj lokaciji nema specijalnih rezervata prirode, niti stalnih prirodnih staništa nekih većih životinjskih vrsta.

S obzirom da je za analizu rizika izabrana matrica 7x7, ekološke posledice su ocenjene na skali od 1-7, tabela 49. Ako se jednoznačna težina posledica poistoveti sa maksimalnim težinskim faktorom iz Leopoldove matrice, može se zaključiti da su ekološke posledice „male“ (težinski faktor 3).

Tabela 49. Ekološke posledice u slučaju udesa na flotacijskoj jalovištu „Veliki Krivelj“

KOMPONENTE OKRUŽENJA									
Svi udesi	Vazduh		Voda		Zemljište		Prirodni ekološki sistem		
	Kvalitet vazduha	Kvalitet površinskih voda	Kvalitet podzemnih voda	Pejzaž	Kvalitet	Prirodna vegetacija	Prirodno stanište	Specijalni rezervati prirode	
značajnost	2	3	3	1	1	1	1	1	max = 3
Skala:									
7	Katastrofalne posledice								
6	Veoma velike posledice								
5	Velike posledice								
4	Značajne posledice								
3	Male posledice								
2	Veoma male posledice								
1	Zanemarljive posledice								

6.1.2.5. Ukupna značajnost posledica

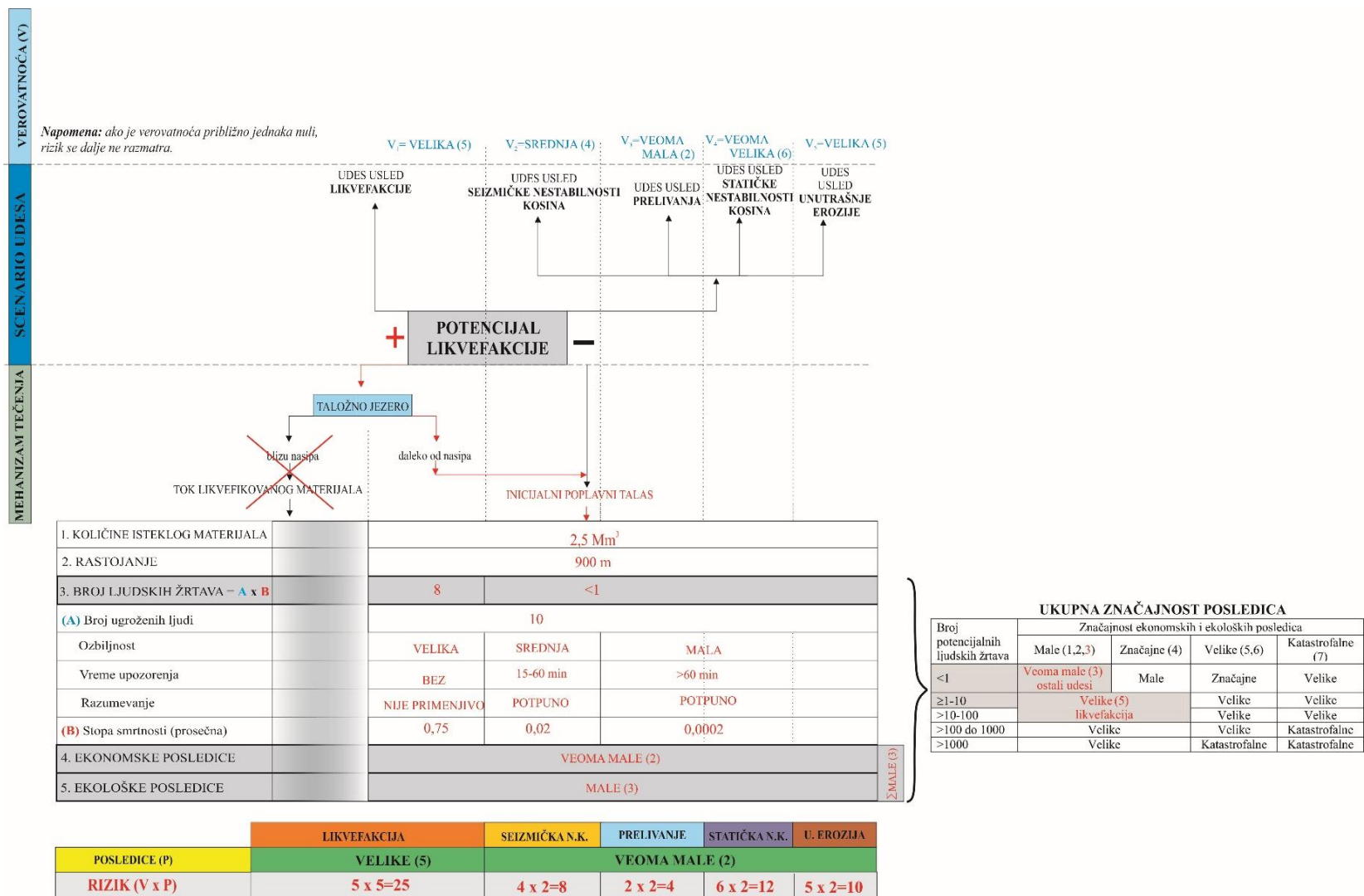
Na osnovu prethodno uvrđene značajnosti pojedinačnih posledica (ekonomske i ekološke zajedno maksimalno „male“ (3), broj ljudskih žrtava u slučaju likvefakcije do 8, ostalih udesa <1), može se zaključiti da ukupna značajnost posledica ide od „veoma malih“ (2) do „velikih“ (4), u zavisnosti od toga da li se radi o udesu usled likvefakcije ili ne, tabela 50.

Tabela 50. Ukupna značajnost posledica u slučaju udesa na flotacijskom jalovištu „Veliki Krivelj“

Broj potencijalnih ljudskih žrtava	Značajnost ekonomskih i ekoloških posledica			
	Male (1,2,3)	Značajne (4)	Velike (5,6)	Katastrofalne (7)
<1	Veoma male (2)	Male	Značajne	Velike
≥1-10	Velike (5)		Velike	Velike
>10-100			Velike	Velike
>100 do 1000	Velike		Velike	Katastrofalne
>1000	Velike		Katastrofalne	Katastrofalne

Kako dosadašnja razmatranja vezana za procenu rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ inkorporirana u razvijeni model za procenu rizika izgledaju, prikazano je na slici 68.

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla



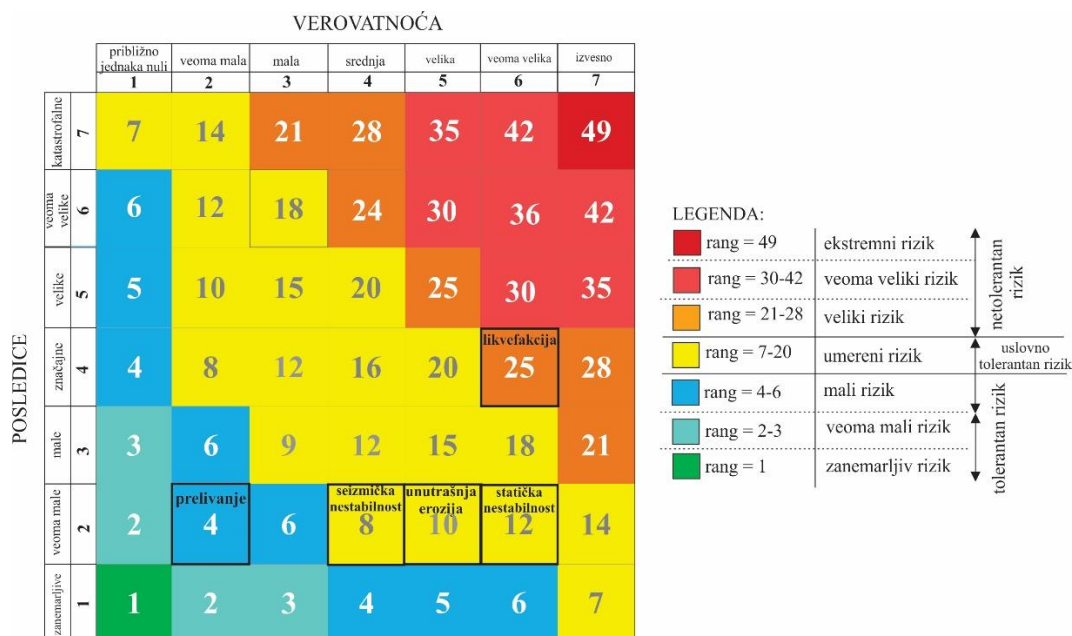
Slika 68. Model rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“

6.1.3. Analiza i vrednovanje rizika

U tabeli 51 data je rekapitulacija usvojenih parametara rizika, na osnovu kojih su analizirani rizici po scenarijima udesa uz pomoć matrice rizika, slika 69.

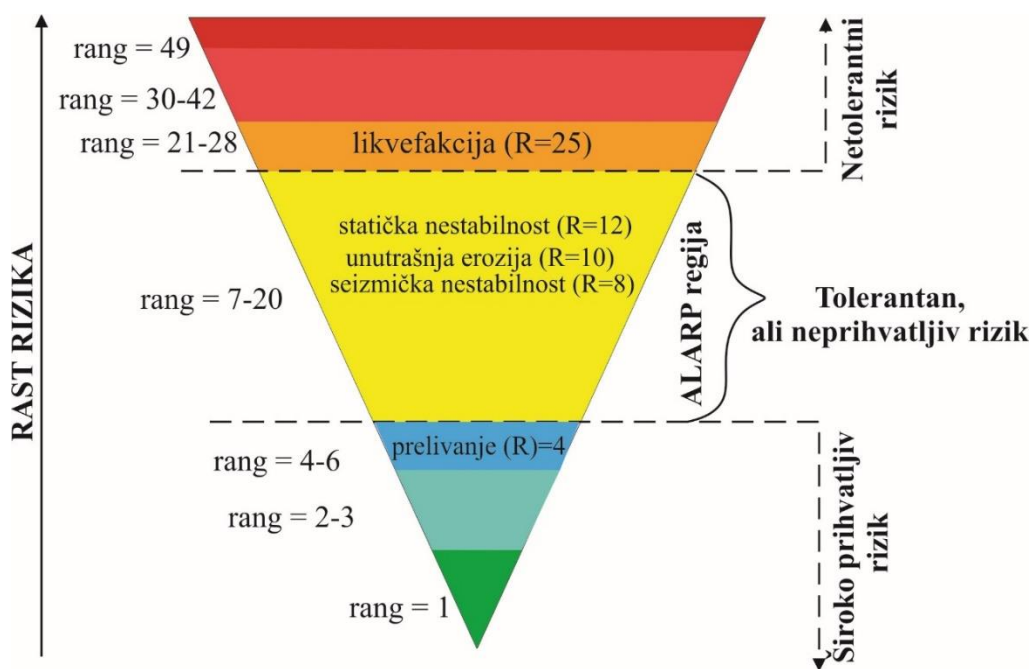
Tabela 51. Rekapitulacija parametara rizika usvojenih u slučaju flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“

Scenario udesa	Verovatnoća (V)	Značajnost posledica			Ukupna značajnost (P)	Rang rizika (V x P)	
		Broj ljudskih žrtava	Ekonomske	Ekološke			
Likvefakcija	Velika (5)	8	Veoma male (2)	Male (3)	Velike (5)	Veliki rizik (25)	
Seizmička nestabilnost	Srednja (4)	<1			Male (3)	Veoma male (2)	Umereni rizik (8)
Prelivanje	Veoma mala (2)						Mali rizik (4)
Statička nestabilnost	Veoma velika (6)						Umereni rizik (12)
Unutrašnja erozija	Velika (5)						Umereni rizik (10)
			Male (3)				



Slika 69. Analiza rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ uz pomoć matrice 7x7

Pošto su rizici svakog scenarija udesa rangirani, izvršeno je njihovo vrednovanje uz pomoć ALARP pristupa. Na osnovu tzv. „šargarepa“ dijagrama može se zaključiti da rizik eksploatacije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ varira od malog rizika, ranga 4 (po scenariju udesa usled prelivanja), koji se nalazi u zoni široko prihvatljivog rizika, preko umerenog rizika, ranga 8, 10 i 12 (po scenariju udesa usled seizmičke nestabilnosti, unutrašnje erozije i statičke nestabilnosti), koji se nalazi u zoni tolerantnog, ali neprihvatljivog rizika, do velikog rizika, ranga 25 (po scenariju udesa usled likvefakcije), koji se nalazi u zoni neprihvatljivog rizika, slika 70.



Slika 70. Vrednovanje rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ uz pomoć ALARP pristupa i „šargarepa“ dijagrama

6.2. Procena rizika eksploatacije deponije pepela i šljake “Nikola Tesla B” u Obrenovcu

U termoelektrani „Nikola Tesla B” sagoreva se ugalj sa površinskih kopova Kolubara i godišnje se izdvoji oko 1,8 miliona tona pepela. Pepeo se zajedno sa šljakom transportuje i odlaže na deponiji termoelektrane „Nikola Tesla B” (TENT B), koja je aktivna od 1983. godine. Ovo je prostorno najveća deponija pepela i šljake u Srbiji. Deponija se nadgrađuje uporedo sa eksploatacijom nastupnom metodom i hidrotehnički je dobro uređena, a eksploatacija se vrši stručno i odgovorno saglasno tehničkoj dokumentaciji.

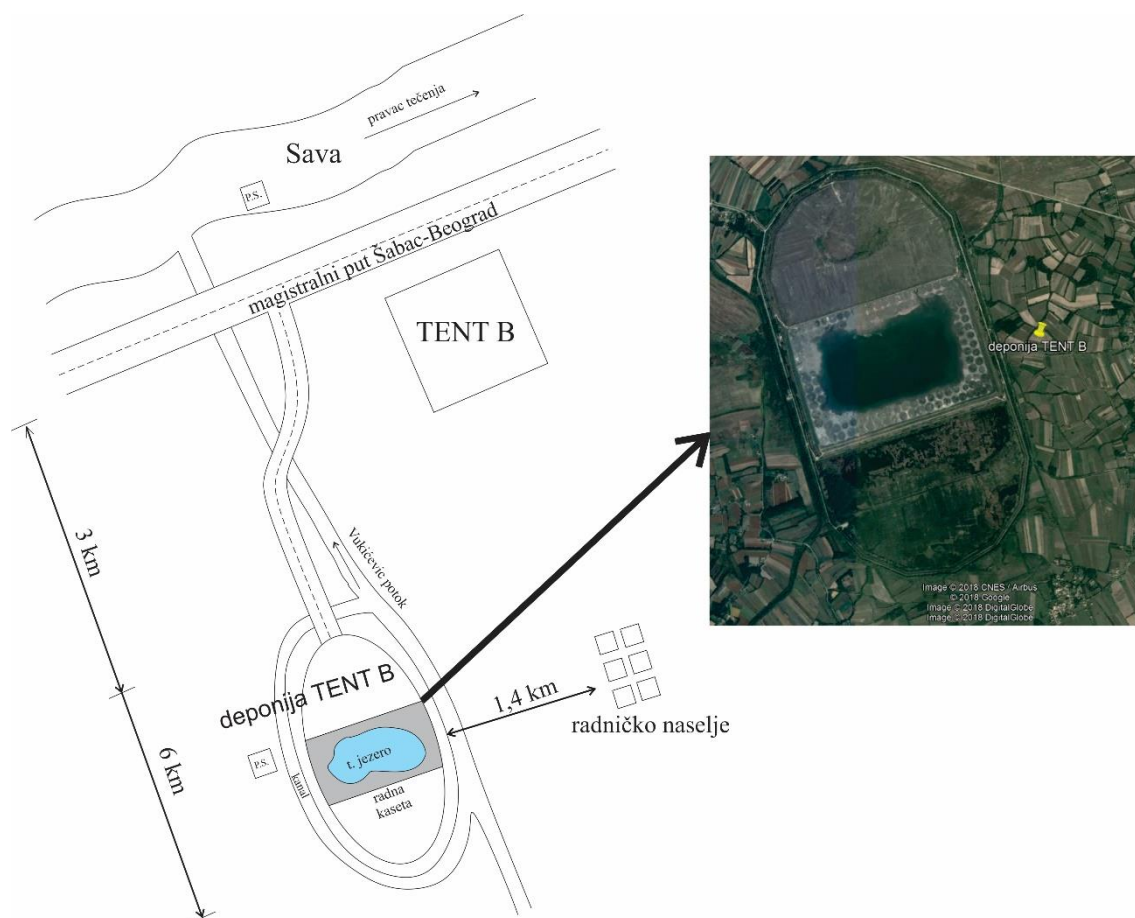
Njena ukupna površina iznosi 600 ha, i sačinjena je iz ukupno tri kasete, pri čemu je do sada pepeo odlagan na dve kasete (kasete 1 i 2) površine 400 ha, a dodatnih 200 hektara (kasete 3) će biti aktivirano nakon izgradnje novih blokova termoelektrane.

Trenutno je aktivna kasete 2, a kasete 1 rekultivisana. Deponija predstavlja klasičnu ravničarsku deponiju, omeđenu obodnim nasipom na kojoj se otpad odlaže u obliku hidromešavine. Do 2010. godine obodni nasipi su građeni od hidrocikliranog pepela i šljake, sa masenim odnosom Č:T=1:10, a od tada se nastavlja sa gustom hidromešavinom, Č:T=1:1. Taložno jezero zauzima oko 60% površine akumulacionog prostora kasete 2 i ima ukupnu zapreminu od oko 4 Mm³.

Deponija je projektovana na 40 godina sa maksimalnom visinom nasipa od 29 m, dok je trenutna visina obodnog nasipa 18,5 m, a širina krune 8 m. Ukupni akumulacioni prostor deponije, uključujući sve tri kasete je zapremine >100 Mm³. Zapremina odloženog otpada unutar aktivne kasete je 2 je oko 35 Mm³. Glavni objekti deponije su obodni nasip, obodni kanal, cevovod, drenažni sistem i prelivni kolektor.

Locirana je na udaljenosti od oko 50 km od Beograda, 5 km jugozapadno od termoelektrane i zauzima delom ili u celini atare mesta Ušće, Dren, Ratari i Grabovac. U neposrednoj blizini deponije nalaze se i radnička naselja koja su, svojevremeno, građena za smeštaj zaposlenih, a koja su sad delimično raseljena. Dakle, neposredno uz deponiju nema naselja. Najveći vodotok u okruženju je reka Sava, udaljena od deponije oko 5 km vazdušnom linijom, a od manjih tu je potok Vukićevica koji protiče uz istočni nasip deponije.

Skica deponije pepela i šljake „TENT B” i objekata koji je okružuju data je na slici 71.



Slika 71. Skica lokacije deponije „TENT B“ sa okolinom

Za potrebe procene rizika korišćene su sledeće podloge [260, 261, 262]:

- Godišnji izveštaj o oskultaciji od jula 2017. do jula 2018. godine;
- Izveštaj o ispitivanju fizičko-mehaničkih karakteristika uzoraka za potrebe godišnjeg izveštaja o oskultaciji deponije pepela i šljake „TENT B“;
- Glavni projekat odlaganja pepela i šljake u vidu guste hidromešavine na postojećoj deponiji pepela i šljake „TENT B“, Ušće;

Nivo održavanosti deponije

Deponija „TENT B“ važi za uređenu, dobro projektovanu i održavanu deponiju. Na osnovu izveštaja o tehničkom osmatranju deponije može se konstatovati da su nasipi u dobrom stanju, bez primetnih pukotina i anomalija. Dužina plaže i visina sigurnosnog nadvišenja je u zakonskim okvirima. Nisu zabeleženi udesi u prošlosti.

6.2.1. Scenario udesa

6.2.1.1. Udes usled likvefakcije

Na deponiji nije zabeležen slučaj likvefakcije do sada. Teren na kom se nalazi pripada periodu kvartara, odnosno epohi holocena. Nivo podzemnih voda je od 1,5-10 m. Srednji prečnik zrna odloženog materijala je 0,05 mm, dok je učešće glinovitih čestica <10%. Takođe, pretpostavlja se da je indeks relativne zbijenosti <75%, a indeks plastičnosti <5%. Heznov stepen neravnomernosti zrna se kreće u opsegu od 5,3-7,5, a za stepen saturacije se pretpostavlja da je <65 %. Udeo čestica < 0,002 mm je maksimalno 4% u ispitivanim uzorcima. Udeo vlage je u opsegu $w=32-42\%$, a za granicu tečenja (LL) se pretpostavlja da je manja od 20% [261, 262].

Prema karti seizmičkog hazarda u Srbiji za povratni period od 95 godina, region u kom se deponija nalazi pripada makroseizmičkom intenzitetu VI-VII stepena [162].

Prema slici 72.a može se zaključiti da 8/10 poznatih kriterijumskih parametara ukazuju da je potencijal likvefakcije pozitivan.

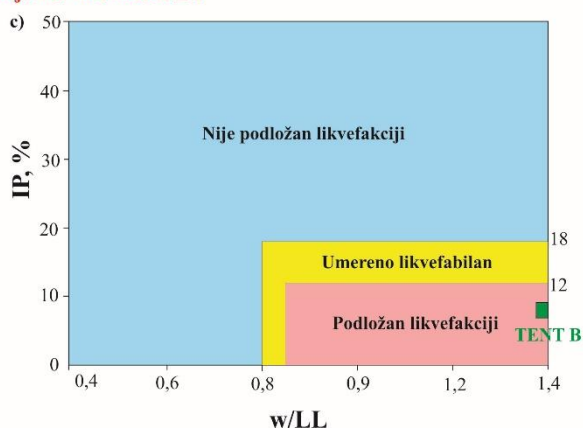
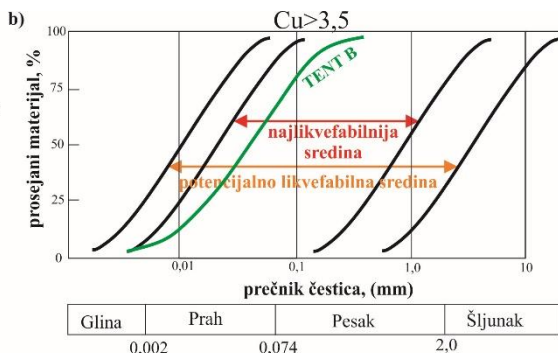
Kao dodatni testovi korišćeni su „Japanski kriterijum“ i test prema [150], slika 72 (b i c), pri čemu su oba potvrdila pozitivan potencijal likvefakcije.

Iako je dokazan pozitivan potencijal, s obzirom na dobru hidrotehničku uređenost deponije, stabilan nivo vode u taložnom jezeru i mali seizmički hazard regiona u kom se deponija nalazi, verovatnoća udesa usled likvefakcije je ocenjena kao „mala“ (težinski faktor 3).

a) Do likvefakcije može doći ako je:

1. Zabeležen slučaj likvefakcije u prošlosti
2. Teren na kom se nalazi deponija je iz holocenskog doba ✓
3. Nivo podzemnih voda <15 m ✓
4. $d_{50}=0,02 \sim 1 \text{ mm}$ ✓
5. Učešće glinovitih čestica <10% ✓
6. $I_p < 75\%$ ✓
7. $IP < 7$ ✓
8. $Cu < 10$ ✓
9. $S_r > 80\%$

10. Zona seizmičkog hazarda - zemljotres intenziteta ≥ 6 ✓

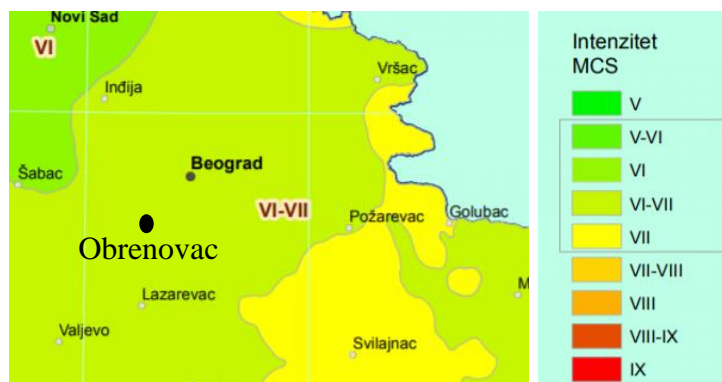


Slika 72. Skrining potencijala likvefakcije deponije pepela i šljake “TENT B”: a) ček-lista, b) test prema [150], c) „Japanski kriterijum“

6.2.1.2. Udes po scenariju seizmičke nestabilnosti

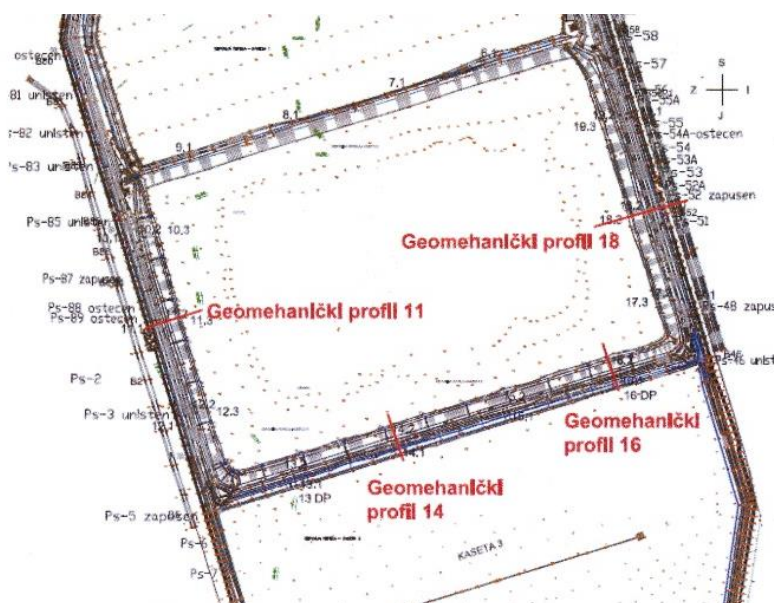
Za potrebe procene verovatnoće udesa usled seizmičke nestabilnosti, s obzirom na uređeno stanje deponije, bira se karta seizmičkog hazarda za povratni period od 95 god. Prema ovoj karti, deponija pripada regionu makroseizmičkog intenziteta VI-VII stepena [162], slika 73. Zemljotresi ovakvih intenziteta mogu izazvati blage deformacije na nizvodnoj kosini nasipa [164].

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla



Slika 73. Seizmički hazard u regionu deponije „TENT B“ za povratni period od 95 godina [162]

Proračuni stabilnosti u uslovima dinamičkog opterećenja urađeni su prema Bišopovoj metodi na 4 profila, prikazanih na slici 74.



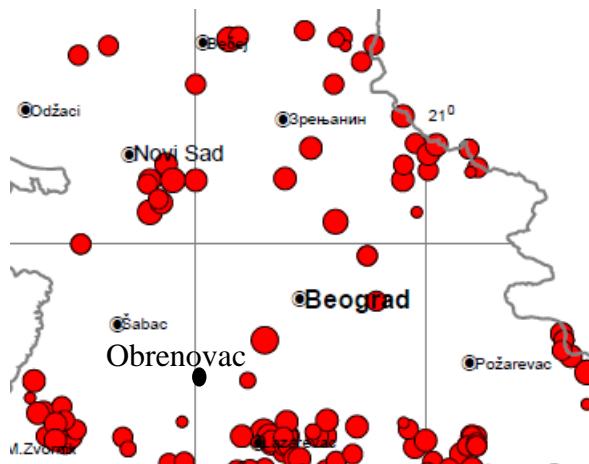
Slika 74. Položaj profila na kojima je raden proračun stabilnosti u slučaju deponije „TENT B“ [260]

Na osnovu rezultata iz tabele 52 može se zaključiti su izračunati faktori sigurnosti u okviru propisanih vrednosti za dinamička opterećenja.

Tabela 52. Rezultati proračuna stabilnosti deponije „TENT B“– dinamička opterećenja [260]

Profil	Fs	Dozvoljeni Fs prema lokalnom standardu SRPS U.C5.020
11	1,14	>1,0
14	1,55	
16	1,59	
18	1,36	

S obzirom da u ovom regionu više od poslednjih 500 godina nije bio epicentar nekog zemljotresa [253], slika 75, verovatnoća udesa po scenariju seizmičke nestabilnosti se može oceniti kao „približno jednaka nuli“ (težinski faktor 1).



Slika 75. Epicentri najvećih zemljotresa u okolini deponije „TENT B“ u periodu od 1456-2012. god. [253]

6.2.1.3. Udes po scenariju preliivanja

Sigurnosno nadvišenje kasete 2 iznosi 1 m, te projektovani retenzioni prostor kasete 2 ima zapreminu za prihvatanje ekstremnih padavina i vode sa slivnog područja od oko 20 Mm³. S obzirom da se radi o ravničarskoj deponiji, površina sliva područja deponije iznosi koliko i njena površina.

Ako se uzme najveća maksimalna količina padavina u ovom regionu, a koja je zabeležena u toku majskih poplava 2014. godine, može se razviti najgori mogući scenario udesa. Od 12. do 16. maja 2014. godine u ovom regionu je palo 177,3 l/m² kiše [263]. U periodu ovih velikih padavina nasipi na deponiji „TENT-B“ ni u jednom trenutku nisu bili ugroženi, niti je postojala opasnost od preliivanja. S obzirom da postoji direktna „komunikacija“ vode u deponiji sa podzemnim vodama, nivo podzemnih voda u okruženju jeste porastao, ali nivo vode u jezeru deponije nije prelazio rizičnu udaljenost od nasipa koja prema glavnom projektu iznosi minimalno 50 m [260].

Prema formuli za zapreminu pale vode (formula 1), na osnovu ovih podataka dobija se:

$$V = P \cdot F = 2.000.000 \cdot 0,1773 = 354.600 \text{ m}^3$$

Kada se ova količina padavina uporedi sa raspoloživim retenzionim prostorom, može se zaključiti da deponija ima kapacitet da prihvati 50 puta veće količine, i i te kako postoji dovoljan prostor da primi sve padavine sa slivnog prostora, bez bilo kakvog odvođenja vode kroz drenažni sistem i prelivni šaht.

Na osnovu ovih pretpostavki udesu usled preliivanja se dodeljuje verovatnoća koja je „približno jednaka nuli” (težinski faktor 1).

6.2.1.4. Udes po scenariju statičke nestabilnosti

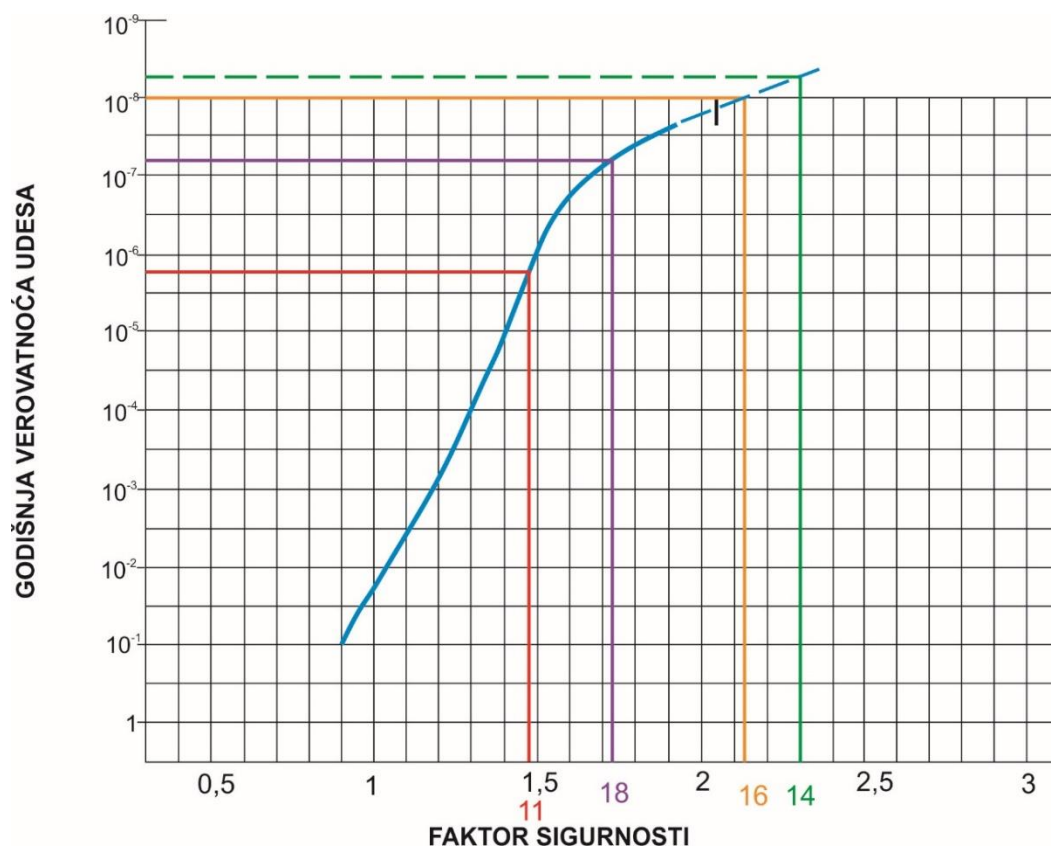
Za potrebe procene verovatnoće udesa usled statičke nestabilnosti analizirani su proračuni stabilnosti u uslovima statičkih opterećenja na 4 profila, rađenih po Bišopovoj metodi, tabela 53.

Tabela 53. Rezultati proračuna stabilnosti deponije „TENT B“ – statička opterećenja [260]

Profil	Fs	Dozvoljeni Fs prema lokalnom standardu SRPS U.C5.020
11	1,48	>1,5
14	2,30	
16	2,12	
18	1,72	

Na osnovu podataka iz tabele 53 može se konstatovati da su faktori sigurnosti veoma visoki i u okviru dozvoljenih vrednosti. Na osnovu njih utvrđena je godišnja verovatnoća udesa usled statičke nestabilnosti.

Deponija pepela i šljake „TENT-B“ pripada kategoriji I, a na slici 76 su prikazane usvojene verovatnoće u zavisnosti od faktora sigurnosti po profilima.



Slika 76. Godišnja verovatnoća prema faktorima sigurnosti za deponiju „TENT B” prema metodi predloženoj u [118]

Ako se očitane najbliže kvantitativne vrednosti verovatnoće prevedu u kvalitativne, dobiće se sledeće vrednosti:

- Profil 11 – 10^{-6} = „veoma mala”;
- Profil 14 – 10^{-8} = „približno jednaka nuli”;
- Profil 16 – 10^{-8} = „približno jednaka nuli”;
- Profil 18 – 10^{-7} = „približno jednaka nuli”.

Kao jednoznačna verovatnoća udesa usled statičke nestabilnosti uzima se u obzir najveća utvrđena verovatnoća (profil 11), a to je „veoma mala” (težinski faktor 2).

6.2.1.5. Udes po scenariju unutrašnje erozije

Na osnovu vrednosti indeksa plastičnosti materijala od kog je izgrađen nasip deponije „TENT B”, utvrđena je kategorija otpornosti na eroziju prema [173]. Materijal od kog je izgrađen nasip pripada III kategoriji materijala, koji imaju malu otpornost na eroziju.

Međutim, vizuelnim opažanjem nije uočena nijedna deformacija, niti pukotina na kruni ili kosinama nasipa.

Stoga se kao verovatnoća udesa usled unutrašnje erozije usvaja vrednost „veoma mala” (težinski faktor 2).

S obzirom da je ustanovljeno da udesi usled seizmičke nestabilnosti i prelivanja imaju verovatnoću „približno jednaku nuli”, njihove posledice i rizik se dalje neće razmatrati, kako razvijeni model za procenu rizika preporučuje.

6.2.2. Procena posledica

Pre procene posledica može se konstatovati da je taložno jezero dovoljno udaljeno od nasipa (oko 300 m), te se može zaključiti da neće doći do formiranja likvefikovanog toka materijala.

6.2.2.1. Procena količine isteklog materijala

Procena istekle količine hidromešavine usled proboja nasipa kasete 2 deponije „TENT B” je izvršena u skladu sa više faktora. Ako se obrati pažnja na zabeležene slučajeve isticanja materijala iz deponija pepela i šljake u prošlosti, kada kod deponija većih zapremina od 10 Mm^3 , kakva je i deponija „TENT-B“, nije dolazilo do isticanja više od 1% ukupno odloženih količina, (tabela 27), topografiju okolnog terena koji je ravničarski, tehnologiju odlaganja guste hidromešavine koja se primenjuje, reološke karakteristike koje ukazuju na malu fluidnost pepela i veliku krupnoću čestica pepela, može se zaključiti da prilikom formiranja inicijalnog poplavnog talasa ne bi istekle velike količine materijala.

U slučaju deponije „TENT-B“, 1% od ukupno odloženog materijala iznosi 350.000 m^3 , što se može smatrati realnom količinom istekle hidromešavine s obzirom da se prilično podudara sa procenom prema [194], kada je u slučaju kostolačke deponije pepela i šljake “Srednje kostolačko ostrvo”, deponije sličnih dimenzija i karakteristika, predviđeno isticanje 215.000 m^3 materijala usled proboja nasipa.

6.2.2.2. Procena rastojanja

Procena rastojanja u slučaju deponije „TENT B” je krajnje pojednostavljena, s obzirom na okolni ravničarski teren. Kod ravničarskih deponija je teško utvrditi tačan smer

kretanja isteklog materijala usled proboja nasipa. U obzir je uzeto da bi poplavni talas, usled pružanja što manjeg otpora sredini, svakako bio delimično prihvaćen kanalom koji se nalazi po obodu čitave deponije, koji je povezan sa Vukićevica potokom sa istočne strane deponije, a koji se uliva u Savu.

Dakle, u slučaju proboja ili preliivanja preko krune nasipa sa severne i južne strane deponije, efekti bi bili potpuno lokalni, s obzirom da se radi o pregradnim nasipima između kasete 2 i 1, odnosno 2 i 3.

Stoga se za potrebe predviđanja pređenog rastojanja poplavnog talasa razmatra njegovo napredovanje u smeru zapadno ili istočno od kasete 2. Kako model za procenu rizika sugeriše, usvaja se nepovoljniji smer kretanja talasa, a to je istočno od kasete 2, sa koje strane se nalaze vodotokovi, koji bi mogli sudelovati u tečenju. Čak i ako se zanemari obodni kanal, idealizovane dimenzije poplavnog talasa po metodologiji predloženoj u [223], prikazane su na slici 77.

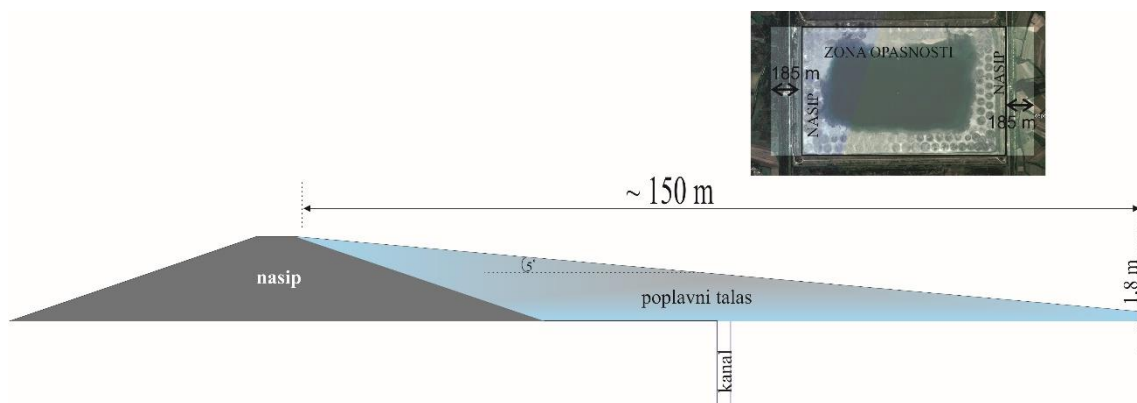
U obzir je uzeta pretpostavljena čvrstoća na smicanje materijala nakon proboja nasipa od 5 KN/m^2 , specifična gustina pepela od 11 kN/m^3 , na osnovu čega je izračunata krajnja visina talasa (formula 10):

$$H_f = \frac{4 \cdot 5 \text{ kN/m}^2}{11 \text{ kN/m}^3} = 1,8 \text{ m}$$

Usvojen je nagib talasa od 5° i širina talasa od oko 100 m. Ako se pretpostavi da bi kanal i potok Vukićevica prihvatili bar pola isteklog materijala, ostatak materijala bi „putovao“ oko 150 m.

S obzirom na trenutnu visinu nasipa deponije, jednoznačno utvrđena „zona opasnosti“ za ravničarski teren¹⁶ je u radijusu do oko 185 m, što se poklapa sa procenjenim rastojanjem.

¹⁶ „u ravni paralelnoj nagibu tla – rastojanje od $10 \times H$ od nožice nasipa...“ [57]



Slika 77. Rastojanje koje pređe poplavni talas u slučaju udesa na deponiji „TENT B“

6.2.2.3. Broj ljudskih žrtava

Istočno od deponije prve kuće su udaljene oko 500 m. Prema tome, jedino ugroženo ljudstvo, s obzirom na pretpostavljenu zonu opasnosti i kratko rastojanje talasa, su zaposleni na samoj deponiji, koji rade na njenoj izgradnji i održavanju. Ukupan broj zaposlenih je 16, pri čemu po smeni radi 8. Pretpostavlja se nikada neće svi zaposleni biti istovremeno na istom nasipu i da su ravnomerno raspoređeni duž čitave deponije, te se za potrebe procene broja žrtava uzima prosečan broj zaposlenih po nasipu, dvoje. Može se smatrati da ugroženo ljudstvo u potpunosti razume ozbiljnost poplave.

Za veliku ozbiljnost poplave, kako se ocenjuje u slučaju likvefakcije, usvajaju se sledeće stope smrtnosti po Grejemovoj metodi [228]:

Ozbiljnost poplave	Vreme upozorenja (min)	Razumevanje ozbiljnosti poplave	Stopa smrtnosti	
			Prosečna	Opseg
Velika	Bez upozorenja	Nije primenljivo	0,75	0,3-1,00

Na dvoje ugroženih ljudi, a prema prosečnoj stopi smrtnosti od 0,75 (75%), može doći do 2 žrtve.

U slučaju svih ostalih mogućih udesa, usvojena je mala ozbiljnost poplave i vreme upozorenja >60 min. Na osnovu ovih parametara dobijaju se sledeće stope smrtnosti [228]:

Ozbiljnost poplave	Vreme upozorenja (min)	Razumevanje ozbiljnosti poplave	Stopa smrtnosti	
			Prosečna	Opseg
Mala	>60 min	Potpuno	0,0002	0-0,0004

Za prosečnu stopu smrtnosti od 0,0002, na osnovu dvoje ugroženih radnika, dobija se <1 žrtve.

6.2.2.4. Procena ekonomskih posledica

S obzirom na lokalne razmere poplavnog talasa koji bi se formirao usled udesa, i posledice se mogu oceniti kao lokalne. Svakako bi došlo do privremenog prestanka rada same termoelektrane „TENT B“, što bi dovelo do finansijskih gubitaka.

Ako se pretpostavi da termoelektrana „TENT B“ ne bi radila bar dva dana, a da na dnevnom nivou može maksimalno da prozvede 29¹⁷ miliona kWh, za prosečnu cenu od 6 din¹⁸ po kWh dobija se novčani gubitak od 174 miliona dinara. Ova šteta, uz troškove sanacije same deponije i čišćenja terena i lokalnog zajedno čine „troškove po privredu“ prema „Uputstvu o metodologiji za izradu procene ugroženosti od elementarnih nepogoda i drugih nesreća i planova zaštite i spasavanja u vanrednim situacijama“, i s obzirom da ukupno iznose manje od 1% od ukupnog budžeta Srbije (58.604.400.000 dinara), mogu se oceniti kao minimalne [240].

Objekata kritične infrastrukture i javnog društvenog značaja na ruti poplavnog talasa nema, te se ne uzimaju u obzir.

Ekonomske posledice se vrednuju kao „zanemarljive“ (težinski faktor 1).

6.2.2.5. Ekološke posledice

Najugroženiji supstrat životne sredine je svakako voda. Preko reke Vukićevice, talas bi izvesno dospeo i do reke Save, te bi se vodovodna mreža na izvesno vreme onesposobila. Riblji fond ne bi bio ugrožen, s obzirom da bi došlo do znatnog razblaženja izlivena hidromešavine. Iako nije zanemarljiva šteta po rečni ekosistem, s obzirom da je kratkoročna, mala je. Kvalitet podzemnih voda je direktno uslovljen kvalitetom površinskih voda.

¹⁷ <http://www.tent.rs/proizvodni-rekordi>

¹⁸ <http://www.servisinfo.com/cena-struje>

Premda je procenjena distanca talasa pilično kratka, ne može se očekivati bitno narušavanje kvaliteta okolnog zemljišta, a vazduh bi samo privremeno nakon izlivanja bio zagađen, usled emisije prašine sa skorelih površina. Na ruti talasa nema specijalnih rezervata prirode, niti stalnih prirodnih staništa nekih većih životinjskih vrsta.

S obzirom da je za analizu rizika izabrana matrica 7x7, ekološke posledice su ocenjene na skali od 1-7, tabela 54. Ako se jednoznačna težina ekoloških posledica poistoveti sa maksimalnim težinskim faktorom iz Leopoldove matrice, može se zaključiti da su ekološke posledice „veoma male“ (težinski faktor 2).

Tabela 54. Ekološke posledice u slučaju udesa na deponiji „TENT B“

		KOMPONENTE OKRUŽENJA							
Svi udesi	Vazduh	Voda		Zemljište		Prirodni ekološki sistem			
	Kvalitet vazduha	Kvalitet površinskih voda	Kvalitet podzemnih voda	Pejzaž	Kvalitet	Prirodna vegetacija	Prirodno stanište	Specijalni rezervati prirode	
značajnost	1	2	2	1	1	1	1	1	max = 2
Skala:									
7	Katastrofalne posledice								
6	Veoma velike posledice								
5	Velike posledice								
4	Značajne posledice								
3	Male posledice								
2	Veoma male posledice								
1	Zanemarljive posledice								

6.2.2.6. Ukupna značajnost posledica

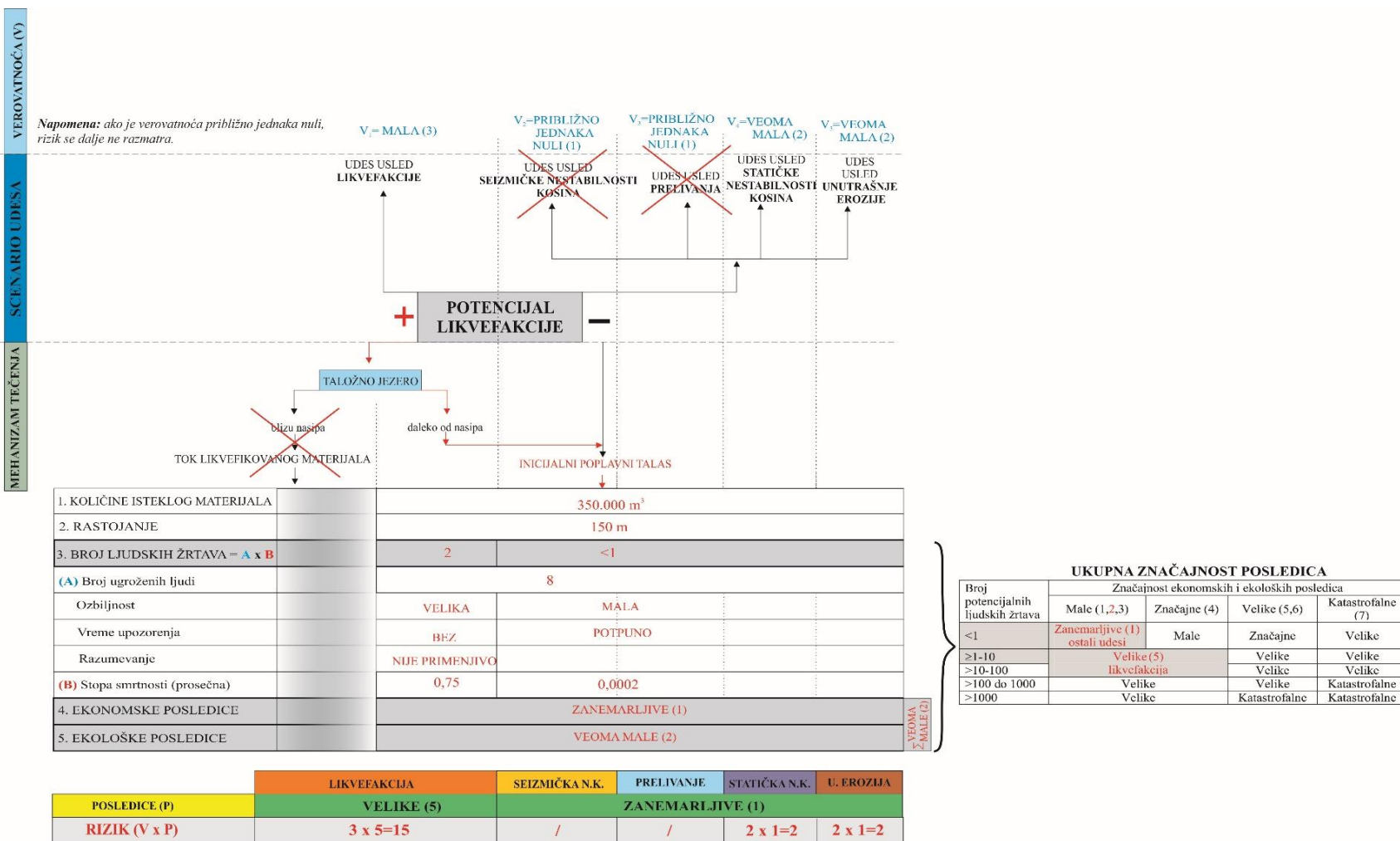
Na osnovu prethodno utvrdjene značajnosti pojedinačnih posledica (ekonomske i ekološke zajedno maksimalno „veoma male (2)“, broj ljudskih žrtava u slučaju likvefakcije 2, ostalih udesa <1), može se zaključiti da ukupna značajnost posledica ide od velikih (5) do zanemarljivih (1), u zavisnosti od toga da li se radi o udesu usled likvefakcije ili ne, tabela 55.

Tabela 55. Ukupna značajnost posledica u slučaju udesa na deponiji „TENT B”

Broj potencijalnih ljudskih žrtava	Značajnost ekonomskih i ekoloških posledica			
	Male (1,2,3)	Značajne (4)	Velike (5,6)	Katastrofalne (7)
<1	Zanemarljive (1)	Male	Značajne	Velike
≥1-10	Velike (5)		Velike	Velike
>10-100			Velike	Velike
>100 do 1000	Velike		Velike	Katastrofalne
>1000	Velike		Katastrofalne	Katastrofalne

Procena rizika eksploatacije deponije pepela i šljake “TENT B” prema razvijenom modelu je prikazana na slici 78.

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla



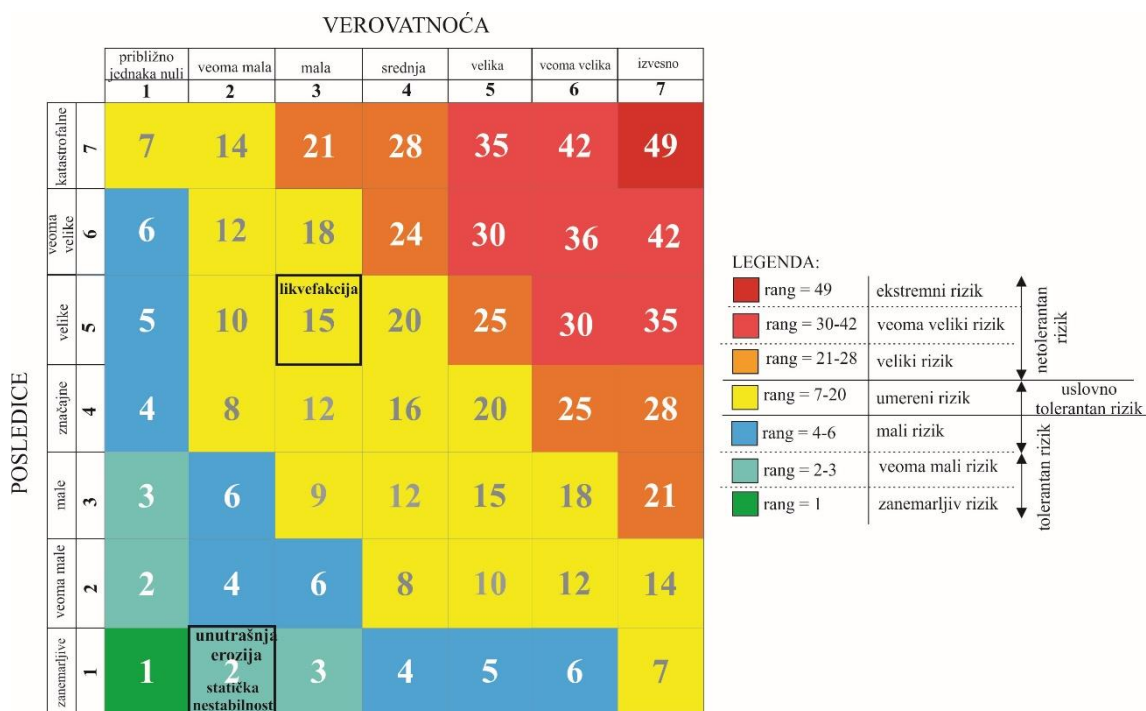
Slika 78. Model rizika deponije pepela i šljake „TENT B”

6.2.3. Analiza i vrednovanje rizika

U tabeli 56 data je rekapitulacija usvojenih parametara rizika eksploatacije deponije pepela i šljake „TENT B“, na osnovu kojih su analizirani rizici po scenarijima udesa uz pomoć matrice rizika, slika 79.

Tabela 56. Rekapitulacija usvojenih parametara rizika usvojenih u slučaju deponije „TENT B“

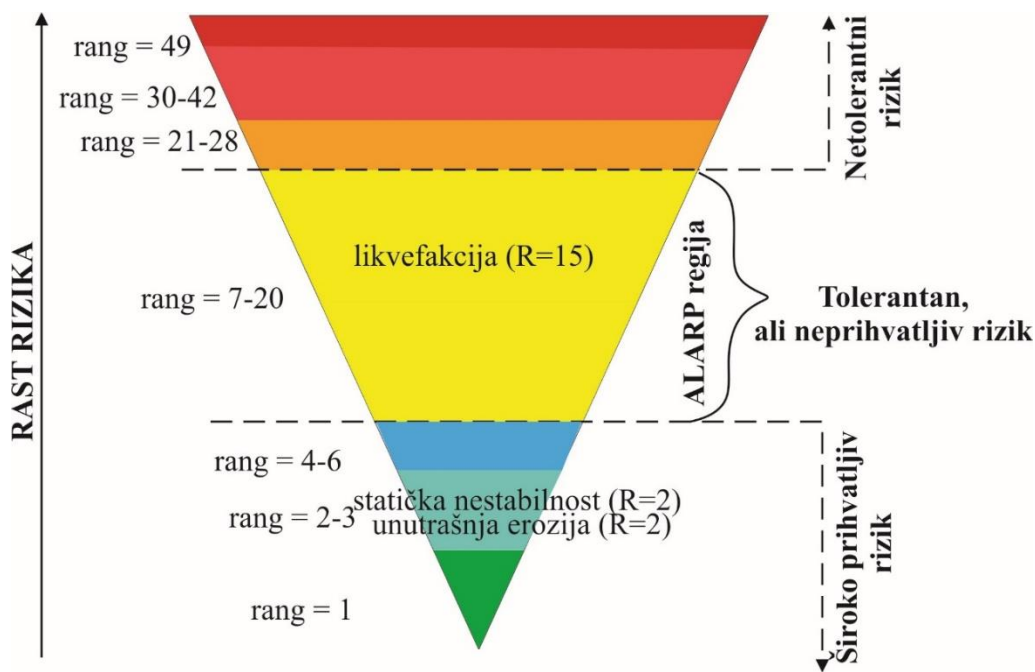
Scenario udesa	Verovatnoća (V)	Značajnost posledica			Rang rizika (V x P)
		Broj ljudskih žrtava	Ekonomske	Ekološke	
Likvefakcija	Mala (3)	2	Zanemarljive (1)	Male (3)	Umereni rizik (15)
Statička nestabilnost	Veoma mala (2)	<1			Zanemarljive (1)
Unutrašnja erozija	Veoma mala (2)		veoma male (2)		Veoma mali rizik (2)



Slika 79. Analiza rizika deponije „TENT B“ uz pomoć matrice 7x7

Pošto su rizici svakog scenarija udesa rangirani, izvršeno je njihovo vrednovanje uz pomoć ALARP pristupa. Na osnovu tzv. „šargarepa“ dijagrama može se zaključiti da

rizik eksploatacije deponije pepela i šljake „TENT B“ varira od veoma malog rizika, ranga 2 (po scenariju statičke nestabilnosti i unutrašnje erozije), koji se nalazi u zoni široko prihvatljivog rizika, do velikog rizika, ranga 15 (po scenariju udesa usled likvefakcije), koji se nalazi u zoni neprihvatljivog rizika, slika 80.



Slika 80. Vrednovanje rizika eksploatacije deponije pepela i šljake “TENT B” uz pomoć ALARP pristupa i “šargarepa”

Deponiji pepela i šljake „TENT B“ pretil rizik od 3 udesa, od ukupno 5 razmatranih.

7. DISKUSIJA I VALIDACIJA RAZVIJENOG MODELA

Testiranje modela razvijenog za procene rizika eksploatacije deponija industrijskog otpada mineralnog porekla obavljeno je procenama rizičnosti flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ i deponije pepela i šljake „TENT B“. Ekspertskom procenom realnog stanja, istorijskih događanja i aktuelne veličine flotacijskog jalovišta, ono se može smatrati inicijalno visoko rizičnim objektom, nasuprot deponiji pepela i šljake, kod koje je nivo rizika mali.

Rezultati procene rizičnosti dobijeni primenom razvijenog modela kazuju da se rizik eksploatacije deponije „TENT B“ nalazi u zoni široko prihvatljivog rizika i tolerantnog, ali neprihvatljivog rizika (ALARP zoni), dok kod flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ to nije slučaj i rizik varira od široko prihvatljivog do netolerantnog rizika, pri čemu je u najvećoj meri lociran u ALARP zoni.

Rekapitulacija rezultata procene rizika obe deponije je prikazana u tabeli 57 i parametri koji imaju veću vrednost su obojeni. Može se primetiti da su vrednosti skoro svih razmatranih parametara veće u slučaju flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“.

Tabela 57. Rekapitulacija parametara rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj” i „TENT B“

PARAMETRI		F. jalovište „Veliki Krivelj“	Deponija pepela i šljake „TENT B“	
VEROVATNOĆA UDESA (V)				
Likvefakcija		Velika (5)	Mala (3)	
Seizmička nestabilnost		Srednja (4)	Približno jednaka nuli (1)	
Prelivanje		Veoma mala (2)	Približno jednaka nuli (1)	
Statička nestabilnost		Veoma velika (6)	Veoma mala (2)	
Unutrašnja erozija		Velika (5)	Veoma mala (2)	
POSLEDICE (P)				
Količina isteklog materijala		2.500.000 m ³	350.000 m ³	
Rastojanje		900 m	150 m	
Broj ljudskih žrtava	Likvefakcija	8	2	
	Ostali udesi	<1	<1	
Ekonomske posledice		Veoma male (2)	Male (3)	Zanemarljive (1)
Ekološke posledice		Male (3)		Veoma male (2)
UKUPNA ZNAČAJNOST POSLEDICA	Likvefakcija	Velike (5)	Velike (5)	
	Ostali udesi	Veoma male (2)	Zanemarljive (1)	
Rizik (V x P)				
Likvefakcija		VELIKI (25)	UMERENI (15)	
Seizmička nestabilnost		UMEREN (8)	Nije procenjen	
Prelivanje		MALI (4)	Nije procenjen	
Statička nestabilnost		UMEREN (12)	VEOMA MALI (2)	
Unutrašnja erozija		UMEREN (10)	VEOMA MALI (2)	
ZBIR RANGOVA RIZIKA		59	19	

Validacijom se proverava da li razvijeni model precizno reprezentuje realni sistem. Za validaciju ovog modela izabrano je poređenje dobijenih rezultata na analiziranim primerima flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ i deponije pepela i šljake „TENT-B“ sa jednostavnim kvalitativnim modelom predloženim u [52] i ICOLD-ovim sistemom za procenu rizika na visokim branama vodnih akumulacija [70].

Prvi je izabran jer se zasniva na oceni nivoa održavanosti deponije i analizi rizika pomoću matrice, dva elementa koja su prisutna i u modelu razvijenom u ovoj disertaciji. Drugi je izabran jer se najčešće koristi za klasifikaciju visokih brana vodnih akumulacija prema rizičnosti.

Kao što je već konstatovano, flotacijsko jalovište „Veliki Krivelj” je prostorno i zapreminski veliko, slabije održavano sa zabeleženim udesima i poremećajima u prošlosti, u dolini uređenog vodotoka, neposredno uz površinski kop, brdsko-planinskog tipa. Poređenje dobijenih rezultata prema modelu razvijenom u ovoj disertaciji sa kvalitativnim modelom prikazano je u tabeli 58.

Tabela 58. Rezultati procene rizika eksploatacije flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj” prema kvalitativnom i razvijenom modelu

			Posledice			
			Ekstremne	Velike	Umerene	Male
			4	3	2	1
Verovatnoća	Može doći do udesa u svakom momentu.	4	16	12	8	4
	Postoje ozbiljni skriveni poremećaji, ako se nešto ne preduzme na vreme može doći do udesa.	3	12	9	6	3
	Deponija zadovoljava osnovne uslove za bezbedan rad.	2	8	6	4	2
	Deponija je potpuno uređena i svi uslovi za bezbedan rad su obezbeđeni.	1	4	3	2	1

Poređenjem dobijenih rezultata za deponiju odabranu kao potencijalno rizičnu, flotacijsko jalovište „Veliki Krivelj“, vidi se da ona po kvalitativnom modelu rizik ima vrednost 6, što pokazuje da će posledice eventualnog udesa biti umerene, ali da postoje ozbiljni skriveni poremećaji koji ugrožavaju stabilnost objekta. Po modelu razvijenom u ovoj disertaciji rezultati (prevedeni sa matrice 7 x 7 na matricu 4 x 4) se kreću od 1,3 (prelivanje – najmanji rizik), preko 2,6 (seizmički nestabilna), 3,3 (unutrašnja erozija) i 4,0 (statički nestabilna) do 8,2 (likvefakcija – najrizičnija pojava). Dakle, model razvijen

u ovoj disertaciji ima veću osetljivost, pa za manje rizične pojave daje niži rezultat od kvalitativnog modela, a za najrizičniju likvefakciju daje veću vrednost. Ako se kao krajnji rezultat iz razvijenog modela usvoji najnepovoljniji slučaj, onda se može konstatovati da razvijeni model, kod deponija kod kojih je rizičnost eksploatacije izražena, daje za stepen oštriju ocenu rizičnosti od sličnog kvalitativnog modela.

Ako se uporede rezultati koji ukazuju na nizak potencijal rizika deponije „TENT B“, dobijaju se rezultati prikazani u tabeli 59.

Tabela 59. Rezultati procene rizika eksploatacije deponije pepela „TENT-B” prema kvalitativnom i razvijenom modelu

			Posledice			
			Ekstremne	Velike	Umerene	Male
			4	3	2	1
Verovatnoća	Može doći do udesa u svakom momentu.	4	16	12	8	4
	Postoje ozbiljni skriveni poremećaji, ako se nešto ne preduzme na vreme može doći do udesa.	3	12	9	6	3
	Deponija zadovoljava osnovne uslove za bezbedan rad.	2	8	6	4	2
	Deponija je potpuno uređena i svi uslovi za bezbedan rad su obezbeđeni.	1	4	3	2	1

Razvijeni model, najnepovoljniji slučaj - likvefakcija

kvalitativni model

razvijeni model – ostali slučajevi

Kada se procena uradi na isti način kao i kod rizične deponije, onda kvalitativni model pokazuje da je deponija pepela „TENT-B” potpuno sigurna (numerički rezultat rizika je 1), dok se prema modelu razvijenom u ovom doktoratu za slučajeve preliivanja, seizmičke nestabilnosti, erozije i statičke nestabilnosti dobija rezultat ispod 1 (0,65), a kod likvefakcije dobija rezultat 4,9. Ovde se, dakle, ponovo pokazuje da osetljivost i razvijenost novog modela daje više rezultata. Kod uobičajenog stanja nestabilnosti rezultati razvijenog i kvalitativnog modela su podudarni, dok kod ekstremnog slučaja pojave likvefakcije, razvijeni model pokazuje veći nivo rizičnosti. Svođenjem krajnjeg

rezultata na najnepovoljniji slučaj onda se vidi da razvijeni model kod nerizičnih deponija daje oštrije rezultate od kvalitativnog modela.

Rezime poređenja modela razvijenog u ovoj disertaciji sa tzv. kvalitativnim modelom pokazuje da se u analizi uobičajenih i najčešćih nepovoljnih pojava na deponijama ova dva modela u najvećoj mogućoj meri podudaraju, ali da kod manje rizičnih deponija kvalitativni model ne prepoznaje ekstremna događanja, kao što je likvefakcija, te da u tom slučaju razvijeni model daje oštrije rezultate. Time model razvijen u ovoj disertaciji dobija dodatnu pozitivnu i poželjnu karakteristiku jer kod manje rizičnih deponija pored upozorenja na moguće rizike upućuje na budnost, s obzirom da se ekstremni nepovoljni slučajevi, bez obzira na malu verovatnoću, ipak, realno mogu pojaviti.

ICOLD-ov pristup za procenu rizika kod visokih brana bazira se na pretnjama koje su iskazane u geometrijskim veličinama i posledicama koje se procenjuju [70]. Za ovaj pristup je karakteristično da pored upozorenja nosi i crtu predostrožnosti i plašenja kako bi se blagovremeno preduzimale radnje na održavanju deponije u stabilnom stanju jer se nivo rizičnosti ne smanjuje sa boljim održavanjem i/ili uspešnom sanacijom. Rezultati uporedne analize rizičnosti analiziranih deponija po modelu razvijenom u ovoj disertaciji i ICOLD-ovim preporukama prikazani su u tabeli 60.

Tabela 60. Rezultati uporedna proceni rizika na analiziranim deponijama prema ICOLD-ovom pristupu [70] i razvijenom modelu

Parametar	„Veliki Krivelj“		„TENT B“	
	model ICOLD-a	razvijeni model	model ICOLD-a	razvijeni model
Kapacitet, Mm ³	Visok (4)		Visok (4)	
Visina, m	Ekstremna (6)		Umerena (2)	
Broj lica koje treba evakuisati	Umeren (4)		Umeren (4)	
Šteta, nizvodno	Umerena (8)		Mala (4)	
Suma	22 (visok rizik, klasa III)	Mali do veliki, najčešće umeren	14 (umeren rizik, klasa II)	Mali do umeren rizik

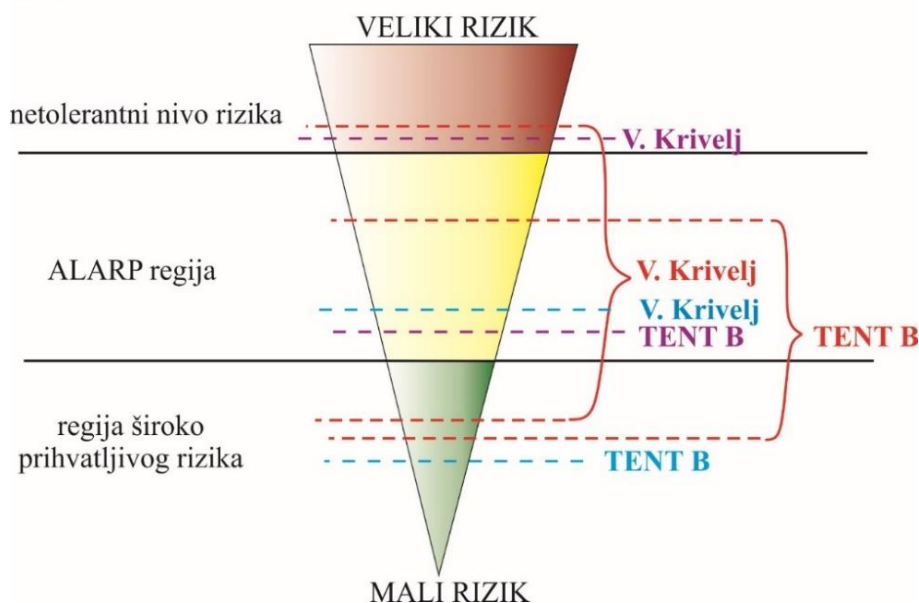
Dakle, rezultati pokazuju da prema ICOLD-ovom sistemu rizik flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ pripada klasi III, koja se tumači kao visok rizik, dok deponije „TENT B“ pripada klasi II, koja se tumači kao umeren rizik. Kod modela koji je razvijen u ovoj doktorskoj disertaciji nivo rizika na flotacijskom jalovištu, u zavisnosti od vrste udesa, varira od malog do velikog, u najvećem broju slučajeva je umeren, dok je na deponiji

pepela mali ili umeren. Iz ovoga se da zaključiti da razvijeni model daje za klasu umereniji nivo rizika od ICOLD-ovog. S obzirom da se kod ICOLD-ovog modela pretnje iskazuju kao geometrijske veličine (kapacitet je definisan raspoloživim, a ne popunjenim prostorom), te da ne uvažava pretnje definisane pojavama na deponiji, ovakvi rezultati su i očekivani. Odnosno, ICOLD-ov pristup proceni rizika pored upozorenja treba vlasnika akumulacije (deponije) i da zabrine (preplaši), dok se razvijeni model bazira na upozorenju da postoji realna potreba da se nešto preduzme kako bi se rizik sveo u tolerantni nivo.

Na slici 81 prikazan je uprošćeni „šargarepa“ dijagram sa ucrtanim nivoima rizika obe deponije, a prema primenjenim pristupima. Jasno je da je u svakoj varijanti nivo rizika flotacijskog jalovišta „Veliki Krivelj“ veći od nivoa rizika deponije „TENT B“, čime se potvrđuju polazne pretpostavke i rezultati dobijeni na osnovu razvijenog modela za procenu rizika, i opravdava činjenica da je rizik funkcija nivoa održavanosti deponije, pravilo kojim se rukovalo u ovoj doktorskoj disertaciji.

LEGENDA:

- razvijeni model
- kvalitativni model
- ICOLD-ov sistem



Slika 81. Objedinjeni rezultati na „šargarepa” dijagramu

Evidentna je dobra podudarnost kvalitativnog i modela razvijenog u ovoj disertaciji i razlika koju ICOLD-ov model ima prema analiziranim modelima. Može se i na ovaj način

Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla

konstatovati da su trendovi, iskazani preko rizične i nerizične deponije, podudarni, što razvijeni model čini validnim i prihvatljivim za praktičnu primenu za procenu rizika u svim realno mogućim situacijama na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla.

8. ZAKLJUČAK I PREPORUKE ZA DALJI RAD

Deponije industrijskog otpada mineralnog porekla se smatraju apriori rizičnim objektima usled svojih velikih dimenzija, ograničene dostupnosti i kvaliteta materijala od kojeg se nasipi na ovim deponijama grade, načina i vremena izgradnje i eksploatacije i komplikovanosti održavanje geotehničke i ekološke stabilnosti. Rizik koji se vezuje za njih linearno raste tokom godina eksploatacije, čemu svedoče udesi koji neretko ostavljaju katastrofalne posledice po okruženje. Upravo zbog toga, ovakvi objekti za mnoge nisu prihvatljivi i sinonim su za neposrednu i stalnu opasnost.

Manjak zakonske regulative na polju procene rizika ovakvih objekata učinili su da se deponije, u pogledu metodologije procene rizika, poistovećuju sa akumulacijama vode, za koje već postoje razrađeni modeli. Koliko god nasipi na deponijama bili slični branama na akumulacijama, značajne razlike postoje. To je u prvom redu različito stanje i ponašanje mešavine tečne i čvrste faze u odnosu na samu tečnu fazu, bilo da se oni nalaze unutar nasipa/brane ili da teku posle proboja. Kao epilog ovakve prakse dobija se nerealan nivo rizika za deponije otpada, u skladu sa čim se donose pogrešne odluke o merama za njegovo smanjenje.

Cilj doktorske disertacije pod nazivom „Razvoj modela za procenu rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla” je da razvije model za procenu realnog rizika eksploatacije deponija industrijskog otpada mineralnog porekla kojim se omogućava:

- analiza svih parametara rizika, i to:
 - scenarija potencijalnih udesa i njihovih verovatnoća,
 - posledica koje proističu iz udesa i njihove značajnosti, i
- savremen sistem vrednovanja rizika zasnovanog na nivou održavanosti deponije.

Svrha razvijenog modela je da se u skladu sa procenjenim rizikom i predviđenim udesnim situacijama preduzimaju mere za njihovo sprečavanje i uspostavi efikasan plan delovanja u takvim uslovima, te da se rizik eksploatacije deponije drži pod kontrolom.

U skladu sa uspostavljenim ciljevima u ovoj doktorskoj disertaciji su analizirani postojeći modeli za procenu rizika i sistemi za klasifikaciju prema rizičnosti, koji imaju najširu upotrebu. Jasno su definisane osobine po kojima se deponije razlikuju od akumulacija

vode, što je dalo osnovu da se svi uočeni nedostaci postojećih modela i sistema isprave novim modelom. Model je testiran i validiran na realnim deponijama, što je opravdalo njegovu svrhu i potvrdilo hipoteze istraživanja.

Doprinos ove doktorske disertacije se ogleda u razvijenom modelu za procenu rizika prvenstveno deponija čvrstog otpada, zasnovanog na fundamentalnim osnovama geotehničke stabilnosti deponija. Njime su jasno definisane smernice za analizu svih elemenata koji figurišu u procesu procene rizika deponija, te omogućava da inženjer, i bez prethodnog iskustva i ograničenog znanja o deponijama i riziku, ako raspolaže sa dovoljnim brojem podataka o deponiji i okolini, izvrši procenu rizika.

Model daje:

- Smernice za prognoziranje najčešćih scenarija udesa koji se mogu dogoditi na deponiji, i to:
 - Udes usled likvefakcije na osnovu potencijala likvefakcije,
 - Udes usled seizmičke nestabilnosti na osnovu seizmičkog hazarda za predmetnu lokaciju i faktora sigurnosti deponije u dinamičkim uslovima,
 - Udes usled prelivanja na osnovu potencijala plavljenja deponije,
 - Udes usled statičke nestabilnosti na osnovu faktora sigurnosti u statičkim uslovima, i
 - Udes usled unutrašnje erozije u skladu sa kategorijom otpornosti materijala na eroziju i zatečenim stanjem nasipa.
- Procedure za pretpostavljanje najkritičnijih karakteristika toka poplavnog talasa:
 - Mehanizma tečenja,
 - Količine isteklog materijala, i
 - Rastojanja koje materijal pređe.
- Alate za procenu posledica, i to ljudskih žrtava, ekonomskih i ekoloških šteta:
 - Uspostavlja kriterijume za njihovo pojedinačno i sveukupno vrednovanje.

Kao proizvod modela dobija se procena realnog nivoa rizičnosti i sud o njegovoj prihvatljivosti, koji je u potpunosti saglasan sa preporukama standarda za upravljanje rizikom ISO 31000:2015.

Osnovni naučni doprinos ove doktorske disertacije jeste definisanje modela baziranog na realnim i merodavnim parametrima za analizu rizika specifičnih industrijskih objekata, kao što su deponije industrijskog otpada mineralnog porekla, odnosno, akumulacije mešavine čvrste i tečne faze. Realniji sistemi vrednovanja verovatnoća nastanka udesa na deponijama, kao i potencijalnih posledica, doprinose boljoj, sistematičnijoj i primenljivijoj proceni rizika i efikasnijoj, racionalnijoj i bezbednijoj eksploataciji deponija. Doprinos ove doktorske disertacije čini potvrda naučnih hipoteza, koje su uspostavljene na samom početku. Dakle, potvrđene su i jasno definisane razlike između deponija i akumulacija vode i na osnovu toga je formiran model koji je u potpunosti prilagođen deponijama, kao objektima za zajedničko akumulisanje čvrste i tečne faze. U najvećoj meri se pažnja posvetila različitim karakteristikama poplavnog talasa hidromešavine, u odnosu na poplavni talas vode.

Na ovu hipotezu, nadovezala se i potvrda hipoteze da se različite vrste otpada (gruba i sitna flotacijska jalovina, mulj iz separacije, pepeo i šljaka, fosfogips...) ne ponašaju isto pri tečenju poplavnog talasa. Na osnovu fundamentalnih znanja o reologiji hidromešavina različitih otpada, potvrđeno je da što je otpad sitniji i manje gustine, to je i fluidniji jer ima manju otpornost na smicanje.

Studije slučaja u kojima je model praktično primenjen na realnim primerima dve različite deponije, u smislu otpada koji se na njima deponuje i nivoa njihove održavanosti, dokazale su da model prati opšteprihvaćeni trend koji sugeriše da što je deponija lošije održavana, to je rizik veći i obrnuto.

Pored najčešće korišćenih pristupa u predviđanju količina materijala koji će, u slučaju udesa, isteći iz deponije, predložen je novi poredak za usvajanje tih količina kod deponija grube flotacijske jalovine, poput one koja nastaje preradom rude bakra. Veliki broj deponija ovakvog otpada i njihove velike dimenzije iznedrile su potrebu da se ovoj vrsti otpada posveti najveća pažnja.

Kada je reč o udesima koji su razmatrani u ovom doktoratu, kao najkritičniji, u smislu velike brzine manifestovanja i velikih razmera posledica, naveden je udes usled

likvefakcije. Iako postoji dosta razvijenih metoda za skrining potencijala likvefakcije koje su u širokoj upotrebi, rezultati koji se dobijaju njihovom primenom su često precenjeni i kose se sa inženjerskom logikom, te ukazuju na to da nije dovoljno da analiza počiva isključivo na geomehaničkim i fizičkim osobinama materijala. Pri analizi treba pronaći dublje u problematiku, te obuhvatiti celokupno stanje deponije i realno ispitivati likvefabilnost koherentnih i nekoherentnih materijala. Kako su ovi modeli prilagođeni prvenstveno tlu, potrebno je buduća ispitivanja likvefabilnosti prilagoditi materijalima poput industrijskog otpada mineralnog porekla.

Validacija modela je urađena na analiziranim deponijama poređenjem dobijenih rezultata i trendova sa jednostavnim kvalitativnim modelom i sa postupkom koji je predložen od strane ICOLD-a. Dok kvalitativni model polazi od istih pretpostavki, da je rizičnost posledica stvarnog stanja i održavanja deponija, dotle je ICOLD-ov model razvijen za procenu rizičnosti vodnih akumulacija i rizičnost vezuje za pretnje, koje su definisane geometrijom akumulacije, i posledice, koje zavise od stanja u okruženju i na putu poplavnog talasa. ICOLD-ova metodologija podrazumeva da su sve deponije maksimalno dobro održavane. Rezultati dobijeni poređenjem rezultata iz modela koji je razvijen u ovoj doktorskoj disertaciji sa druge dve metodologije pokazuju da razvijeni model daje realne i prihvatljive rezultate za najveći broj realno mogućih poremećaja na deponijama otpada. U slučaju pojave ekstremnih poremećaja, kakav je likvefakcija deponovanog otpada, razvijeni model daje veći nivo rizika od kvalitativnog modela i u tom slučaju su podudarne procene razvijenog i ICOLD-ovog modela.

Kao opšti zaključak ovog doktorata može se navesti da je procena rizika objekata poput deponija industrijskog otpada mineralnog porekla veoma kompleksan proces koji iziskuje opsežnu analizu stabilnosti deponije, uslova njene eksploatacije i karakteristika deponovanog materijala. Ovim modelom je razrađen detaljan pristup ovoj analizi, korišćenjem jednostavnih alata za procenu rizika, čiji se rezultati lako tumače. Bitan efekat modela, a u skladu sa prirodom rizika, je da upozori na sve manjkavosti u projektovanju i eksploataciji deponije, a ne da zaplaši vlasnika ili korisnika deponije. Samo pravovremene i preventivne reakcije i mere mogu sprečiti udese, koji su često u prošlosti rezultovali velikim brojem ljudskih žrtava, materijalnom i ekološkom štetom.

Dalja istraživanja na polju procene rizičnosti deponija treba usmeriti na predviđanje količina hidromešavine i čvrste faze koje će isteći u slučaju udesa na industrijskim deponijama drugih otpada mineralnog porekla. Ovde je posebno važno utvrditi razliku u ponašanju velikih deponija pepela i šljake u odnosu na velike deponije separacijskih muljeva i/ili flotacijskih jalovina fino usitnjenog materijala, što je slučaj kod flotacijskih jalovišta rudnika olova i cinka. Treba utvrditi povoljne i nepovoljne osobine termički tretiranih otpada, poput pepela i šljake, koji nastaju sagorevanjem najnekvalitetnijih lignitskih ugljeva (promena mineralnog sastava formiranjem sintetičkih minerala, agregacija sitnih zrna, promena oblika zrna, promena kvašljivosti, promena poroznosti i vodopropustljivosti, menjanje odnosa amorfnе i kristalne faze, sposobnost spontane solidifikacije), a koje, iskustveno je poznato, utiču na tok i količinu pokrenute mase pri udesu na deponiji. Shodno ovim preporukama, trebalo bi razmotriti primenu nekog programskog sistema za podršku odlučivanju, s obzirom da razvijeni model pruža dobru osnovu.

Kako je model u potpunosti prilagođen hidrauličkom tipu deponija, kao najmasovnijem i najrizičnijem, buduća istraživanja treba usmeriti i ka deponijama filtriranog otpada, uslovno nazvanim suvim deponijama. Kod ovih otpada izdvajanje vode se vrši pre deponovanja filtriranjem, uz korišćenje flokulanata, što deponovanoj masi daje specifične osobine. Iako retko, udesne situacije su zabeležene i na njima, te se rizik ne sme zanemariti.

9. LITERATURA

- [1] G. Dionne, "Risk Management: History, Definition and Critique," *Risk Management and Insurance Review Montreal*, vol. 16. no. 2, pp. 147-166, 2013.
- [2] American Heritage, *Dictionary of the English Language*, Houghton Mifflin Harcourt Publishing Company, 2016.
- [3] M. Vujanić i dr., *Rečnik srpskoga jezika*, Novi Sad: Matica srpska, 2007.
- [4] B. T. Atkins, A. Duval, R. C. Milne, *Collins-Robert French-English, English-French Dictionary*, 9th edition, New York: French & European Publications, 2005.
- [5] *Oxford English Dictionary*, 2nd Edition, London: Oxford University Press, 1989.
- [6] I. Klajn, M. Šipka, *Veliki rečnik stranih reči i izraza*, Novi Sad: Prometej; Zavod za kulturu Vojvodine, 2010.
- [7] M. Vujaklija, Č. Mirković, S. Brajović, *Leksikon stranih reči i izraza*, Beograd: Prosveta, 1996.
- [8] *Menadžment rizikom-principi i smernice*, SRPS ISO Standard 31000:2015.
- [9] K. Borch, "The Theory of Risk, " *Journal of the Royal Statistical Society. Series B (Methodological)*, vol. 29, no. 3, pp. 432-467, 1967.
- [10] M. Stanišić, L. V. Stanojević, *Evaluacija i rizik*, Beograd: Univerzitet Singidunum, 2008.
- [11] A. F. Bakr, K. El Hagla, A. N. A. Rawash, "Heuristic approach for risk assessment modeling: EPCCM application (Engineer Procure Construct Management)," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 51, pp. 305-323, 2012.
- [12] E. Wissem, "Risks management: New literature review," *Polish Journal of Management Studies*, vol. 8, pp. 288-297, 2013.
- [13] A. Robertson, FMEA Risk Analysis: Failure Modes and Effects Analysis, *Seminario 2012: Gestao de riscos e seguranca de baragens de rejeitos*, 2012.
- [14] *Menadžment rizikom*, SRPS ISO Guide 73:2015.
- [15] *Menadžment rizikom - Tehnike ocene rizika*, SRPS EN ISO Standard 31010:2011.
- [16] D. Elms, "Risk assessment," *Engineering Safety*, Berkshire, England, McGRAW-HILL Book Company Europe, 1992, pp. 28-46.
- [17] Sl. Glasnik RS, „Zakon o vandrednim situacijama,” Službeni Glasnik Republike Srbije, br. 111/2009, 92/2011 i 93/2012, Beograd, 2009.
- [18] M. Đapan, *Unapređenje modela za procenu rizika na radnom mestu primenom teorije fazi skupova prognostike*, Doktorska disertacija, Kragujevac: Fakultet inženjerskih nauka, Univerzitet u Kragujevcu, 2014.

- [19] O. Renn, "Risk analysis: scope and limitations," *Regulating Industrial Risks: Science, Hazards and Public Protection*, London, Butterworth, 1885, pp. 111-127.
- [20] Lj. Savić, D. Savić, "Procena sigurnosti brana," *Vodoprivreda*, vol. 35, pp. 299-305, 2003.
- [21] SPANCOLD, *Technical guides on dam safety : Risk analysis applied to management of dam safety*, Valencia: Spanish National Committee on Large Dams, 2013.
- [22] D. N. Tchiche, F. Gauthier, "Classification of risk acceptability and risk tolerability factors occupational health and safety," *Safety Science*, vol. 93, pp. 138-147, 2017.
- [23] H. J. Bischoff, "Risk Profiles in Modern Work Life," *Risks in Modern Society*, Mannheim, Germany, Springer, 2008, pp. 11-16.
- [24] HSE, "The tolerability of risk from nuclear power stations", Health and Safety Executive, No. CB(2)1635/11-12(01), London, 1992.
- [25] Royal Society Study Group, *Risk: Analysis, Perception and Management*, London: Royal Society, 1992.
- [26] R. E. Melchers, "On the ALARP approach to risk management," *Reliability Engineering and System Safety*, vol. 71, no. 2, pp. 201-208, 2001.
- [27] W. W. Lowrance, *Of Acceptable Risk: Science and the Determination of Safety*, California: Los Altos, Kaufmann, 1976.
- [28] K. M. Dise, S. G. Vick, "Dam safety risk analysis for Navajo Dam," *Transactions of the International Congress on Large Dams*, 2000.
- [29] ICOLD, *Tailings Dams – Risk of Dangerous Occurrences, Lessons Learnd from Practical Experiences – Bulletin 121*, Paris: International Commission on Large Dams, 2001.
- [30] C. J. Van Westen, *National scale landslide susceptibility assessment for Dominica. Caribbean Handbook on Risk Information Management*, World Bank GFDRR, ACP-EU Natural Disaster Risk Reduction, 2016.
- [31] G. Taguchi, "Fault tree analysis of slurry and dewatered taiings management—a framework", Ph.D. dissertation, University of British Columbia, Vancouver, Canada, 2014.
- [32] T. E. Martin, M. P. Davies, S. Rice, T. Higgs, P. C. Lighthall, "Stewards of Tailings Facilities," *World Business Council for Sustainable Development*, pp. 9-10, 2002.
- [33] R. N. C. D. Santos, L. M. M. S. Caldeira, J. P. B. Serra , "FMEA of a tailings dam," *Georisk: Assessment and Management of Risk for Engineered Systems and Geohazards*, vol. 6, no. 2, pp. 89-104, 2012.
- [34] D. Knežević, S. Torbica, Z. Rajković, M. Nedić, *Odlaganje industrijskog otpada*, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet Univerziteta u Beogradu, 2014.
- [35] R. Das, I. Choudhury, "Waste management in mining industry," *Indian Journal of Scientific Research*, vol. 4, no. 2, p. 139, 2013.

- [36] B. Maluckov, „Otpad iz rudarsko-pirometalurške proizvodnje bakra i postupanje sa njim,” *Tehnika – rudarstvo, geologija i metalurgija*, vol. 68, no. 6, pp. 819-824, 2017.
- [37] BRGM, “Management of mining, quarrying and ore-processing waste in the European Union,” DG Environment, European Commission, France, BRGM/RP-50319-FR, 2001.
- [38] D. Knežević, *Priprema mineralnih sirovina*, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2012.
- [39] W. Q. Tian, J. G. Xue, *Tailings pond safety technology and management*, Beijing: China Coal Industry Publishing House, 2006.
- [40] H. Zi-Nan, L. Guo-Qing, H. Nai-Lian, “Research on Catastrophe Risk Financing Mode for Tailings Pond Dam Break,” *Joint International Conference on Economics and Management Engineering (ICEME 2016) and International Conference on Economics and Business Management (EBM 2016)*, 2016.
- [41] S. G. Vick, *Planning, Design, and Analysis of Tailings Dams*, Richmond: BiTech Publishers, Limited, 1990.
- [42] U.S. EPA, “Design and evaluation of tailings dams,” U.S. Environmental Protection Agency (EPA), Office of Solid Waste, Special Waste Branch, Washington, Technical Report No. EPA 530-R-94-038, 1994.
- [43] Y. A. Alsharedah, “Slope Stability Enhancement of an Upstream Tailings Dam: Laboratory Testing and Numerical Modelling”, Ph.D. dissertation, The University of Western Ontario, Ontario, Canada, 2015.
- [44] L. Valenzuela, “Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile,” *Obras y Proyectos*, vol. 19, pp. 6-22, 2016.
- [45] L. A. Oldecop, L. Garino, J. J. Muñoz, R. Rodriguez, C. García, “Unsaturated behaviour of mine tailings in low precipitation areas,” *Unsaturated soils*, London, CRC Press/Balkema, 2011, pp. 1425-1430.
- [46] B. Lottermoser, *Mine Wastes: Characterization, Treatment and Environmental Impacts*, Berlin, Heidelberg, New York: Springer, 2007.
- [47] L. N. Bowker, D. Chamber, “TSF failures 1915 – 2017,” Bowker Associates Science And Research In The Public Interest, 2017.
- [48] J. Caldwell, “The History of Risk Assessment of Tailings Facilities,” Robertson Geoconsultants, Vancouver, Canada, 2016.
- [49] J. D. Nelson, R. L. Volpe, R. E. Wardwell, S. H. Schumm, W. P. Staub, “Design Considerations for Long-Term Stabilization of Uranium Mill Tailings Impoundments,” U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, Report No. NUREG/CR-3397 (ORNL-5979), 1983.

- [50] D. V. Zyl, A. M. Robertson, "A Probabilistic Approach to the Long-term Stability of Uranium Tailings Impoundments," *International Journal of Surface Mining*, vol. 1, pp. 83-90, 1987.
- [51] O. Steffen, "The design of tailings dam stability using risk evaluation concepts," *Tailings Disposal Today – Second Conference*, Denver, Colorado, 1987.
- [52] Z. Xin, X. Xiaohu, X. Kaili, "Study on the Risk Assessment of the Tailings Dam Break," *Procedia Engineering*, vol. 26, pp. 2261-2269, 2011.
- [53] W. Pytel, "Current practice in tailings ponds risk assessment," *Cuprum*, vol. 55, no. 2, pp. 5-42, 2010.
- [54] Australian Geomechanics Society, "Landslide Risk Management Concepts and Guidelines", *Australian Geomechanics: Journal and News of the Australian Geomechanics Society*, vol. 35, no. 1, pp. 49-92, 2000.
- [55] J. F. V. Berghe, J. C. Ballard, J. F. Wintgens, B. List, "Geotechnical risks related to tailings dam operations," *Proceedings Tailings and Mine Waste*, Vancouver, 2011.
- [56] M. Jovanović, „Uputstvo za izradu tehničke dokumentacije o hidrauličkim posledicama rušenja ili oštećenja brana na deponijama jalovine,” Društvo za visoke brane Srbije, Beograd, 2005.
- [57] H. McLeod, L. Murray, "Tailings dam versus water dam, what is the design difference?," *ICOLD Symposium on Major Challenges in Tailings Dams*, Klohn Crippen Berger Ltd., Canada, 2003.
- [58] A. Bjelkevik, "Water cover closure design for tailings dams: state of the art report," Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, Report No. 2005:19, 2005.
- [59] N. Lemphers, "Could the Hungarian tailings dam tragedy happen in Alberta?," 2010. [Na mreži]. Dostupno na: <http://www.pembina.org/blog/could-hungarian-tailings-dam-tragedy-happen-alberta>. [Pristupljeno: 17.09.2017].
- [60] M. Jovanović, "Problemi numeričke simulacije poplavnih talasa izazvanih rušenjem brana od jalovine," *Kongres jugoslovenskog društva za visoke brane*, Budva, 1997.
- [61] G.E. Blight, *Geotechnical Engineering For Mine Waste Storage Facilities*, London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2009.
- [62] A. Dalpatram, *Estimation of dam break discharges*, Workshop on Dam Break Analysis Applied to Tailings Dams, Denver, 2011.
- [63] FEMA, *Research Needs Workshop: Embankment Dam Failure Analysis*, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, 2004.
- [64] European Commission, DG Environment, "Classification of mining waste facilities," DHI Water Environment Health in cooperation with SGI, Swedish Geotechnical Institute and AGH, University of Science and Technology, Krakow, Final Report No. 07010401/2006/443229/MAR/G4, 2007.

- [65] “Directive 2006/21/EC of the European Parliament and of the Council of 15 March 2006 on the management of waste from extractive industries and amending Directive 2004/35/EC – Statement by the European Parliament, the Council and the Commission,” *Official Journal of the European Union*, European Parliament, vol. L 102/15, 2006.
- [66] Homeland Security Digital Library, “Final Report on the TVA Kingston Fossil Plant Ash Spill,” *Center for Homeland Defense and Security*, 2009. [Na mreži]. Dostupno na: <https://www.hsdl.org/c/final-report-on-the-tva-kingston-fossil-plant-ash-spill/>. [Pristupljeno 16.05.2018].
- [67] *Recommended Guidelines for Safety Inspection of Dams*, Department of the Army – Office of the Chief of Engineers, Washington DC, 1979, No. ER 1110-2-106.
- [68] ICOLD, *Small dams design, surveillance and rehabilitation – ICOLD Bulletin No 143*, Paris: International Committee on Large Dams, 2011.
- [69] *Guidelines for Design, Construction and Monitoring*, Paris: French Committee on Dams and Reservoirs, 1997.
- [70] ICOLD, *Selecting Seismic Parameters for Large Dams – ICOLD Bulletin 72*, Paris: International Committee for Large Dams, 1989.
- [71] NZSOLD, *New Zealand Dam Safety Guidelines – Objectives and Principles*, Wellington: New Zealand Society on Large Dams, 2015.
- [72] S. G. Cvetanović, „Integralni model sistemskog pristupa upravljanja rizikom od hemijskih udesa na lokalnom nivou,“ Doktorska disertacija, Univerzitet u Nišu, Fakultet zaštite na radu, Niš, Srbija, 2015.
- [73] “Environmental Situation and Policy Review: 1972-2002,” The United Nations, 2002.
- [74] H. U. Zi-Nan, L. I. Guo-Qing, H. U. Nai-Lian, “Research on Catastrophe Risk Financing Mode for Tailings Pond Dam Break,” *Joint International Conference on Economics and Management Engineering (ICEME 2016) and International Conference on Economics and Business Management (EBM 2016)*, Wuhan, China, 2016.
- [75] *Information and methodology of sigma explorer data*, Swiss Re Institute, Zurich, 2016.
- [76] L. N. Bowker, D. Chamber, “The risk, public liability & economics of tailings storage facility failures,” *Research Paper. Stonington, ME*, 2015.
- [77] D. Miedema, “Selected Case Histories of Dam Failures and Accidents caused by Internal Erosion,“ Bureau of Reclamation, Denver, Colorado, No: DSO-04-05, 2004.
- [78] M.P. Davies, T.E. Martin, P.C. Lighthall, “Mine tailings dams: when things go wrong,“ *Tailing Dams*, pp. 261-273, 2000.
- [79] E. Smith, “Tailings disposal – failures and lessons,“ *Tailings Disposal Today, Proceedings of 1st International Symposium*, Tucson, 1972.
- [80] F. O. J. Caldwell, C. Oboni, C. Oboni, “Tailings Facility Failures in 2014 and an Update on Failure Statistics,“ *Proceeding Tailings and Mine Waste*, 2015.

- [81] M. Rico, G. Benito, A. R. Salgueiro, A. Díez-Herrero, H. G. Pereira, “Reported tailings dam failures: a review of the European incidents in the worldwide context,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 152, no. 2, pp. 846-852, 2008.
- [82] USCOLD, “Tailings Dam Incidents,” US Committee on Large Dams, Denver, Colorado, 1994.
- [83] F. Luino, J. V. De Graff, “The Stava mudflow of 19 July 1985 (Northern Italy): a disaster that effective regulation might have prevented,” *Natural Hazards and Earth System Sciences*, vol. 12, no. 4, pp. 1029-1044, 2012.
- [84] Z. Wei, G. Yin, J. G. Wang, L. Wan, G. Li, “Design Construction and Management of Tailings Storage Facilities For Surface Disposal In China: Case Studies of Failures,” *Waste Management And Research*, vol. 31, pp. 106-112, 2012.
- [85] E. Schoenberger, “Environmentally sustainable mining: The case of tailings storage facilities.,” *Resources Policy*, vol. 49, pp. 119-128, 2016.
- [86] C. Klassen, S. Ennis, “Tailings Storage Facility Conceptual Closure Plan Alternatives Assessment,” Norwest Corporation, Vancouver, British Columbia, 2015.
- [87] D. M. Franks, D. V. Boger, C. M. Côte, D. R. Mulligan, “Sustainable development principles for the disposal of mining and mineral processing wastes,” *Resources policy*, vol. 36, no. 2, pp. 114-122, 2011.
- [88] J. H. Troncoso, “Failure risks of abandoned tailings dams,” *Proceedings of the International Symposium on Safety and Rehabilitation of Tailings Dams*, ICOLD, pp. 82-889, 1990.
- [89] D. Kossoff, W. E. Dubbin, M. Alfredsson, S. J. Edwards, M. G. Macklin, K. A. Hudson-Edwards, “Mine tailings dams: characteristics, failure, environmental impacts, and remediation,” *Applied Geochemistry*, vol. 51, pp. 229-245, 2014.
- [90] D. Knežević, D. Nišić, R. Tomanec, D. Randelović, *Karakterizacija i upravljanje industrijskim otpadom*, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2018.
- [91] Stantec Consulting, “Dam Safety Review (DSR) Gullbridge Mine, Newfoundland,” Government of Newfoundland Labrador Natural Resources, Fredericton, Canada, Project No. 1216130652012, 2012.
- [92] M. Barker, A. Black, “Use of risk analysis for tailings storage facility upgrade,” *Commission Internationale des Grands Barrages, ICOLD Congress, Q.98*, Stavanger, 2015.
- [93] A. Aydemir, A. Güven, “Modified risk assessment tool for embankment dams: case study of three dams in Turkey,” *Civil Engineering and Environmental Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 53-67, 2017.

- [94] E. Sun, X. Zhang, Z. Li, Y. Wang, "Tailings dam flood overtopping failure evolution pattern," *Procedia Engineering*, vol. 28, pp. 356-362, 2012.
- [95] G. Gjetvaj, „Mogućnosti povećanja stabilnost hidrotehničkih nasipa,” *Hrvatska konferencija o vodama*, Zagreb, 2011.
- [96] Y. Zhu, "Breach Growth in Clay-Dikes," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, Netherlands, 2006.
- [97] G. Villavicencio, P. Breul, C. Bacconnet, A. Fourie, R. Espinace, "Liquefaction potential of sand tailings dams evaluated using a probabilistic interpretation of estimated in-situ relative density," *Revista de la Construcción*, vol. 15, no. 2, pp. 9-18, 2016.
- [98] P. Anbazhagan, "Introduction to Engineering Seismology – Lecture 15: Introduction to Liquefaction; Mechanism and factors causing liquefaction; estimation methods and procedures; Mapping," 2011. [Na mreži]. Dostupno na: <http://nptel.ac.in/courses/105108076/module5/lecture15.pdf>. [Pristupljeno: 15.08.2018.]
- [99] R. Boulanger, I. M. Idriss, "Liquefaction susceptibility criteria for silts and clays," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, vol. 132, no. 11, pp. 1413-1426, 2006.
- [100] T. L. Youd et al, "Liquefaction resistance of soils: Summary report from the 1996 NCEER and 1998 NCEER NSF workshops on evaluation of liquefaction resistance of soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 127, no. 10, pp. 817-833, 2001.
- [101] B. Grujić, I. Jokanović, D. Zeljić, Ž. Grujić, "Mjere za sprečavanje likvefakcije usled dinamičkog opterećenja," *Zbornik radova sa međunarodne konferencije "Savremena dostignuća u građevinarstvu"*, Subotica, Srbija, 2016.
- [102] J. N. Hutchinson, "General Report: morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology," *Proceedings of 5th International Symposium on Landslides*, Lausanne, 1989.
- [103] R. Flores-Berrones, N. P. Lopez-Acosta, "Internal Erosion Due to Water Flow Through Earth Dams and Earth Structures, Soil Erosion Danilo Godone and Silvia Stanchi," IntechOpen 2011. [Na mreži]. Dostupno na: <https://www.intechopen.com/books/soil-erosion-studies/internal-erosion-due-to-water-flow-through-earth-dams-and-earth-structures>. [Pristupljeno: 03.03.2018].
- [104] J. G. I. Hellström, S. Lundström, H. Mattsson, "Fluid mechanics of internal erosion in embankment dams," 2007. [Na mreži]. Dostupno na: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:994178/FULLTEXT01.pdf>. [Pristupljeno: 10.05.2018.]
- [105] K. S. Richards, K. R. Reddy, "Critical appraisal of piping phenomena in earth dams," *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, vol. 66, pp. 382-402, 2007.

- [106] H. B. Seed, J. M. Duncan, "The Teton dam failure—a retrospective review," *Proceedings of the 10th international conference on soil mechanics and foundation engineering*, Stockholm , 1981.
- [107] R. P. Hunter, "Development of transparent soil testing using planar laser induced fluorescence in the study of internal erosion of filters in embankment dams," M.Sc thesis, University of Canterbury, Christchurch, New Zealand, 2012.
- [108] ICOLD, *Internal erosion of existing dams, levees and dykes, and their foundations. Bulletin 164, Volume 1: Internal erosion processes and engineering assessment*, Paris: International Commission on Large Dams, 2013.
- [109] R. Fell, M. Foster, R. Davidson, J. Cyganiewicz, G. Sills, N. Vroman, "Seepage and piping toolbox-initiation of internal erosion," *28th Annual United States Society on Dams Conference: The Sustainability of Experience – Investing in the Human Factor*, Denver, 2008.
- [110] P. J. Visser, "Breach growth in sand-dikes," Ph.D. dissertation, Delft University of Technology, Delft, Nederland, 1998.
- [111] J. L. Briaud, "Case histories in soil and rock erosion: Woodrow Wilson bridge, Brazos river meander, Normandy cliffs and New Orleans levees," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 10, pp. 1424-1447, 2008.
- [112] E. S. Smith, D. H. Connell, "The role of water in the failure of tailings dams," *Proceeding of the First International Mine Drainage Symposium*, Denver, Colorado, USA, 1979.
- [113] *Projektovanje nasutih nasipa i hidrotehničkih nasipa - tehnički uslovi*, Standard SRPS.U.C5.020:1980
- [114] European Commission, "Reference Document on Best Available Techniques for Management of Tailings and Waste-Rock in Mining Activities," Institute for Prospective Technological Studies, Sustainability in Industry, Energy and Transport, European IPPC , Seville, 2004.
- [115] M. B. Szymanski, M. P. Davies, "Tailings dams: design criteria and safety evaluations at closure," *Proceedings of British Columbia Reclamation Symposium. UNEP (United Nations Environment Programme)*, 2009.
- [116] W. X. Wang, P. Cao, Y. K. Liu, Y. X. Wang, H. Yang, "Analysis on stability of tailing pond under earthquake," *Journal of Safety science and Technology*, vol. 6, no. 016, 2006.
- [117] F. I. Makdisi, H. B. Seed, "Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformations," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 104, 1978.
- [118] F. Silva, T. W. Lambe, W. A. Marr, "Probability and risk of slope failure," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 134, no. 12, pp. 1691-1699, 2008.

- [119] M. Smith, "Influence of uncertainty in the stability analysis of dam foundation," *Proceedings of International Conference "Dam Maintenance and Rehabilitation"*, Madrid, 2003.
- [120] N. Morgenstern, S. Vick, C. Viotti, B. Watts, "Fundão Tailings Dam Review Panel Report on the Immediate Causes of the Failure of the Fundão Dam." Cleary Gottlieb Steen & Hamilton LLP, New York, 2016.
- [121] J. Herza, M. Ashley, J. Thorp, "Factor of Safety?-Do we use it correctly?," *ANCOLD Conference*, 2017.
- [122] J. Herza, J., Phillips, "Design of dams for mining industry," *ICOLD Conference*, Prague, Czech Republic, 2017.
- [123] ANCOLD, *Guidelines for design of dams and appurtenant structures for earthquake*, Hobart: Australian National Committee on Large Dams, 2016.
- [124] ANCOLD, *Guidelines on tailings dams – Planning, design, construction, operation and closure*, Hobart: Australian National Committee on Large Dams, 2012.
- [125] ANCOLD, *Guidelines for design of dams for earthquake*, Hobart: Australian National Committee on Large Dams, 1998.
- [126] M. A. Zardari, "Stability of tailings dams: focus on numerical modelling," Ph.D. dissertation, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2011.
- [127] P. V. Lade, J. A. Yamamuro, "Effects of nonplastic fines on static liquefaction of sands," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 34, no. 6, pp. 918-928, 1997.
- [128] L. A. T. Cruz, "Assessment of two cone penetration test based methods for evaluating the liquefaction potential of tailings dams," University of the Witwatersrand, Faculty of Engineering and the Built Environment, Johannesburg, 2011.
- [129] P. K. Robertson, C. E. Wride, "Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 35, no. 3, pp. 442-459, 1998.
- [130] J. F. Lupo, "Tailings properties and their effect on flow," Library Mine- InfoMine, 2011.
- [131] S. M. Olson, T. D. Stark, "Liquefied strength ratio from liquefaction flow failure case histories," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 39, no. 3, pp. 629-647, 2002.
- [132] S. M. Olson, T. D. Stark, "Use of laboratory data to confirm yield and liquefied strength ratio concepts," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, no. 6, pp. 1164-1184, 2003.
- [133] P. V. Lade, "Instability and liquefaction of granular materials," *Computers and Geotechnics*, vol. 16, no. 2, pp. 123-151, 1994.
- [134] R. A. Green, K. Ziotopoulou, "Overview of screening criteria for liquefaction triggering susceptibility," *Proceedings of the 10th Pacific Conference on Earthquake Engineering*, Sydney, Australia, 2015.
- [135] T. G. Harper, H. N. McLeod, M. P. Davies, "Seismic assessment of tailings dams," *Civil Engineering*, vol. 62, no. 12, pp. 64-66, 1992.

- [136] N. J. Vermeulen, "The composition and state of gold tailings," Ph.D. dissertation, University of Pretoria, Faculty of Engineering, Pretoria, Republic of South Africa, 2007.
- [137] R. Espandar, M. Locke, J. Faithful, "A Unique Experience with Liquefaction Assessment of Impounded Brown Coal Ash," *ANCOLD Conference*, Hobart, Tasmania, Australia, 2017.
- [138] A. J. Susilo, "Enhancing the strength properties of fly ash by adding waste products", Ph.D. dissertation, University of Kentucky, Kentucky, USA, 2016.
- [139] G. N. Richardson, E. Kavazanjian Jr., N. Matasoric, "RCRA Subtitle D (258) Seismic Design Guidance for Municipal Solid Waste Landfill Facilities, EPA/600/R-95/051," U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C., 1995.
- [140] K. T. Law, J. G. Z. Q. Wang, *Siting in Earthquake Zones*, Rotterdam: CRC Press, 1994.
- [141] M. M. Monkul, J. A. Yamamuro, "Influence of silt size and content on liquefaction behavior of sands," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 48, no. 6, pp. 931-942, 2011.
- [142] H. B. Seed, K. Tokimatsu, L. F. Harder, R. M. Chung, "Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations," *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, vol. 111, no. 12, pp. 1425-1445, 1985.
- [143] W. F. Marcuson, M. E. Hynes, A. G. Franklin, "Evaluation and Use of Residual Strength in Seismic Safety Analysis of Embankments," *Earthquake Spectra*, vol. 6, no. 3, pp. 529-572, 1990.
- [144] T. Shibata, W. Taparaska, "Evaluation of Liquefaction Potentials of Soils Using Cone Penetration Tests," *Soils and Foundation*, vol. 28, no. 2, pp. 49-60, 1988.
- [145] W. Wang, "Some findings in soil liquefaction," Earthquake Engineering Department, Water Conservancy and Hydroelectric Power Scientific Research Institute, Beijing, China, 1979.
- [146] H. B., Seed, I. M. Idriss, "Ground Motions and Soil Liquefaction During Earthquakes: Engineering Monographs on Earthquake Criteria, Structural Design, and Strong Motion Records," *Monograph No. 5*, Oakland, California, Earthquake Engineering Research Institute, 1982, p. 134.
- [147] D. C. Andrews, G. R. Martin, "Criteria for liquefaction of silty soils," *Proceeding of 12th World Conf. on Earthquake Engineering*, Upper Hutt, New Zealand, 2000.
- [148] R. B., Seed et al., "Recent Advances in soil liquefaction engineering: A unified and consistent framework," Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, Report No. EERC 2003-06, 2003.
- [149] M. Pehlivan, "Assessment of liquefaction susceptibility of fine-grained soils," Ph.D. dissertation, Middle East Technical University, Ankara, Turkey, 2009.

- [150] R. Sancio, J. K. R. Bray, "Assessment of the liquefaction susceptibility of fine grained soils," *Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE*, vol. 132, no. 9, pp. 1165-1177, 2006.
- [151] S. Iai, K. Koizumi, H. Tsuchida, "A new criterion for assessing liquefaction potential using grain size accumulation curve and N-value," Report of the Port and Harbour Research Institute, (in Japanese), Port and Harbour Research Institute, Report vol. 25, no. 3, 1986.
- [152] S. Iai, H. Tsuchida, K. Koizumi, "A liquefaction criterion based on field performances around seismograph stations," *Soils and Foundations*, vol. 29, no. 2, pp. 52-68, 1989.
- [153] C. Zhou, X. M., Xu, Y. P. Cheng, "Effect of particle size distribution on the correlation between liquefaction resistance and shear wave velocity of granular soils," *EPJ Web of Conferences*, 2017.
- [154] R. Bhanbhro, "Mechanical Properties of Tailings: Basic Description of a Tailings Material from Sweden", Ph.D. dissertation, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden, 2014.
- [155] Geotechnical Engineering Bureau, "Geotechnical design procedure - liquefaction potential of cohesionless soils", Geotechnical Engineering Bureau, Department of Transportation, New York, No. EB 15-025, 2015.
- [156] J. Troncoso, "Envejecimiento y estabilidad sísmica de un depósito de residuos minerales en condición de abandono," *Apuntes de Ingeniería*, vol. 22, pp. 147-158, 1986.
- [157] K. Ishihara, "Liquefaction and flow failure during earthquakes," *Geotechnique*, vol. 43, no. 3, pp. 351-451, 1993.
- [158] C. S. Hitchcock, R. C. Loyd, W. D. Haydon, "Mapping liquefaction hazards in Simi Valley, Ventura County, California," *Environmental & Engineering Geoscience*, vol. 5, no. 4, pp. 441-458, 1999.
- [159] J. J. Castleton, A. Elliott, G. N. McDonald, "Geologic Hazards of the Magna Quadrangle, Salt Lake County, Utah," Utah Geological Survey, Salt Lake County, Utah, Special Study 137, 2011.
- [160] R. B. Seed, L. F. Harder, "SPT-based analysis of cyclic pore pressure generation and undrained residual strength," *H. Bolton Seed Memorial Symposium Proceedings*, 1990.
- [161] S. Radovanović, „Karte seizmičkog hazarda Srbije,“ *Republički seizmološki zavod*, n.d. [Na mreži]. Dostupno na: http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karta_hazarda-izvod_iz_tumaca_lat.pdf. [Pristupljeno: 16.10.2018.]
- [162] RSZ, „Karta seizmičkog hazarda Republike Srbije za povratni period od 96, 475 i 975 godina – po parametru makroseizmičkog intenziteta,“ *Republički seizmološki zavod*. 2018. [Na mreži]. Dostupno na: http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karte_hazarda_1.htm. [Pristupljeno: 16.10.2018.]
- [163] ICOLD, *Sustainable design and post-closure performance of tailings dams – B 153*, Paris: International Committee for Large Dams, 2011.

- [164] RSZ, „Kratak opis stepena seizmičkog intenziteta evropske makroseizmičke skale EMS-98,“ *Republički seizmološki zavod*, n.d. [Na mreži]. Dostupno na: http://www.seismo.gov.rs/Seizmichnost/Skala_ostecenja-lat.pdf. [Pristupljeno: 16.10.2018.]
- [165] Lj. Vajda, P. Anagnosti, "Oštećenja i rušenja nasutih brana- iskustva i preporuke," *Građevinski kalendar*, pp. 159-196, 2000.
- [166] UNEP, "Environmental management of mine sites," United Nations Environment Programme, Nairobi, Technical Report No. 30, 1994.
- [167] G. E. Blight, "Destructive mudflows as a consequence of tailings dyke failures," *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Geotechnical Engineering*, 1997.
- [168] A. B. Fourie, G. E. Blight, G. Papageorgiou, "Static liquefaction as a possible explanation for the Merriespruit tailings dam failure," *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 38, no. 4, pp. 707-719, 2001.
- [169] R. J. Chandler, G. Tosatti, "The Stava tailings dams failure, Italy, July 1985," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanics Abstracts*, vol. 1, no. 33, p. 35A, 1995.
- [170] J. S. Prohaska, *Hidrologija I deo*, Beograd, Srbija: Rudarsko-geološki fakultet, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi" i RHMZ Srbije, 2003.
- [171] RGF, „Hidrologija i procena kapaciteta jalovišta u kopu "Jezero",“ Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd, Studija, 2015.
- [172] WMO, “Manual on Estimation of Probable Precipitation (PMP) - No. 1045,“ World Meteorological Organization, Geneva, 2009.
- [173] J. J. Sherard, “Influence of soil properties and construction methods on the performance of homogeneous earth dams,” U.S. Bureau of Reclamation, Denver, Technical Memorandum No. 6451953., 1953.
- [174] *Best Practices in Dam and Levee Safety Risk Analysis*, U.S. Department of Interior, Bureau of Reclamation, U.S. Army Corps of Engineers, Washington, 2015.
- [175] A. Akkerman, P. Eng, V. Martin, "Assessing credible modes of failure: Afton TSF dam breach study.," *Proceedings of Tailings Mine Waste 2015 Conference*, 2015.
- [176] National Research Council, *Safety of Existing Dams: Evaluation and Improvement*, Washington, D.C: The National Academies Press, 1983.
- [177] T. H. Wu, L. M. Kraft, "The probability of foundation safety," *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, vol. 93, no. 5, pp. 213-231, 1967.
- [178] F. Silva, T. W. Lambe, W. A. Marr, "Closure to “Probability and Risk of Slope Failure”,“ *Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering*, vol. 136, no. 5, pp. 769-771, 2010.

- [179] D. R. Vanden Berge, A. J. Esser, "Discussion of "Probability and Risk of Slope Failure" by F. Silva, T.W. Lambe and W.A. Marr," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 136, no. 5, pp. 765-769, 2010.
- [180] A. H. Ang, W. H. Tang, *Probability concepts in engineering planning and design, Vol. II: Design, Risk and Reliability*, New York: Wiley & Sons, 1984.
- [181] R. T. Reagan, F. Mosteller, C. Youtz, "Quantitative meanings of verbal probability expressions," *Journal of applied psychology*, vol. 74, no. 3, p. 433, 1989.
- [182] S. H. Emerman, "Prediction of Transport of Mine Tailings following Failure of an Earthen Dam on the Rio Quimi, Ecuador," *E-Tech International*, 2014.
- [183] J. L. M. Clemente, R. E. Snow, C. Bernedo, C. L. Strachan, A. Fourie, "Dam Break Analysis Applied to Tailings Dams: USSD Workshop Summary and Perspectives," *Proceedings of the 33rd Annual USSD Conference*, Phoenix, Arizona, 2013.
- [184] Institut za hidrotehniku i vodno ekološko inženjerstvo, „Elaborat o obaveštavanju i uzbunjivanju stanovništva na području ugroženom od rušenja brane br. 9 - Rudnik“, Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, Beograd, 2007.
- [185] D. Komatina, M. Jovanovic, "Experimental Study of Steady and Unsteady Free-Surface Flows with Water-Clay Mixtures," *Journal of Hydraulic Research*, vol. 35, no. 5, pp. 579-590, 1997.
- [186] J. K. Jeyapalan, "Dam-break studies for mine tailings impoundments," *Uranium Mill Tailings Management. Proceedings of the Fifth Symposium*, Fort Collins, Colorado, 1982.
- [187] C. A. Shook, M. C. Roco, *Slurry flow: principles and practice*, Stoneham: Butterworth-Heinemann, 1991.
- [188] D. Vučinić, S. Popov, *Fizička hemija*, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2014.
- [189] D. Knežević, B. Kolonja, R. Stanković, *Hidraulički transport mineralnih sirovina*, Beograd: Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, 1996.
- [190] I. I. Agroskin, G.T. Dmitrijev, F.I. Pikalov, *Hidraulika*, Zagreb: Tehnička knjiga, 1995.
- [191] E. J. Wasp, J. P. Kenny, R. L. Gandhi, *Solid-liquid flow: Slurry Pipeline Transportation; Series on Bulk Materials Handling, Vol. 1*, Clausthal: Trans Tech Publications, 1977.
- [192] A. G. Bain, S. T. Bonnington, *The hydraulic transport of solids by pipeline*, New York: Pergamon Press, 1970.
- [193] D. V. Boger, P. J. Scales, F. Sofra, "Rheological Concepts", *Paste and Thickened Tailings—A Guide (Second Edition)*, Perth, Australia, Australian Centre for Geomechanics, 2006, pp. 25-37.
- [194] M. Jovanović, R. Kapor, D. Komatina, D. Đorđević, N. Stefanović, V. Jančić, „Numerička simulacija hidrauličkih posledica havarija nasipa na pepelištima," *Vodoprivreda*, 2003.

- [195] X. Wang, "Geotechnical analysis of flow slides, debris flows, and related phenomena," Ph.D. dissertation, University of Alberta, Edmonton, Alberta, 2008.
- [196] HAC Meintjes, "Risk assessment and flow failure assessments, " SRK Consulting, 2010.
- [197] C. Wels, A. M. Robertson, A. T. Jakubick, *A Review of Dry Cover Placement on Extremely Weak, Compressible Tailings, CIM Bulletin Vol. 93 (1043)*, Montreal: Canadian Institute of Mining, Metallurgy and Petroleum, 2000.
- [198] J. Spiers, "Methods for Treatment of Mine Tailings - rheological and geotechnical characteristics," SRK Consulting, 2010.
- [199] R. Jewell, "Introduction," *Paste and thickened tailings - A guide*, Nedlands, Western Australia, Australian Centre for Geomechanics, The University of Western Australia., 2006, pp. 3-9.
- [200] R. Craig, *Craig's Soil Mechanics (7th Edition)*, London: CRC Press, 2004.
- [201] G. E. Blight, M. J. Robinson, J. A. C. Diering, "The flow of slurry from a breached tailings dam," *Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 81, no. 1, pp. 1-8, 1981.
- [202] D. L. Fread, "DAMBRK: The NWS dam-break flood forecasting model (Vol. 4)," Hydrologic Research Laboratory, National Weather Service, Maryland, USA, 1984.
- [203] V. Martin, A. Akkerman, "Challenges with conducting tailings dam breach studies," *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2015*, Vancouver, Canada, 2015.
- [204] D. M. Cruden, D. J. Varnes, "Landslide Investigation and Mitigation - Landslide types and processes," U.S. National Research Council, Washington, D.C., Transportation Research Board, Special Report 247, 1996.
- [205] J. K. Jeyapalan, J. M. Duncan, H. B. Seed, "Summary of research on analyses of flow failures of mine tailings impoundments," *Information Circular 8857, Technology Transfer Workshop on Mine Waste Disposal Techniques*, 1981.
- [206] M. Pirulli, "Tailings dam post-failure flow dynamics: analysis of the rheological behaviour," *JTCI Workshop on Advances in Landslide Understanding*, Barcelona, 2017.
- [207] M. Ai-Hamad, H. M. Duwairi, "Effect of Heat Generation/Absorption on Heat Transfer for a Non-Newtonian Fluid," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 26, pp. 115-120, 2013.
- [208] M. Coppi, A. Quintino, F. Salata, "Fluid Dynamic Feasibility Study of Solar Chimney in Residential Buildings," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 29, pp. 1-5, 2011.
- [209] T. C. Pierson, J. E. Costa, "A rheological classification of subaerial sediment-water flows," *Debris Flow/Avalanches: Process, Recognition and Mitigation; Reviews Engineering Geology*, vol. VII, pp. 1-12, 1987.

- [210] CDA, *Application of Dam Safety to Mining Dams*, Toronto: Canadian Dam Association (CDA), 2013.
- [211] D. Fontaine, V. Martin, "Tailings mobilization estimates for dam breach studies," *Proceedings of Tailings and Mine Waste 2015*, Vancouver, Canada, 2015.
- [212] P. Byrne, K. A. Hudson-Edwards, G. Bird, M. G. Macklin, P. A. Brewer, R. D. Williams, H. E. Jamieson, "Water quality impacts and river system recovery following the 2014 Mount Polley mine tailings dam spill, British Columbia, Canada," *Applied Geochemistry*, vol. 91, pp. 64-74, 2018.
- [213] M. Rico, G. Benito, A. Diez-Herrero, "Floods from tailings dam failures," *Journal of Hazardous Materials*, vol. 154, no. 1, pp. 79-87, 2008.
- [214] S. Azam, Q. Li, "Tailings dam failures: a review of the last one hundred years," *Geotechnical News*, vol. 28, no. 4, pp. 50-54, 2010.
- [215] V. K. Garga, M. A. Khan, "Review and comparison of a deterministic model for estimating flow out distance of breached tailings," Resources Canada, Mining Research Laboratory, Canada, 1995.
- [216] P. C. Lucia, J. M. Duncan, H. B. Seed, "Summary on Research on Case Histories of Flow Failure of Mine Tailings Impoundment," *Mine Waste Disposal Technology Proceedings, Bureau of Mine Technology Transfer Workshop*, Denver, 1981.
- [217] L. Hu, H. Wu, L. Zhang, P. Zhang, Q. Wen, "Geotechnical Properties of Mine Tailings," *Journal of Materials in Civil Engineering*, vol. 29, no. 2, p. 04016220, 2016.
- [218] J. Du, L. Hu, D. Lin, L. Zhang, "Experimental Study on Physical and Mechanical Properties of Iron Tailing Materials," *Proceedings of GeoShanghai 2018 International Conference: Rock Mechanics and Rock Engineering*, Singapore, 2018.
- [219] A. B. Fourie, B. A. Hofmann, R. J. Mikula, E. R. F. Lord, P. K. Robertson, "Partially saturated tailings sand below the phreatic surface," *Geotechnique*, vol. 51, no. 7, pp. 577-585, 2001.
- [220] S. X. Zhang, L. T. Qi, Q. Li, Q. Zhang, P. Shi, "Numerical simulation of the characteristics of debris flow from a tailing pond dam break," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 127-132, 2015.
- [221] S. X. Zhang, L. T. Zhang, Q. Qi, Q. Li, P. Shi, "Numerical simulation of the characteristics of debris flow from a tailing pond dam break," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 33, no. 3, pp. 127-132, 2015.
- [222] WISE, "Tailings Flow Slide Calculator," World Information Service on Energy (WISE), [Na mreži]. Dostupno na: <http://www.wise-uranium.org/ctfs.html>. [Pristupljeno: 15.02.2017.]

- [223] L. A. Lemus, J. Palacios, R. Espinace, "Criteria for determining the run-out distance in tailings dams," *2nd International Seminar on Tailings Management*, Antofagasta, Chile, 2014.
- [224] S. Conners, E. Hadley, M. Hansen, S.H. Emerman, "Reassessment of a Tailings Flow Slide Calculator, abstract," *Hydrology Days 2017*, 2017.
- [225] G. E. Blight, A. B. Fourie, "A review of catastrophic flow failures of deposits of mine waste and municipal refuse," International Workshop on occurrence and mechanisms of flow in natural slopes and earthfills, 2003.
- [226] J. Kunkel, "Downstream Modeling of Tailings Flow from Failure of a 380-ft High Tailing Dam," *USSD Workshop*, Denver, Colorado, 2011.
- [227] O. Hungr, S. Evans, M. Bovis, J. Hutchinson, "Review of the classification of landslides of the flow type," *Environmental and Engineering Geoscience*, vol. 7, pp. 221-238, 2001.
- [228] W. J. Graham, "A procedure for estimating loss of life caused by dam failure," United States Department of Interior, Bureau of Reclamation, Dam Safety, Denver, Colorado, Rep. DSO-99-06, 1999.
- [229] R. Pérez-López, R. Sáez, A. M. Álvarez-Valero, J. M. Nieto, G. Pace, "Combination of sequential chemical extraction and modelling of dam-break wave propagation to aid assessment of risk related to the possible collapse of a roasted sulphide tailings dam," *Science of the total environment*, vol. 407, no. 21, pp. 5761-5771, 2009.
- [230] R. Liu, J. Liu, Z. Zhang, A. Borthwick, K. Zhang, "Accidental water pollution risk analysis of mine tailings ponds in Guanting reservoir watershed, Zhangjiakou city, China," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 12, no. 15269-15284, p. 12, 2015.
- [231] W. J. Graham, "Risk-Based Dam Safety Prioritization - A Method for Easily Estimating the Loss of Life from Dam Failure, Draft," 2004.
- [232] S. N. Jonkman, *Loss of life estimation in flood risk assessment. Theory and application.*, Delft: Civil Engineering Faculty, Technical University of Delft, 2007.
- [233] DHS, *Estimating Economic Consequences for Dam Failure Scenarios*, Washington D.C.: US Department of Homeland Security, 2011.
- [234] F. Messner, V. Meyer, "Flood damage, vulnerability and risk perception—challenges for flood damage research," *In Flood risk management: hazards, vulnerability and mitigation measures*, Dordrecht, Springer, 2006, pp. 149-167.
- [235] A. Elsner, S. Mai, V. Meyer, C. Zimmermann, "Integration of the flood risk in coastal hinterland management," *Proceedings of the International Conference CoastGis*, Genua, Italy, 2003.

- [236] J. O. Cantos, "Spatial planning processes, territorial planning law and flood risk in the region of Valencia (Spain)," *Risks Challenging Publics, Scientists and Governments*, CRC press, 2010, p. 191.
- [237] E. A. McBean, J. Gorrie, M. Fortin, J. Ding, R. Moulton, "Flood Dept - Damage Curves By Interview Survey" *Journal of Water Resources Planning and Management*, vol. 114, no. 6, pp. 613-634, 1988.
- [238] Ministry of Construction, "Outline of River Improvement Economic Research Investigation," River Planning Section, River Department, National Government of Japan, (in Japanese), 1996.
- [239] Savezni zavod za statistiku, "Uputstvo o jedinstvenoj metodologiji za procenu šteta od elementarnih nepogoda, Sl. list SFRJ, br. 27/87, Beograd, 1987.
- [240] Ministarstvo unutrašnjih poslova, „Uputstvo o metodologiji za izradu procene ugroženosti od elementarnih nepogoda i drugih nesreća i planova zaštite i spasavanja u vandrednim situacijama,“ Službeni Glasnik Republike Srbije, br. 8/11, Beograd, 2017.
- [241] "Smjernice za izradu procjene rizika od velikih nesreća za područje Zadarske županije," Zadarska županija, Zadar, 2017.
- [242] Republička agencija za prostorno planiranje Republike Srbije, "Prostorni plan Republike Srbije 2010-2020," 'Službeni Glasnik RS, br. 88/10, Beograd, 2010.
- [243] J. Aleksić, Z. Dragosavljević, M. Adžemović, *Metodologija procene ekološke štete*, Beograd: Fakultet za primenjenu ekologiju "Futura", Univezitet Singidunum, 2012.
- [244] B. L. Leopold, E. F. Clarke, B. B. Hanshaw, J. R. Balsley, *A Procedure for Evaluating Environmental Impact*, Washington, D.C.: US Department of the Interior, 1971.
- [245] ANCOLD, *Guidelines on the Consequence Categories for Dams*, Hobart: Australian Committee for Large Dams, 2012.
- [246] Institut za rudarstvo i metalurgiju Bor, „Tehnički rudarski projekat nadvišenja Polja 1 flotacijskog jalovišta „VK“ do kote 390 mnv“, RTB Bor, Bor, 2016.
- [247] Preduzeće za projektovanje i inženjering „GEA“, „Šestomesečni izveštaj o tehničkom osmatranju brana 1A i 2A i polja 1“, RTB BOR, Bor, 2015.
- [248] Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi“, „Studija zaštite eksploatacionih polja „VK“ i Cerovo i naselja „VK“ od površinskih voda i obezbeđivanje potrebnih količina tehničke vode za rudnik Cerovo“, RTB Bor, Bor, 2015.
- [249] GEOAS, „Projekat geomehaničkih, inženjersko-geoloških i geoloških istraživanja na jezgrima istražnih bušotina na trasi kolektora u polju “O” u okviru proširenja flotacijskog jalovišta “Veliki Krivelj”“, Preduzeće za geotehnički inženjering "GEOAS" d.o.o., Beograd, 2016.

- [250] GEOAS, „Elaborat o geotehničkim uslovima izgradnje pregradne brane u Polju “0” u okviru proširenja flotacijskog jalovišta “Veliki Krivelj”“, Preduzeće za geotehnički inženjering "GEOAS" d.o.o., Beograd, 2015.
- [251] RGF, „Studija o proceni uticaja na životnu sredinu za sanaciju/izgradnju kolektora „VK“,“ Rudarsko-geološki fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 2010.
- [252] Uprava za prirodne resurse, „Analiza stanja životne sredine od šteta nastalih kao posledica prethodnog rada RTB Bor - Finalni izveštaj“, Agencija za privatizaciju - Republika Srbija, Beograd, 2006.
- [253] S. Radovanović, „Karta epicentara zemljotresa za period 1456-2012. godine,“ *Republički seizmološki zavod*, n.d. [Na mreži]. Dostupno na: http://www.seismo.gov.rs/Seizmicnost/Karta_epicentara_1.pdf. [Pristupljeno: 16.10.2018.]
- [254] J. Lilić, „Uticaj rekultivacije na karakteristike tehnosola rudnika bakra Bor,“ Doktorska disertacija, Beograd: Poljoprivredni fakultet, Univerzitet u Beogradu, 2015.
- [255] F.A. Johnson, P. Illes, "A Classification of Dam Failures," *International Water Power & Dam Construction*, vol. 28, pp. 43-45, 1976.
- [256] "Tailings Dam Breach Assessment,“ IDM MINING LTD., Vancouver, No. VA101-594/4-6, 2017.
- [257] R. Lekovski, M. Mikić, D. Kržanović, "Impact of the flotation tailing dumps on the living environment of Bor and protective measures," *Mining and Metallurgy Engineering Bor*, vol. 2, pp. 97-116, 2013.
- [258] G.D. Bogdanović, M.Ž. Trumić, V. Stanković, D.V. Antić, M.S. Trumić, Z. Milanović, "Mine waters from Mining and Smelting Basin Bor: A resource for the recovery of copper or polluter of the environment," *Reciklaža i održivi razvoj*, 6 (1), pp., vol. 6, no. 1, pp. 41-50, 2013.
- [259] G. Antonović i dr., „Zemljišta basena Timoka,“ Centar za poljoprivredna istraživanja - Institut za proučavanje zemljišta, Beograd, 1974.
- [260] RI, „Godišnji izveštaj o oskultaciji od jula 2017. do jula 2018. godine deponije pepela i šljake TE "Nikola Tesla B",“ Rudarski Institut, Beograd, 2018.
- [261] RI, „Izveštaj o ispitivanju fizičko-mehaničkih karakteristika uzoraka za potrebe godišnjeg izveštaja o oskultaciji deponije pepela i šljake „TENT B“,“ Rudarski Institut, Beograd, 2018.
- [262] Rudarski Institut Beograd, „Glavni projekat odlaganja pepela i šljake u vidu guste hidromešavine na postojećoj deponiji pepela i šljake TE Nikola Tesla – B Ušće, Javno preduzeće "Elektroprivreda Srbije"“, Ogranak TENT Beograd-Obrenovac, Obrenovac, 2011.

- [263] A. Nišavić, M. Zarić, M. Gulan, L. Dekić, „Meteorološki uslovi u maju 2014. godine i mogućnost prognoziranja obilnih padavina," Republički hidrometeorološki zavod, Beograd, 2014.
- [264] Sl. Glasnik RS, „Zakon o budžetu Srbije za 2018. godinu”, Službeni Glasnik Republike Srbije, br. 113/2017, Beograd, Srbija, 2017.

BIOGRAFIJA

Dragana Nišić, master inženjer rudarstva, rođena je 22. februara 1988. godine u Beogradu. Osnovnu školu i gimnaziju završila je u Beogradu. Osnovne akademske studije završila je 2012. godine na Rudarsko-geološkom fakultetu, Univerziteta u Beogradu, na studijskom programu rudarsko inženjerstvo, modul priprema mineralnih sirovina, sa prosečnom ocenom 9,14. Na istom modulu je 2013. godine završila i master akademske studije sa prosečnom ocenom 10,00. Dobitnik je nagrade fonda „dr Branislav Milovanović“ za izuzetne rezultate postignute u toku studija, kao i nagrade Rudarsko-geološkog fakulteta za najboljeg studenta master studija.

Od 2014. godine je zaposlena na Rudarsko-geološkom fakultetu u Beogradu na Katedri za zaštitu na radu i zaštitu životne sredine u zvanju asistenta za užu naučnu oblast Priprema mineralnih sirovina, zaštita na radu i zaštita životne sredine. Zadužena je za održavanje časova iz grupe predmeta koji se tiču upravljanja industrijskim otpadom i monitoringa u životnoj sredini.

Od 2015. godine Dragana Nišić je učesnik projekta koji finansira Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije (Projekat TR33039), u okviru programa istraživanja u oblasti tehnološkog razvoja. Radi sticanja znanja i veština potrebnih za izradu disertacije, pohađala je i kurs za savladavanje načela upravljanja rizicima pomoću standarda ISO 31:000:2009, kao referentnog okvira.

U okviru naučno-stručnih aktivnosti, Dragana Nišić je publikovala 16 radova u domaćim i stranim časopisima, od kojih je većina vezana za problematiku procene rizika na deponijama industrijskog otpada mineralnog porekla. Koautor je 2 udžbenika za studente: „Karakterizacija i upravljanje industrijskim otpadom“ i „Monitoring u životnoj sredini“.

Pored naučnog i nastavnog rada, Dragana Nišić se bavi i stručnim radom iz domena rudarstva, te je učestvovala u izradi nekoliko elaborata i projekata.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора _____ Драгана Д. Нишић _____

Број индекса _____ Р 704/13 _____

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА НА ДЕПОНИЈАМА
ИНДУСТРИЈСКОГ ОТПАДА МИНЕРАЛНОГ ПОРЕКЛА

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација у целини ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 06.11.2018



**Изјава о истоветности штампане и електронске верзије
докторског рада**

Име и презиме аутора Драгана Д. Нишић

Број индекса P704/13

Студијски програм Рударско инжењерство

Наслов рада РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА НА ДЕПОНИЈАМА
ИНДУСТРИЈСКОГ ОТПАДА МИНЕРАЛНОГ ПОРЕКЛА

Ментор Проф. др Никола Лилић

Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду.**

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 06.11.2018.



Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

РАЗВОЈ МОДЕЛА ЗА ПРОЦЕНУ РИЗИКА НА ДЕПОНИЈАМА ИНДУСТРИЈСКОГ ОТПАДА МИНЕРАЛНОГ ПОРЕКЛА

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)

② Ауторство – некомерцијално (CC BY-NC)

3. Ауторство – некомерцијално – без прерада (CC BY-NC-ND)

4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)

5. Ауторство – без прерада (CC BY-ND)


6. Ауторство – делити под истим условима (CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, 06.11.2018



1. **Ауторство.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољаваате умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прерада. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.