

Numeričko modeliranje kolapsa pokrovnih naslaga na okršenoj vapnenačkoj podlozi

Barić, Anja

Master's thesis / Diplomski rad

2023

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:169:331344>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-11**



Repository / Repozitorij:

[Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering Repository, University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET
Diplomski studij rudarstva

**NUMERIČKO MODELIRANJE KOLAPSA POKROVNIH NASLAGA NA
OKRŠENOJ VAPNENAČKOJ PODLOZI**

Diplomski rad

Anja Barić

R299

Zagreb, 2023.



KLASA: 602-01/23-01/185
URBROJ: 251-70-11-23-2
U Zagrebu, 09.11.2023.

Anja Barić, studentica

RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-01/23-01/185, URBROJ: 251-70-11-23-1 od 10.10.2023. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

NUMERIČKO MODELIRANJE KOLAPSA POKROVNIH NASLAGA NA OKRŠENOJ VAPNENAČKOJ PODLOZI

Za voditeljicu ovog diplomskog rada imenuje se u smislu Pravilnika o izradi i obrani diplomskog rada Prof.dr.sc. Biljana Kovačević Zelić nastavnik Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu

Voditelj

(potpis)

Prof.dr.sc. Biljana Kovačević
Zelić

(titula, ime i prezime)

Predsjednik povjerenstva za
završne i diplomske ispite:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Mario Klanfar

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Borivoje
Pašić

(titula, ime i prezime)

NUMERIČKO MODELIRANJE KOLAPSA POKROVNIH NASLAGA NA OKRŠENOJ VAPNENAČKOJ
PODLOZI

Anja Barić

Rad izrađen: Sveučilište u Zagrebu
Rudarsko-geološko-naftni fakultet
Zavod za rudarstvo i geotehniku
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Sažetak

Nakon potresa magnitude 6.4, koji se dogodio 29. prosinca 2020. godine s epicentrom u Petrinji pojavilo se preko 100 pokrovno-urušnih vrtača na površini od približno 1 km² tijekom nekoliko mjeseci od potresa. Geotehnički istražni radovi na promatranom području izvedeni su početkom 2021. godine. Analizirani su postojeći geološki i hidrogeološki podaci te su zabilježene geometrije vrtača. U blizini najveće vrtače, koja se nalazila u Mečenčanima, izvedene su dvije istražne bušotine s kontinuiranim jezgrovanjem. U istim bušotinama izveden je standardni penetracijski pokus. Naknadno su izvedena i laboratorijska ispitivanja fizikalnih, indeksnih i projektnih svojstava tla. Modeliran je karakterističan profil tla, za najveću vrtaču, koji je korišten za numeričke analize kako bi se ispitali mogući mehanizmi loma te izvršile parametarske analize radi utvrđivanja ovisnosti utjecaja geometrije i stanja naprezanja na nastanak pokrovno-urušnih vrtača.

Ključne riječi: potres, urušna vrtača, krš, numeričko modeliranje

Završni rad sadrži: 53 stranica, 3 tablice, 43 slike, 0 priloga, i 20 referenci.

Jezik izvornika: Hrvatski

Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb

Mentorica: Dr.sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF

Ocjenjivači: Dr.sc. Biljana Kovačević Zelić, redovita profesorica RGNF
Dr.sc. Helena Vučenović, docentica RGNF
Dr.sc. Dubravko Domitrović, izvanredni profesor RGNF

NUMERICAL MODELING OF COVER COLAPSE SINKHOLES – CASE STUDY

Anja Barić

Thesis completed at: University of Zagreb
Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering
Departement of Mining Engineering and Geotechnics
Pierottijeva 6, 10 000 Zagreb

Abstract

After the magnitude 6.4 earthquake that occurred on December 29, 2020, with its epicentre in Petrinja, more than 100 cover-collapse sinkholes appeared over an area of approximately 1 km² in the months following the earthquake. Geotechnical site investigations were carried out in the area affected by the earthquake in early 2021. Existing geological and hydrogeological data were analysed, and the geometries of the sinkholes were recorded. Two exploratory drillings with core sampling were conducted near the largest sinkhole, located in the Mečenčani village. Standard penetration tests were performed in the same boreholes. Subsequently, laboratory tests of physical, index, and engineering properties were conducted. A typical soil profile was modelled for the largest sinkhole, which was used for numerical analyses to investigate potential failure mechanisms and perform parametric analyses to determine the dependencies of the influence of geometry and stress conditions on the formation of cover-collapse sinkholes.

Keywords: earthquake, cover-collapse sinkhole, karst, numerical modelling

Thesis contains: 53 pages, 3 tables, 43 figures, 0 appendixes, i 20 references.

Original in: Croatian

Archived in: Library of Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Pierottijeva 6, Zagreb

Supervisor: Full Professor Biljana Kovačević Zelić, PhD

Reviewers: Full Professor Biljana Kovačević Zelić, PhD
Assistant Professor Helena Vučenović, PhD
Associate Professor Dubravko Domitrović, PhD

SADRŽAJ

1. UVOD	1
2. KRŠKI RELJEF	3
2.1. Proces stvaranja krša.....	6
2.2. Faze stvaranja krša.....	8
2.3. Krški oblici	9
3. GEOLOŠKE, HIDROGEOLOŠKE I SEIZMIČKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA.....	13
3.1. Seizmičke karakteristike	13
3.2. Geotehnički problemi uzrokovani potresom	14
3.3. Geologija i hidrogeologija područja	18
4. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI PROVEDENI NA ISTRAŽIVANOM PODRUČJU	21
4.1. Terenski istražni radovi	21
4.2. Laboratorijska ispitivanja	24
5. NUMERIČKO MODELIRANJE POKROVNO URUŠNE VRTAČE.....	27
5.1. Korištene numeričke analize i modeli tla	27
5.1.1. Sigurnosna analiza	27
5.1.2. Plastična analiza.....	28
5.1.3. Mohr-Coulombov model tla	28
5.1.4. Model ojačanog tla (HS model).....	31
5.1.4.1. <i>Ojačanje smicanjem</i>	32
5.1.4.2. <i>Kompresijsko ojačanje</i>	33
5.2. Numerički modeli i rezultati proračuna	34
5.2.1. Model 1	37
5.2.2. Model 2.....	40
5.2.3. Ovisnost faktora sigurnosti o dimenzijama kaverne i parametrima tla.....	43
6. PREPORUKE ZA RANO OTKRIVANJE MOGUĆNOSTI NASTANKA VRTAČA 47	
7. ZAKLJUČAK	49
8. LITERATURA	51

POPIS SLIKA

Slika 1-1. Udaljenost vrtače (plava točka) i epicentra potresa (crvena točka)	1
Slika 2-1. Velebitski krš (Gospić, 2023)	4
Slika 2-2. Tipovi krša u Hrvatskoj (Matas, 2009)	5
Slika 2-3. Podrijetlo ugljikovog dioksida u kiselim vodama (ESI, 2020).....	7
Slika 2-4. Davisov koncept postanka krša (Jines IAS Academy, 2015)	8
Slika 2-5. Značajniji krški oblici (Matas, 2009).....	9
Slika 2-6. Vrtače prema postanku (Waltham i Fookes, 2003).....	11
Slika 2-7. Nastanak pokrovno-urušne vrtače (Šumanovac, 2023)	12
Slika 3-1. Karta podrhtavanja površine tla za vrijeme glavnog potresa u Petrinji izraženo vrijednostima horizontalnih vršnih ubrzanja tla u postocima gravitacijskog ubrzanja (Earthquake, 2022)	13
Slika 3-2. Preliminarne lokacije epicentara potresa u Sisačko-moslavačkoj županiji (PMF, 2021).....	14
Slika 3-3. Likvefakcija na području Petrinje (Tomac i dr., 2021).....	15
Slika 3-4. Pukotine u blizini objekata (Arhiva: Taus d.o.o., 2021).....	15
Slika 3-5. Oštećenje ceste prilikom klizanja tla uzrokovanog potresom (Tomac i dr., 2021)	16
Slika 3-6. OGK Hrvatske s označenim vrtačama (Tomac i dr., 2021).....	16
Slika 3-7. Zračna snimka vrtača na području sela Mečenčani (Tomac i dr., 2021)	17
Slika 3-8. Najveća urušna vrtača nastala nakon potresa (Tomac i dr., 2021)	18
Slika 3-9. Osnovna geološka karta SFRJ, list Sisak 1:100 000 (Pikija i dr., 1986).	19
Slika 3-10. Pretpostavka piezometarske razine krškog i aluvijalnog vodonosnika (Tomac i dr., 2021)	20
Slika 4-1. Jezgra bušotine B-1 (Tomac i dr., 2021).....	22
Slika 4-2. Jezgra bušotine B-2 (Tomac i dr., 2021).....	22
Slika 4-3. Grafički prikaz bušotina B-1 i B-2 (Tomac i dr., 2021)	22
Slika 4-4. LiDAR-ska snimka najveće vrtače u Mečenčanima, promjer vrha vrtače (Tomac i dr., 2021)	23
Slika 4-5. LiDAR-ska snimka najveće vrtače u Mečenčanima, promjer dna vrtače (Tomac i dr., 2021)	23
Slika 4-6. MASW profil ispod najveće vrtače (Tomac i dr., 2021)	24

Slika 4-7. Rezultati edometarskog ispitivanja (Tomac i dr., 2021).....	26
Slika 5-1. Mohr-Coulombov kriterij sloma (Szavits-Nossan, 2014).....	29
Slika 5-2. Mohr-Coulombova ravnina popuštanja u prostoru glavnih naprezanja (PLAXIS, 2016).....	30
Slika 5-3. Hiperbolički odnos naprezanja i deformacija u primarnom opterećenu za standardno drenirano troosno ispitivanje (PLAXIS, 2016).....	32
Slika 5-4. Definiranje E_{50}^{ref} i E_{ur}^{ref} za rezultate troosnog dreniranog ispitivanja (PLAXIS, 2016).....	33
Slika 5-5. Definiranje E_{oed}^{ref} iz edometarskog ispitivanja (PLAXIS, 2016)	34
Slika 5-6. Poprečni presjek urušene vrtače.....	35
Slika 5-7. Pretpostavljeni poprečni presjek kaverne prije urušavanja.....	36
Slika 5-8. Oblik kaverne tijekom modeliranja u PLAXIS 2D.....	37
Slika 5-9. Vertikalni pomaci plastične analize Modela 1	38
Slika 5-10. Vertikalni pomaci sigurnosne analize Modela 1	39
Slika 5-11. Točke sloma u sigurnosnoj analizi Modela 1	39
Slika 5-12. Geometrije Modela 2	41
Slika 5-13. Vertikalni pomaci plastične analize Modela 2.....	42
Slika 5-14. Vertikalni pomaci sigurnosne analize Modela 2.....	42
Slika 5-15. Točke sloma sigurnosne analize Modela 2	43
Slika 5-16. Odnos troška i vremena za sprječavanje vrtače i sanaciju vrtače (Hyum Nam i dr., 2018)	44
Slika 5-17. Ovisnost faktora sigurnosti o geometrijskim uvjetima i stanju naprezanja	46
Slika 6-1. Kategorije istraživanja i njihov odnos (Hyum Nam i dr., 2018)	47

POPIS TABLICA

Tablica 4-1. Geotehnička svojstva uzoraka iz bušotina B-1 i B-2 (Tomic i dr., 2021)	25
Tablica 5-1. Ulazni parametri za numeričke analize	38
Tablica 5-2. Dimenzije kaverni i vrijednosti kohezije korištene u proračunu.....	45

POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

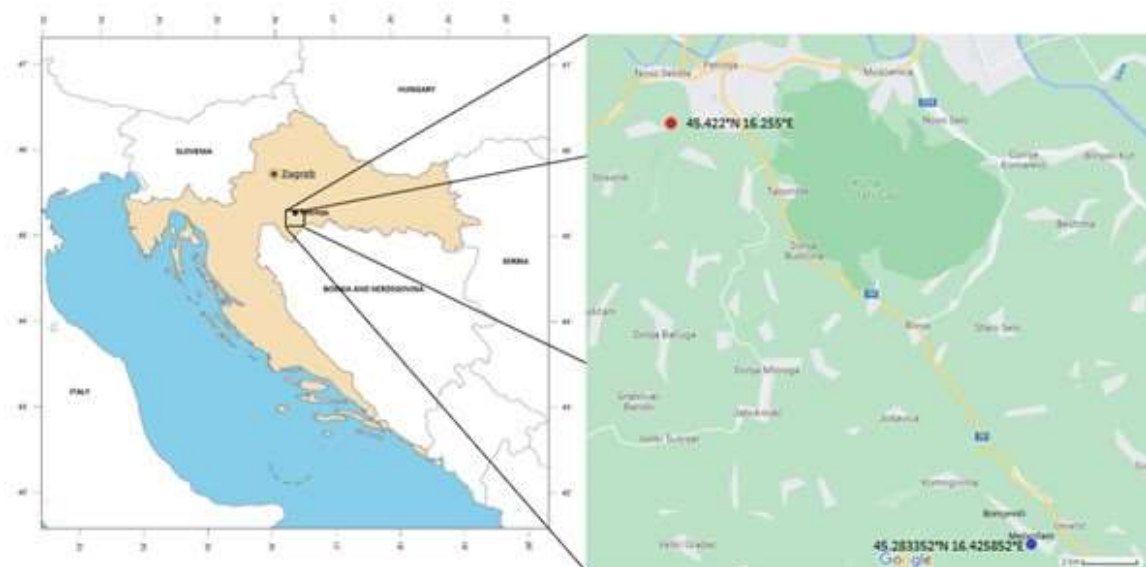
Oznaka	Jedinica	Opis
τ	kPa	posmično naprezanje
c	kPa	kohezija
σ	kPa	vertikalno naprezanje
φ	°	kut unutarnjeg trenja
SRF	-	smanjenje faktora čvrstoće
ψ	°	kut dilatancije
E	kPa	Youngov modul elastičnosti
E_{oed}	kPa	edometerska krutost
E_{oed}^{ref}	kPa	referentna edometerska krutost
E_{ur}	kPa	krutost rasterećenja i ponovnog opterećenja
E_{ur}^{ref}	kPa	referentna krutost rasterećenja i ponovnog opterećenja
E_{50}	kPa	sekantna krutost pri 50% čvrstoće u troosnom ispitivanju
E_{50}^{ref}	kPa	referentna sekantna krutost pri 50% čvrstoće u troosnom ispitivanju
p_{ref}	kPa	referentna vrijednost nepreznja

1. UVOD

Potres magnitude M_w 6,4, 29. prosinca 2020. godine u 12:19 sati zadesio je područje Siska s epicentrom na 45.422°N i 16.255°E i hipocentrom na dubini od 10 km. Potres je prema podacima Seizmološke službe Geofizičkog odsjeka PMF-a ocijenjen intenzitetom VIII $^\circ\text{EMS}$ u epicentru i opisuje se kao teško oštećujući.

Kao posljedica potresa na širem području pojavili su se brojni geotehnički problemi vezani za urušavanje tla, kao što su klizišta, pucanje površine tla, likvefakcije, oštećenja na objektima, cestama i nasipima. Neočekivano, na znatno manjoj površini pojavile su se pokrovno-urušne vrtače. Upravo su vrtače privukle posebnu pažnju stručnjaka jer ih se na području od 1.13 km^2 otvorilo preko 100.

Vrtače su geomorfološki oblici usko vezani za krške reljefe, a na području Siska predstavljaju opasnost za stanovanje, korištenje poljoprivrednih zemljišta, vodocrpilišta i infrastrukturu. Nastale su 20 km jugoistočno od epicentra potresa, a zbog jako dobrih svojstava pokrovnih naslaga teško ih je predvidjeti bez detaljnih istražnih radova jer prije samog kolapsa nije moguće uočiti vidljiva slijeganja. Veličine vrtača kretale su se od 0,5 m do 25,0 m u promjeru s dubinama od 0,4 m do 12,5 m, a većina ih je imala (sub)vertikalne stijenke. Najveća vrtača na tom prostoru bila je vrtača u Mečenčanima, promjera od oko 20 m i dubine preko 10 m nastala urušavanjem stropa kaverne. Udaljenost epicentra potresa i lokacije najveće vrtače prikazana je slikom 1-1.



Slika 1-1. Udaljenost vrtače (plava točka) i epicentra potresa (crvena točka)

Tako velik broj vrtača na maloj površini izazvao je veliki interes stručne i znanstvene javnosti. Međutim, kako je nakon glavnog potresa zabilježen niz naknadnih potresa, bilo je teško organizirati istražne radove na licu mjesta odmah nakon potresa iz sigurnosnih i organizacijskih razloga. Između ostalog, bilo je teško mobilizirati opremu za ispitivanje, a stručnjaci su većinom bili uključeni u utvrđivanje posljedica potresa na objekte, javni vodovod, ceste i druge infrastrukturne objekte (Barić i Kovačević-Zelić, 2023).

Unatoč svemu, u ožujku 2021. godine obavljena su geološka, hidrogeološka i geotehnička istraživanja na kojima se temelji i ovaj diplomski rad. U blizini najveće vrtače izvedene su dvije geotehničke bušotine, in-situ geotehnička karakterizacija i standardni penetracijski pokusi, te su u laboratoriju provedena ispitivanja fizikalnih, indeksnih i projektnih svojstava (Tomic i dr., 2021). Neki od rezultata istraživanja bit će prikazana dalje u radu.

Rezultati terenskih i laboratorijskih ispitivanja korišteni su za određivanje karakterističnog profila tla i dobivanje ulaznih parametara za numeričku analizu. Numerička analiza izvedena je u programu PLAXIS 2D.

Svrha proračuna bila je poboljšati razumijevanje procesa koji dovode do kolapsa vrtače, omogućiti bolju pripremu budućih istražnih radova i predložiti korake za procjenu rizika u sličnim geološkim okruženjima i pojavama.

2. KRŠKI RELJEF

Svi krajolici Zemlje formirani su kombinacijom kemijskih i fizičkih procesa koji su djelovali na izložene stijene tijekom dugih vremenskih razdoblja. Stijene različitog nastanka su istrošene i erodirane i ostavljaju erozijske reljefne oblike, dok se rezultirajući sedimenti prenose različitim načinima (vjetrom, ledom, vodama) i talože se na mjestima ponekad i tisuće kilometara udaljenim od mjesta trošenja. Najčešće takvi krajolici dobivaju imena po dominantnim procesima koji su oblikovali većinu površinskih obilježja (npr. vulkanski krajolici) ili po prevladavajućim stijenama (pr. krajolici pješčenjaka).

Krški krajolik svoje je ime dobio po regiji između Italije i Slovenije kojom dominiraju izdanci karbonatnih stijena. Karst je njemačka formulacija usvojena tijekom razdoblja kada su provedene prve studije o oblicima reljefa povezanim s otapanjem. Potječe od starog indoeuropskog pojma "karra", što znači "kamen" (Palmer 2007).

Krš je teren odlikovan specifičnim geomorfološkim i hidrografskim značajkama. Jedinствене značajke i trodimenzionalna priroda krških krajolika rezultat su složenog međudnosa geologije, klime, topografije, hidrologije i bioloških čimbenika tijekom dugog vremenskog razdoblja. Nastaje na područjima gdje su prisutne topive stijene, od kojih su to u Hrvatskoj najčešće dolomiti i vapnenci te mjestimično karbonatne breče i konglomerati. Osim topivosti stijena za nastanak krškog reljefa bitna je i dobro razvijena sekundarna poroznost stijena.

Iako krš nastaje djelovanjem brojnih procesa, najvažniju ulogu u njegovu nastajanju ima erozijsko i korozijsko djelovanje vode. Proces nastanka krškog reljefa naziva se krški proces ili okršavanje. Okršavanje je ponajprije posljedica kruženja vode, obogaćene ugljikovim dioksidom iz atmosfere, koja topi čvrste karbonatne stijene (Kuhta, 2000).

Na slici 2.1. prikazan je primjer krškog reljefa u Hrvatskoj, na jugoistočnoj strani Velebita.



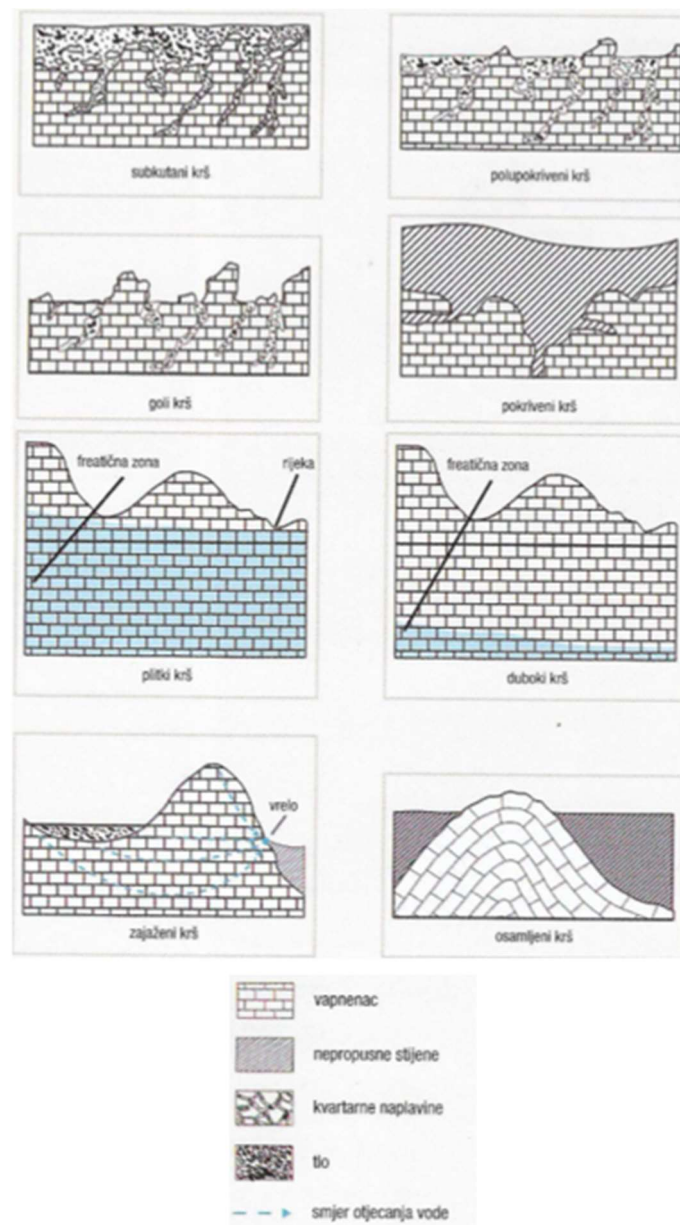
Slika 2-1. Velebitski krš (Gospić, 2023)

U hrvatskoj krš zauzima 28.571 km² površine, odnosno čak 50,5%, a prema Matas (2009) pojavljuju se slijedeći krški tipovi:

1. Duboki krš – razvijen u debelim slojevima karbonatnih stijena debljine preko stotinu metara, a česta pojava u njemu su duboke jame koje dopiru do najniže razine podzemne vode.
2. Plitki krš – razvijen u tanjim karbonatnim stijenama, karakteriziraju ga špilje nad kojima dolazi do urušavanja pokriva;
3. Subkutani krš – razvijen pod pokrovom tla koje ubrzava korozijske procese. Korozija se odvija plošno pa su oblici odlikovani glatkim ploham;
4. Polupokriveni krš – razvija se pod pokrovom nanosa i tla, karakteriziraju ga brojne i plitke ponikve;
5. Goli krš – vrsta krajolika bez pokrovnog tla na kojem se krški oblici najizrazitije pojavljuju na samoj površini;
6. Zajaženi krš – razvijen u topivim stijenama koje su utonule u nepropusne slojeve, predstavlja poseban oblik osamljenog krša;

7. Osamljeni krš – razvija se u karbonatnim stijenama koje su izolirane u nepropusnoj okolini;
8. Pokriveni krš – krška topografija u cijelosti prekrivena novijim alogenim nekrškim naslagama.

Shematski prikazi navedenih tipova krša prikazani su na slici 2-2.



Slika 2-2. Tipovi krša u Hrvatskoj (Matas, 2009)

2.1. Proces stvaranja krša

Stijene koje su najčešće podložne okršavanju, stvaranju površinskih i podzemnih krških oblika, su vapnenci i dolomiti. Vapnenci i dolomiti su najvažnije sedimentne karbonatne stijene i razlikuju se po starosti i nastanku, a tako i mineralnom sastavu te mehaničkim i kemijskim svojstvima.

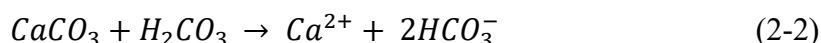
Vapnenci su karbonatne stijene organskog ili anorganskog postanka u kojoj je udio kalcita veći od 50%. Dijelev se na biokemijske, kemijske i klastične vapnence. Biokemijski vapnenci nastaju taloženjem školjaka na morskom dnu, izravnim taloženjem kalcijevog karbonata iz morske ili slatke vode nastaju kemijski vapnenci, dok klastični vapnenci nastaju od čestica starijih vapnenaca veličine pijeska i šljunka.

Dolomiti su po sastavu vapnenci koji sadrže više od 90% minerala dolomita. Najčešće nastaju rekristalizacijom starijih vapnenaca. Ukoliko sadrže manje od 90% dolomita, a više od 10% kalcita nazivamo ih dolomitizirani vapnenci. Minerali dolomita su slabije topivi od minerala kalcita.

Topivost kalcita i dolomita u čistoj vodi na 20°C vrlo je niska, slična topivosti kvarca, ali se povećava u prisutnosti blago kiselih voda. Do kiselih voda dolazi tijekom padalina, kada voda prolazi kroz atmosferu ili tlo i skuplja CO₂ (slika 2-3). CO₂ se polako otapa stvarajući ugljičnu kiselinu (H₂CO₃), čime se smanjuje pH i povećava korozivna sposobnost vode. Osim ugljičnog dioksida, kiselost vode može poteći i od organskih kiselina ili oksidacijskih procesa koji se odvijaju u prozračnim uvjetima. Nastanak ugljične kiseline prikazan je jednadžbom 2-1.



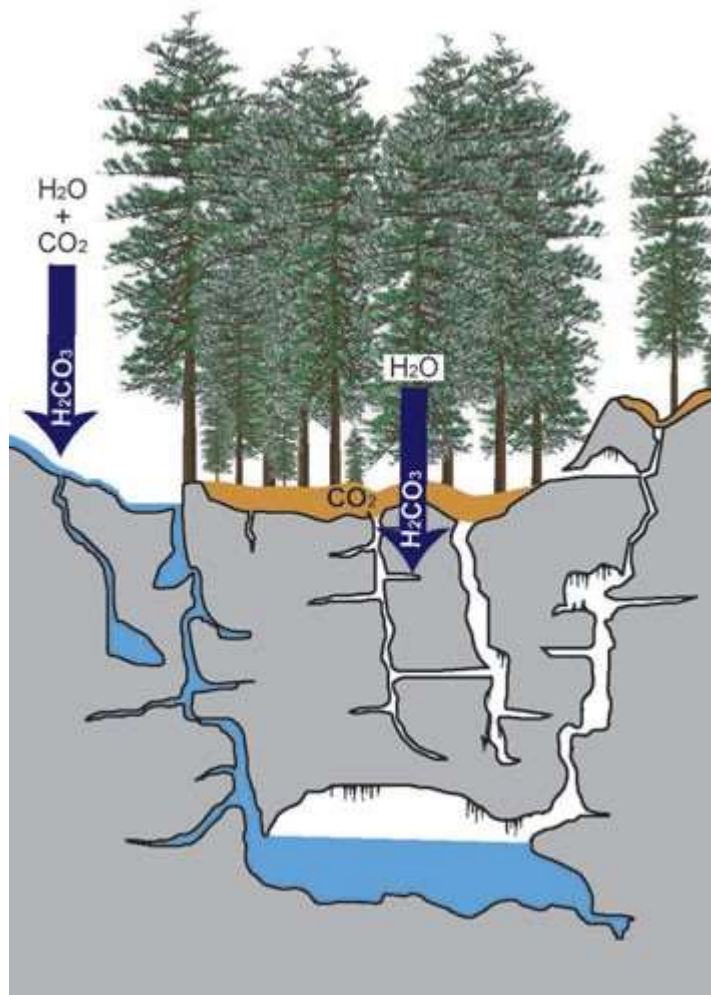
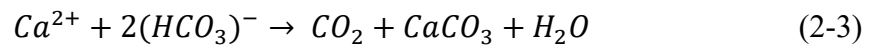
Tako nastala kiselina prodire u stijensku podlogu kroz dostupne propusne puteve (pukotine, ravnine slojevitosti) i otapa kalcijev karbonat (CaCO₃) tvoreći tako poznate krške oblike. U karbonatnim krškim područjima, najveći dio otapanja događa se blizu površine u prvim desecima metara stijene. Otapanje stijene prikazano je jednadžbom 2-2.



Jedna litra čiste vode može rastvoriti 11-16 mg vapnenca, dok jedna litra vode koja sadrži ugljičnu kiselinu može rastvoriti 1 g vapnenca. S obzirom da sadržaj ugljične kiseline od 1

mg/l povećava topivost vapnenca do 50-60 mg/l, njegov značaj za topivost vapnenca je velik (Petrović, 2003).

Kada voda obogaćena otopljenim ionima dospije otvoreni prostor kaverne, razlika u parcijalnom tlaku CO_2 u kaverni dovodi do otplinjavanja otopine, što uzrokuje taloženje kalcita u različitim oblicima vapnenačkih naslaga. Otplinjavanje je prikazano jednačbom 2-3.

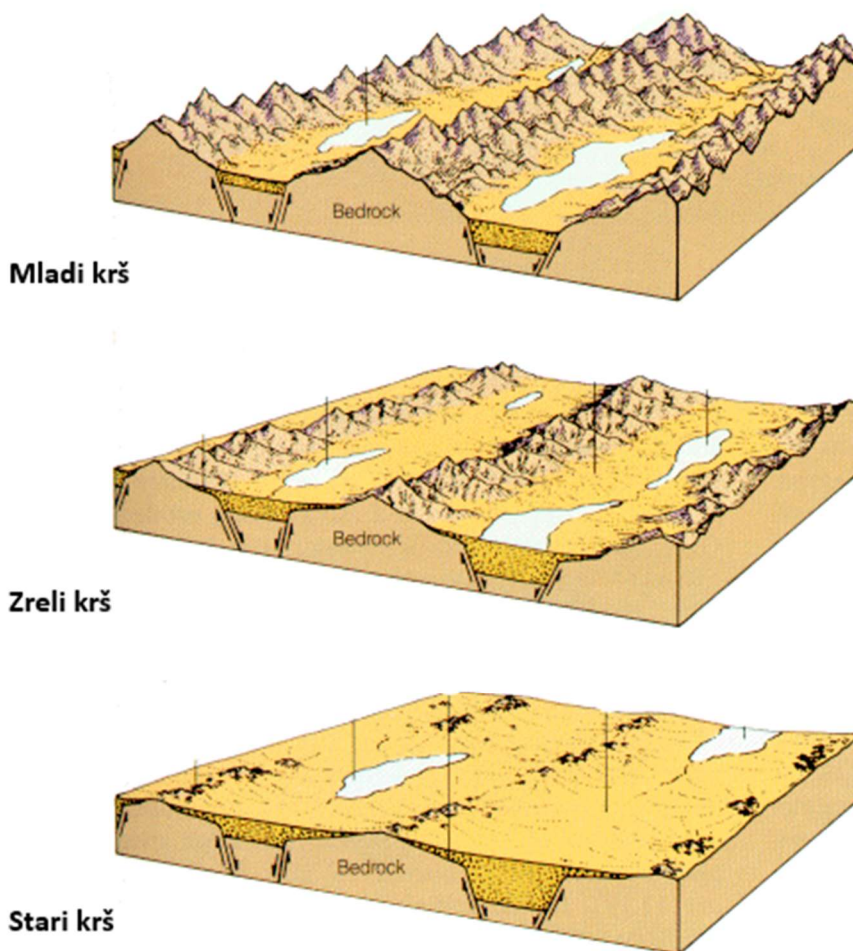


Slika 2-3. Podrijetlo ugljikovog dioksida u kiselim vodama (ESI, 2020)

2.2. Faze stvaranja krša

Kontinuirano otapanje vapnenca tijekom dugog razdoblja rezultira stijenskom masom punom kaverni i prolaza. Nastajanje krškog reljefa napreduje kroz faze te se tako mogu razlikovati mladi, zreli i stari krš. Faze okršavanja prema Davisovom koceptu prikazane su na slici 2-4.

Davisov koncept



Slika 2-4. Davisov koncept postanka krša (Jines IAS Academy, 2015)

U mladom kršu još uvijek nije došlo do otapanja stijena, primjećuje se smanjivanje razine vode u vodonosnicima kao rezultat procjeđivanja vode u podzemlje.

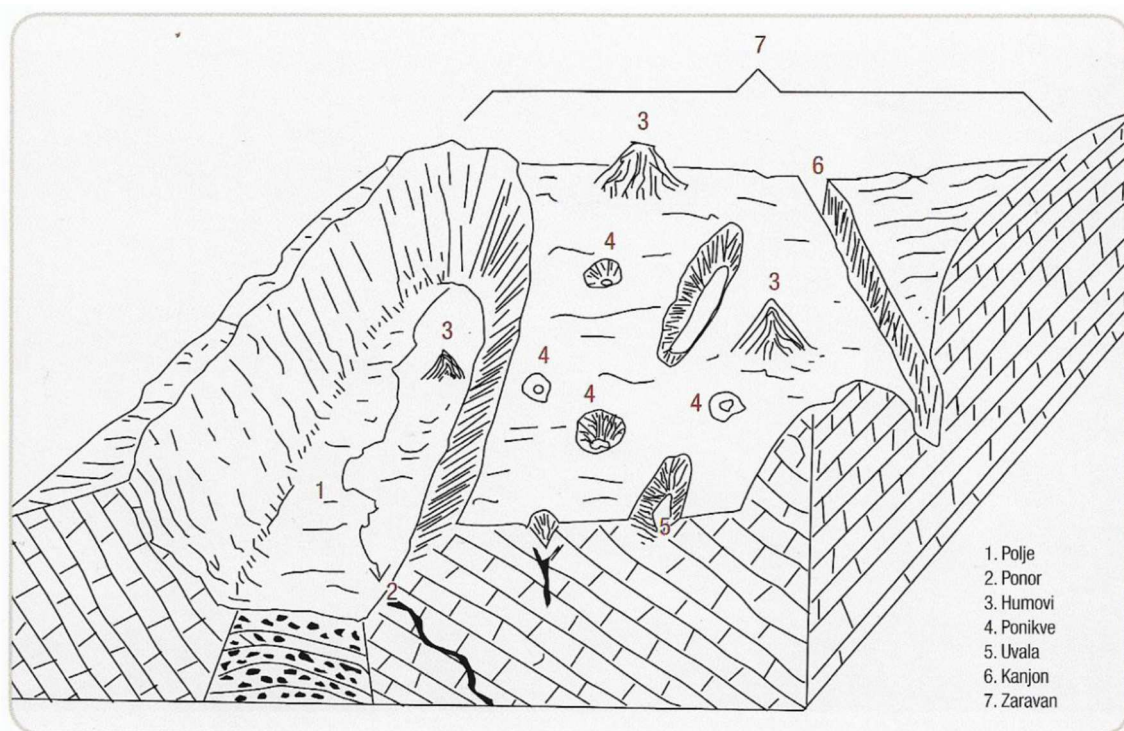
U zreloj fazi dolazi do proširenje vertikalnih puteva vode kroz stijenu i nastajanja krških formacija kao što su npr. kaverne. Jedan od procesa zrele faze je i nastanak vrtača kao posljedica urušavanja stropa kaverni. U zrelom kršu procjedni sustav je dobro razvijen.

Površinski su vodonosnici posljedično kompleksni, dok je na nekim mjestima vodonosnik skroz presušio zbog procjeđivanja, na drugim mjestima se puni zbog nastajanja izvora jer voda koja se procjeđuje kroz podzemlje najčešće opet nađe svoj put do površine na nekoj nižoj razini. Takav stijenski reljef je u ovoj fazi najčešće zatrpan glinom te se krške formacije teško primjećuju.

Stari krš karakteriziran je izravnom površinom. Sloj vapnenca se u potpunosti izravna topljenjem ili se u potpunosti otopi. Najčešće ne postoje vodonosnici na površini, nego se sva voda procjeđuje do razine podzemne vode.

2.3. Krški oblici

Otapanje vapnenca i dolomita rezultira stvaranjem karakterističnih oblika reljefa na površini i ispod nje. Ovisno o količini padalina, vrsti stijena, prisutnosti tla i vegetacije te nagibu stijena nastat će različiti oblici. Izravnim padalinama na stijensku površinu nastaju oštri rubovi, dok je stijena otapana ispod sloja tla zaobljena i glatka. Karakteristični krški oblici prikazani su na slici 2-5.



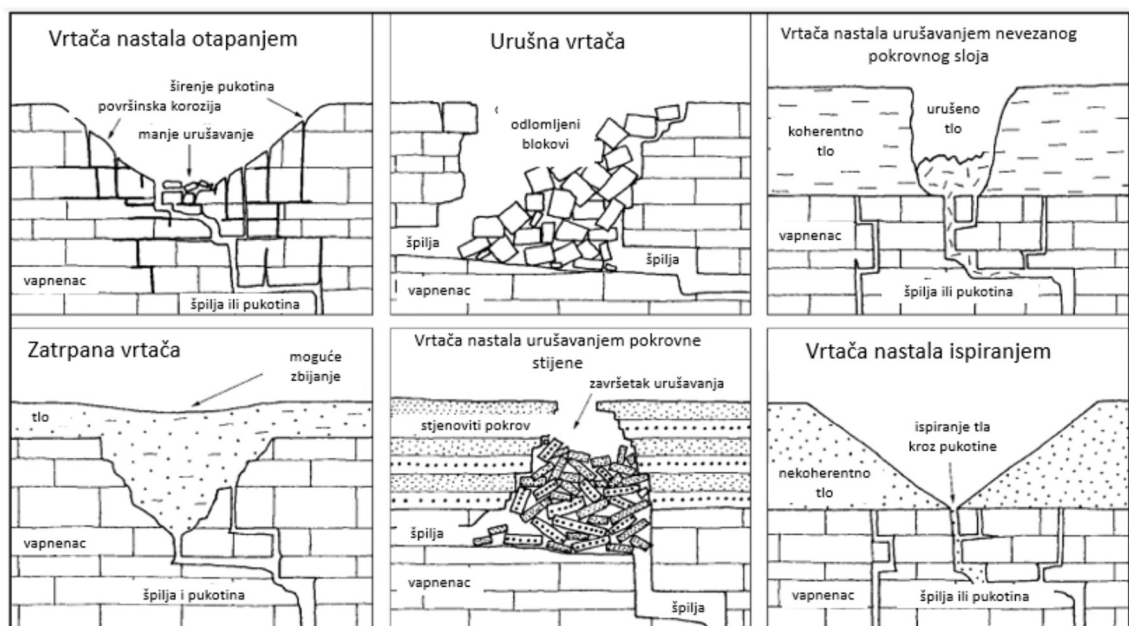
Slika 2-5. Značajniji krški oblici (Matas, 2009)

Krško polje najveći je tip krške depresije, s izravnatim stijenskim tlom i krškom drenažom. Ima strmi obod i ponornicu s izvorima s jedne strane polja i ponore s druge strane. Krška polja mogu se protezati i po nekoliko desetaka kvadratnih kilometara. Često na takvim krškim oblicima dolazi do stvaranja isprekidanih krških jezera, jer voda koju donose ponornice nakon nekog vremena nema gdje otjecati. Tijekom sušnih razdoblja polja su suha, dok tijekom kišnih nastaju jezera. Humovi su izolirana brda sa strmim vertikalnim padinama na krškoj ravnici koja je često prekrivena aluvijalnim naslagama. Zaravni su prostrana zaravnjena područja u kršu koja su odlikovana slabom reljefnom dinamikom. Kanjoni imaju veću visinu u odnosu na širinu, uglavnom meandriraju, a formirani su usijecanjem dna vodotokom. Uvale su duguljasti krški oblici s podzemnom odvodnjom, a nastaju korozijskim oblikovanjem u tektonski razlomljenim stijenama. Ponor je rupa ili ždrijelo u vapnenačkoj zatvorenoj depresiji kroz koju se voda gubi u podzemlje.

Vrtača je zatvorena depresija kružnog oblika, čiji se promjer mjeri metrima ili desecima metara, u krškom ili pseudokrškom području. Prema Bonacci i Roje-Bonacci (2006) i Waltham i Fookes (2003), razlikujemo šest vrsta vrtača prema postanku. To su:

1. Vrtače nastale otapanjem
2. Urušne vrtače
3. Vrtače nastale urušavanjem nevezanog pokrovnog sloja – pokrovno-urušne vrtače
4. Zatrpane vrtače
5. Vrtače nastale urušavanjem pokrovnih stijena koje nisu podložne karstifikaciji, a leže iznad okršenih stijena
6. Vrtače nastale ispiranjem.

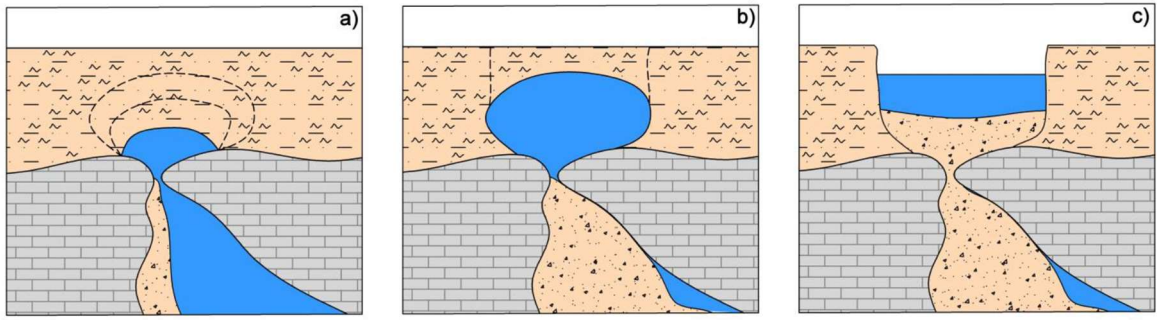
Shematski prikazi navedenih vrsta vrtača prikazani su na slici 2-6.



Slika 2-6. Vrtače prema postanku (Waltham i Fookes, 2003)

Iako bi vrtače nastale na našem području promatranja prema prethodnoj podjeli bile svrstane u vrtače nastale urušavanjem nevezanog pokrovnog sloja, dalje u radu su nazivane pokrovno-urušnim vrtačama. U ovom poglavlju ukratko je opisan nastanak vrtača po obilježjima slična onima nastalim u području Borojevića i Mečenčana, dok će predmetna najveća vrtača biti detaljnije opisana u poglavljima koji slijede.

Unutar sloja vapnenca stvaraju se kaverne. Voda svojim djelovanjem ispire čestice tla koje prekriva vapnenca te ga odvodi kroz kaverne i šupljine. Sloj velike gustoće prekonsolidirane gline, glinovitog pijeska ili pjeskovite gline koji prekriva površinu vapnenca može djelovati kao most preko kaverne stvorene otapanjem karbonatnih stijena. Kohezija unutar takvog sloja može razviti i podržati lučni efekt bez vidljivih slijeganja na površini. Jednom kada je stabilnost pokrovnog sloja ugrožena, bilo unutarnjom erozijom, ekstremnim silama procjeđivanja, površinskim ili u našem slučaju dinamičkim opterećenjem, on gubi čvrstoću i urušava se u postojeću kavernu. Na taj način nastaju pokrovno-urušne vrtače, krški reljefni oblici koji će se spominjati kroz ostatak rada. Nastanak pokrovno-urušne vrtače kroz nekoliko koraka prikazan je slikom 2-7.



Slika 2-7. Nastanak pokrovno-urušne vrtače (Šumanovac, 2023)

3. GEOLOŠKE, HIDROGEOLOŠKE I SEIZMIČKE KARAKTERISTIKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

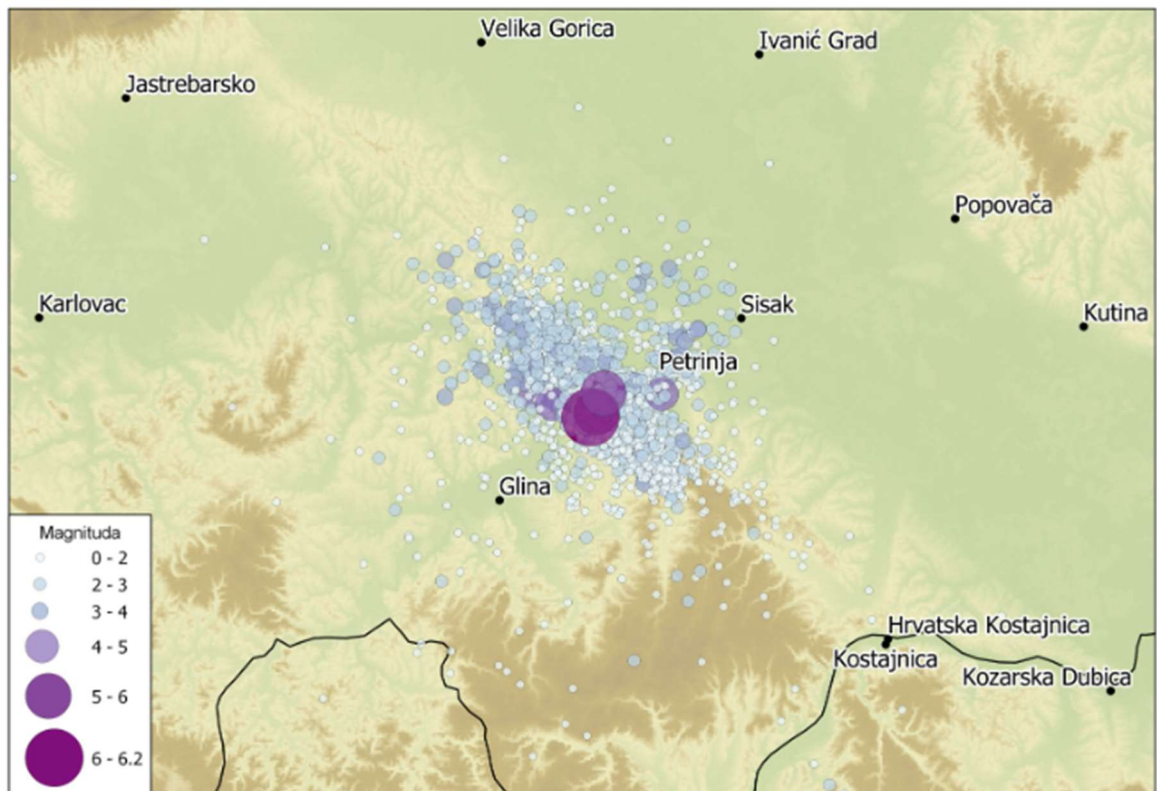
3.1. Seizmičke karakteristike

Potres magnitude M_w 6,4 pogodio je područje Sisačko-moslavačke županije 29. prosinca 2020. godine u 12:20 sati. Prema geološkom institutu SAD-a (USGS) hipocentar potresa lociran je na 45.422°N i 16.255°E na dubini od oko 10 km. Prema položaju i dubini hipocentra potresa zaključuje se da se potres dogodio unutar središnjeg dijela plitkog pokupsko-petrinjskog rasjeda s horizontalnim kretanjem krila unutar euroazijske ploče. Na europskoj makroseizmičkoj ljestvici (EMS) potres je svrstan u jako oštećujući do destruktivni potres, a osim u Hrvatskoj osjetio se i u susjednim zemljama (slika 3-1).



Slika 3-1. Karta podrhtavanja površine tla za vrijeme glavnog potresa u Petrinji izraženo vrijednostima horizontalnih vršnih ubrzanja tla u postocima gravitacijskog ubrzanja (Earthquake, 2022)

Nakon glavnog potresa uslijedio je i niz popratnih potresa od kojih su 4 značajnija koja su se dogodila nekoliko minuta do više od jednog dana nakon i njihove magnitude iznosile su od 4,1 do 4,8 prema Richteru. Karta svih zabilježenih potresa na području Sisačko-moslavačke županije od 28. prosinca 2020. do 28. siječnja 2021. prikazana je na slici 3-2.



Slika 3-2. Preliminarne lokacije epicentara potresa u Sisačko-moslavačkoj županiji (PMF, 2021)

3.2. Geotehnički problemi uzrokovani potresom

Petrinjski potres uzrokovao je niz geotehničkih problema, od kojih su manji likvefakcije na područjima u i oko Petrinje, Siska i Gline. Likvefakcija, samo je jedna od popratnih pojava jakih potresa, a definira se kao fenomen preobrazbe stabilnog i nosivog tla u gusto tekuće stanje u uvjetima visoke saturacije tla (Martinec, 2014). Primjer likvefakcije na području Petrinje prikazan je na slici 3-3.



Slika 3-3. Likvefakcija na području Petrinje (Tomac i dr., 2021)

Slijedeći problem su lateralne pukotine u tlu. Pukotine u tlu su uočene na cijelom području županije i često su prouzrokovale probleme na objektima. Došlo je do razmicanja i odvajanja dijelova građevina, pukotina na zidovima i temeljima te pukotina na opločnicima i cestama. Na slici 3-4 vidljiva je jedna takva pukotina koja se proteže kroz čak dva susjedna objekta.



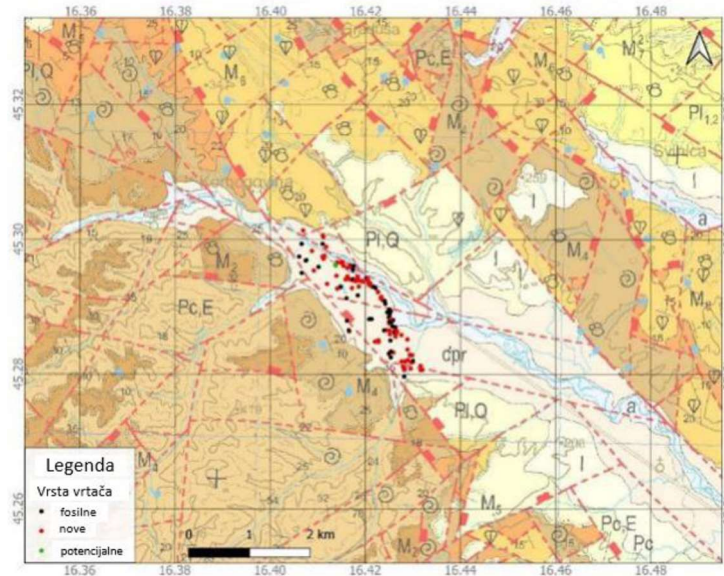
Slika 3-4. Pukotine u blizini objekata (Arhiva: Taus d.o.o., 2021)

Usljed gubitka, odnosno smanjenja, posmične čvrstoće zbog dinamičkog opterećenja na, većinom, već ranije aktiviranim klizištima došlo je do klizanja tla. Klizanja su bila vidljiva i na cestama, te su oštećenja sezala od tankih pukotina na asfaltu do pukotina širine nekoliko centimetara, pomaka dijelova ceste te naginjanja terena. Jedan primjer klizanja i oštećenja ceste prikazan je na slici 3-5.



Slika 3-5. Oštećenje ceste prilikom klizanja tla uzrokovanog potresom (Tomac i dr., 2021)

Zadnja posljedica potresa koju ćemo spomenuti su pokrovno-urušne vrtače. Vrtače su posebno privukle pozornost stručnjaka jer ih se na području od približno 1 km² otvorilo preko 100 (slika 3-6).



Slika 3-6. OGK Hrvatske s označenim vrtačama (Tomac i dr., 2021)

Vrtače pronađene na području Mečenčana i Borojevića nastale su zbog kombinacije jako okršenog vapnenca i čvrstog pokrovnog glinenog sloja. Razina vode koja se tijekom kišnih razdoblja podiže ispirala je čestice pokrovnog sitnozrnog tla i odnosila ih kroz okršeni propusni vapnenac u njegove šupljine. Postupnim odnošenjem čestica u čvrstom sloju gline stvarala se sve veća kaverna. Kako je glineni sloj, o čijim će se karakteristikama detaljnije pisati u nastavku rada, velike čvrstoće prilikom odnošenja čestica nije došlo do slijeganja tla te tako vrtače nisu mogle biti predviđene. Kod pokrovno-urušnih vrtača nema slijeganja koje postepeno stvara udubljenje, nego je kolaps iznenadan i trenutačan. Tijekom kišnih razdoblja se težina tla povećava, a istovremeno se smanjuje njegova čvrstoća. Najčešće se promjeri takvih vrtača vrlo malo ili nimalo povećaju tijekom vremena.

Bitna karakteristika vrtača na promatranom području su sub-vertikalne do vertikalne stijenke vrtače.

Promjeri vrtača kretali su se od 0,45 m do 25,0 m, dok su dubine varirale od 0,2 m do 11,7 m. Zračna snimka, slika 3-7, vrtača u selu Mečenčani prikazuje nove vrtače (bijeke kružnice) nastale nakon potresa i stare vrtače (crne kružnice) nastale prije potresa. Veličine kružnica približne su veličinama vrtača.



Slika 3-7. Zračna snimka vrtača na području sela Mečenčani (Tomac i dr., 2021)

Najveća vrtača (slika 3-8) nalazila se na području Mečenčana i tema je ovog rada, a detaljnije će biti opisana u poglavlju 4.



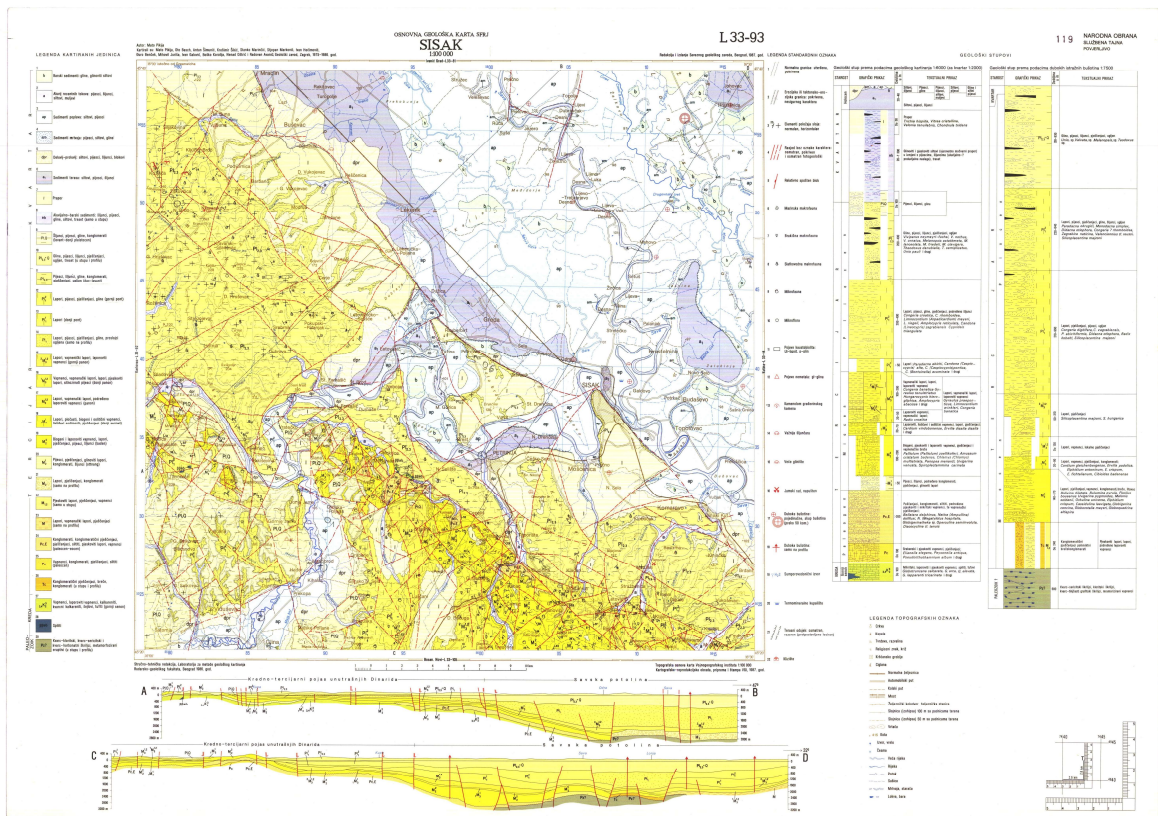
Slika 3-8. Najveća urušna vrtača nastala nakon potresa (Tomac i dr., 2021)

3.3. Geologija i hidrogeologija područja

Kao što je već ranije napomenuto, nastanak brojnih vrtača na malom području posljedica je specifične geologije područja koju odlikuje kombinacija visoko karstificiranog vapnenca i debelog glinenog pokrova.

Karbonati srednjeg miocena sastavljeni su od izmjeničnih visoko poroznih litotamnijskih vapnenaca i kalkarenita. Obje stijene vrlo su osjetljive na karstifikaciju. Takvi karbonati prekriveni su nizom holocenskih deluvijalno-proluvijalnih naslaga debljine od 4 m do 15 m. Naslage se pretežno sastoje od glina s međuslojevima i lećama šljunaka i pijesaka.

U dijelovima gdje su karbonati prekriveni nepropusnim laporima ili tamo gdje holocenske deluvijalno-proluvijalne naslage prekrivaju neku drugu litološku jedinicu nema zabilježenih vrtača. Strukturne jedinice područja prikazane su na osnovnoj geološkoj karti SFRJ, list Sisak (slika 3-9).



Slika 3-9. Osnovna geološka karta SFRJ, list Sisak 1:100 000 (Pikija i dr., 1986).

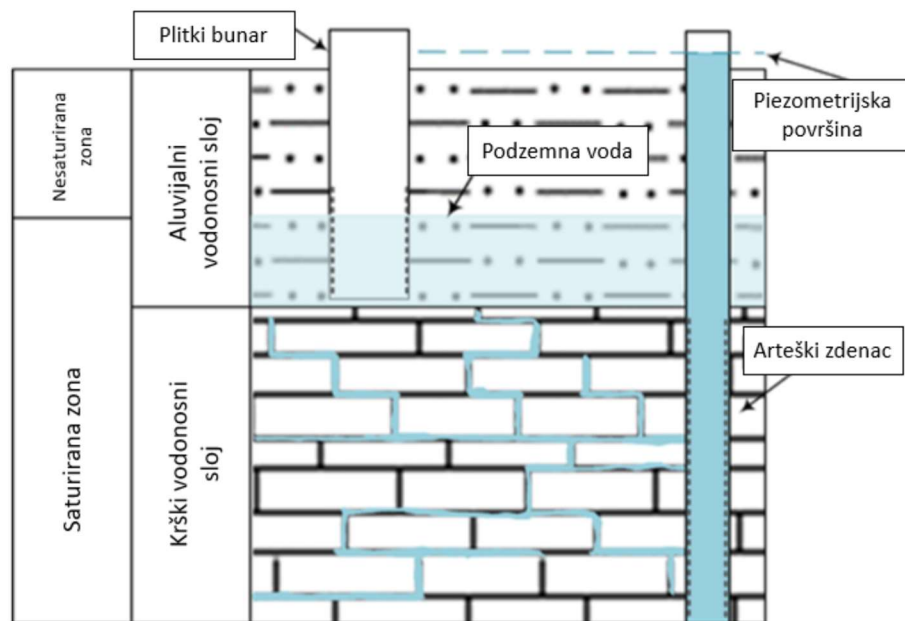
Proučavano područje rijeke Sunje predstavlja ravni teren prekriven slojevima sedimenta niske propusnosti koji potječu iz razdoblja holocena. Slojevi sedimenta tvore barijeru za protok vode te tako tvore vodonosni sloj iz kojeg se iskorištava manja količina vode dovoljna za kućanstva na tom području od kojih većina crpi vodu iz bunara dubina oko 8 m. Razina podzemne vode između sušnih i kišnih razdoblja varira za približno 2 m.

Ispod nepropusnog sloja sedimenta nalazi se sloj propusnog krškog vodonosnika zatvorenog s donje i gornje strane. Tijekom vlažnih razdoblje tlak vode u krškom vodonosniku raste do te mjere da može doseći subarteške do arteške razine. Arteški pritisak pojavljuje se kada se u području okruženom nepropusnim naslagama zadržava voda koja se nastavlja akumulirati. Na taj način tlak vode raste i može doći do spontanog izviranja vode na površini.

Ovu pojavu je bitno napomenuti kod slučaja nastanka vrtača jer upravo voda koja se pod tlakom podiže prema površini može biti uzrok ispiranja čestica u koherentnom sloju na granici glina i vapnenaca.

Krški vodonosnik vodu prima uslijed oborina koje se procjeđuju s obližnjih brda. Mjesta ispuštanja vode iz vodonosnika su izvori i ponori, od kojih je najznačajniji izvor Pašino vrelo.

Tijekom kišnih razdoblja piezometarska razina krškog vodonosnika veća je od razine podzemne vode aluvijalnog vodonosnika, dok su tijekom suhih razdoblja obje razine izjednačene. Kako se potres dogodio u kišnom razdoblju pretpostavlja se da je piezometarska razina krškog vodonosnika vjerojatno bila nešto iznad površine, dok je razina podzemne vode bila ispod površine (slika 3-10).



Slika 3-10. Pretpostavka piezometarske razine krškog i aluvijalnog vodonosnika (Tomic i dr., 2021)

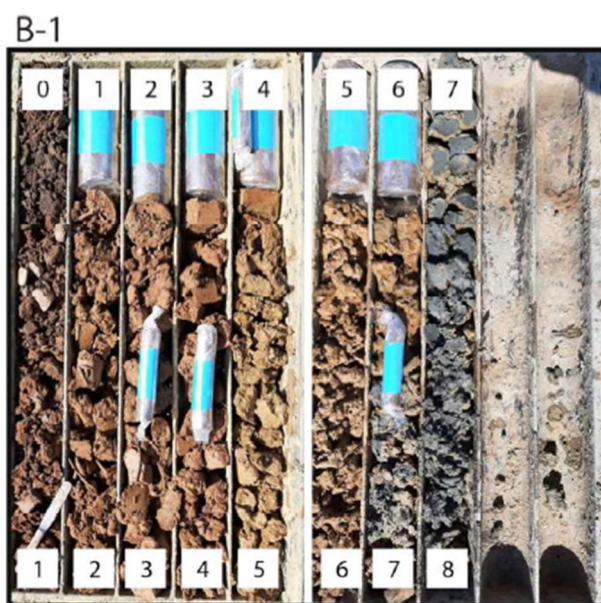
4. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI PROVEDENI NA ISTRAŽIVANOM PODRUČJU

Radi razumijevanja složenih deformacija nastalih nakon potresa i fenomena tečenja vode na području izvedeni su geotehnički istražni radovi te laboratorijska ispitivanja na uzetim uzorcima iz bušotina B-1 i B-2. Kako je najveća vrtača predmet rada spomenuti su samo istražni radovi koji su bili od koristi za pripremu numeričkog modela tla.

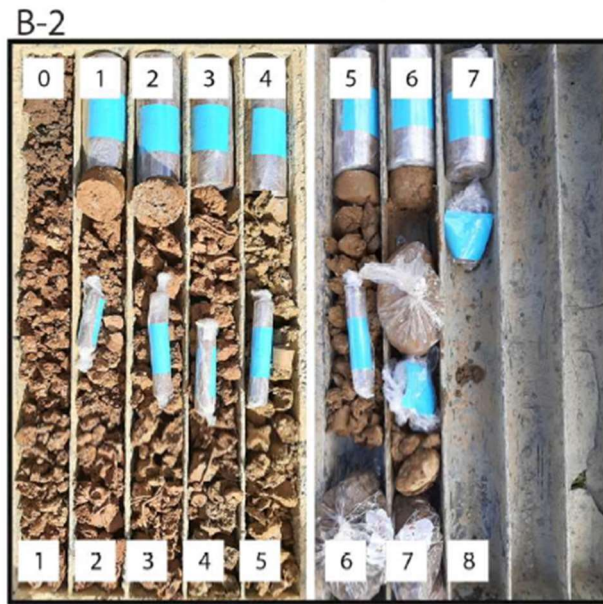
4.1. Terenski istražni radovi

U blizini vrtače napravljene su dvije sondažne bušotine B-1 i B-2 do dubine od približno 8,0 m. Daljnji napredak bušenja nije bio moguć zbog povećanja sadržaja čestica veličine šljunka (dijelovi okršenog vapnenca). Tijekom bušenja te 3 sata i 3 dana nakon bušenja su praćene promjene razine vode. Razina podzemne vode izmjerena 15. veljače 2021. bila je na 2,4 m i od tada je bila relativno stabilna (Tomac i dr., 2021).

Iz jezgre bušotina B-1 i B-2 moglo se vidjeti da se prvih 0,5 m sastoji od ispune organskog sadržaja (O) ispod koje je 3,5 m pjeskovite, nisko do visokoplastične gline, čvrste do krute konzistencije s tragovima čestica vapnenačke podloge oštih rubova i veličina promjera do 20 mm u bušotini B-1 i 50 mm u bušotini B-2 (CL/CH). Nakon sloja čvrste do krute gline je sloj krute do vrlo krute niskoplastične gline i niskoplastične gline s pijeskom (CL). Na dnu bušotina B-1 je sloj niskoplastične gline (CL), dok je na dnu bušotina B-2 vrlo vlažni glinoviti pijesak sa šljunkom (SP-SC/SC) (Tomac i dr., 2021). Jezgre bušotina B-1 i B-2 s pripremljenim uzorcima za laboratorij prikazane su na slikama 4-1 i 4-2.

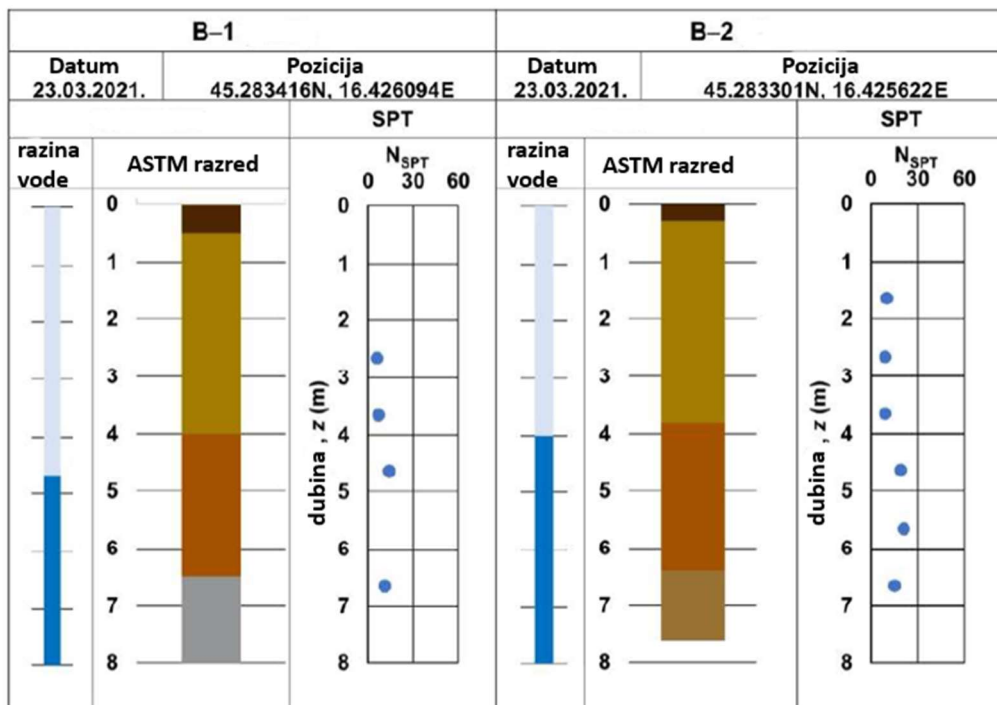


Slika 4-1. Jezgra bušotine B-1 (Tomac i dr., 2021)



Slika 4-2. Jezgra bušotine B-2 (Tomac i dr., 2021)

Tijekom bušenja je na razmacima od oko 1,0 m izveden i standardni penetracijski test (SPT). SPT je izveden standardnom opremom s utegom mase 63,5 kg koji se spušta s visine od 760 mm. Grafički prikazi bušotina B-1 i B-2 zajedno s rezultatima SPT-a prikazani su na slici 4-3.

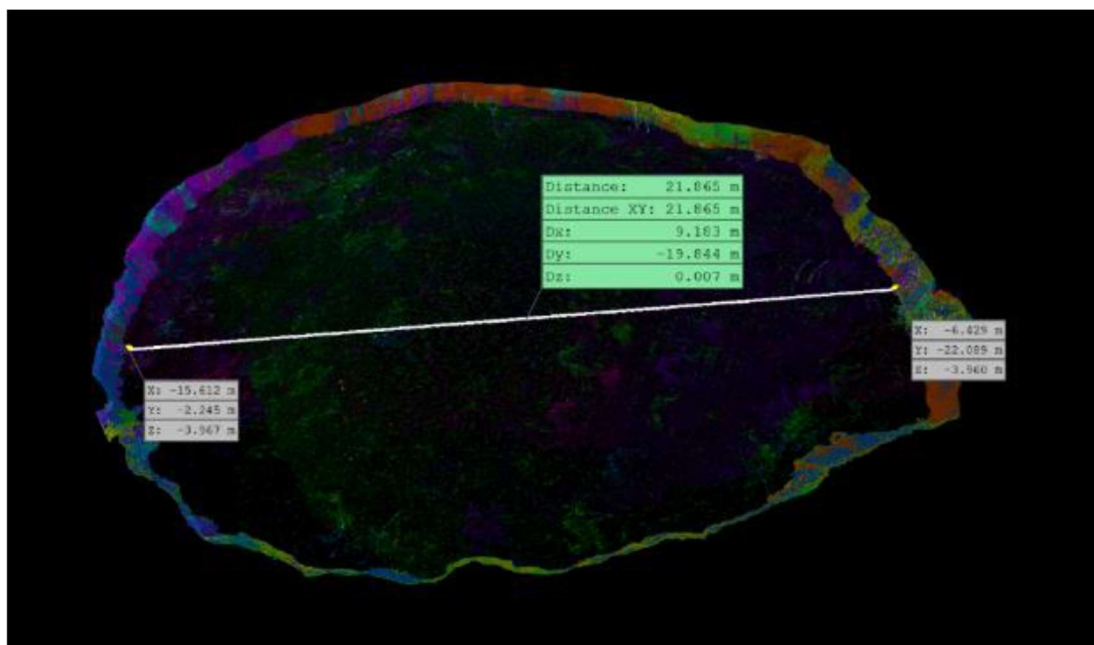


Slika 4-3. Grafički prikaz bušotina B-1 i B-2 (Tomac i dr., 2021)

Slike 4-4 i 4-5 prikazuju fotografije najveće vrtače na području Mečenčana snimljene LiDAR-om – multisenzorskim zračnim snimanjem. Snimanjem su određeni promjeri vrtače od kojih je najveći promjer na vrhu vrtače označen na slici 4-4 i iznosio je 24,55 m, dok je najveći promjer dna vrtače 21,865 m prikazan na slici 4-5.



Slika 4-4. LiDAR-ska snimka najveće vrtače u Mečenčanima, promjer vrha vrtače (Tomac i dr., 2021)

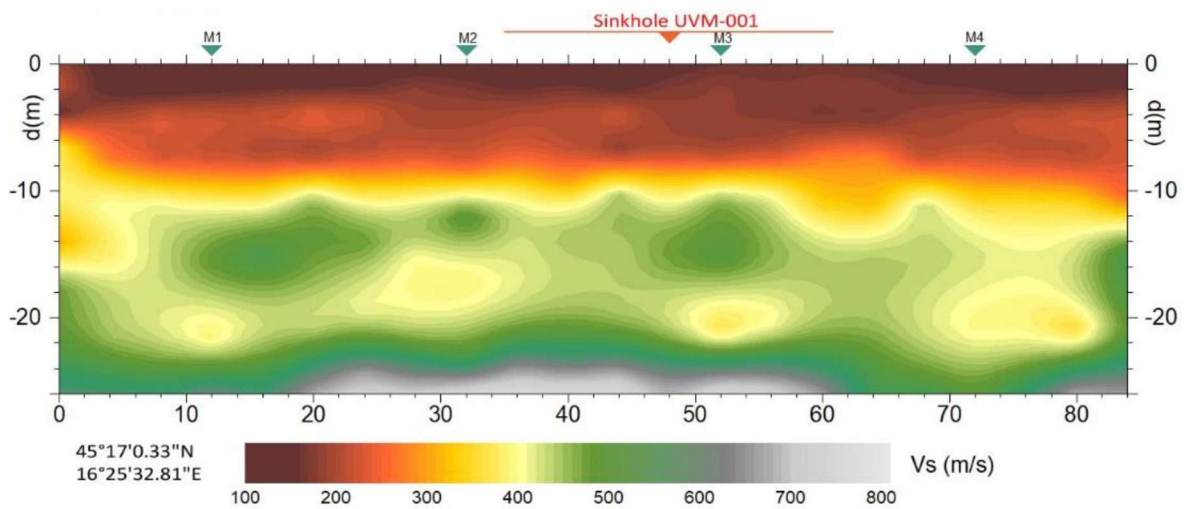


Slika 4-5. LiDAR-ska snimka najveće vrtače u Mečenčanima, promjer dna vrtače (Tomac i dr., 2021)

Snimanje kontura dna vrtače nije bilo moguće zbog visoke razine vode u vrtači.

Od geofizičkih metoda izvedena je višekanalna analiza površinskih valova (MASW). MASW je seizmička geofizička metoda koja se koristi za procjenu debljina slojeva tla, brzina posmičnih valova i gustoće tla. Temeljena je na analizi površinskih seizmičkih valova iz umjetnih izvora (npr. čekić).

Iz MASW analize su dobivene gustoće trošnog krša i iznosile su 2290 kg/m^3 i 2062 kg/m^3 , što je ukazalo na značajnu prisutnost šupljina u netaknutoj stijeni. Iz profila (slika 4-6) dobivenog snimanjem odredili smo granicu glinenog pokrova i okršenog vapnenca na 8 m, te granicu između okršenog i netaknutog vapnenca na dubini od 25 m.



Slika 4-6. MASW profil ispod najveće vrtače (Tomac i dr., 2021)

4.2. Laboratorijska ispitivanja

Od laboratorijskih ispitivanja izvedena su određivanja Atterbergovih granica, određivanja prirodne vlažnosti, jedinične težine, gustoće, granulometrijskog sastava, edometarski pokus, troosno ispitivanje i dr.

Geotehnička svojstva uzoraka tla iz bušotina B-1 i B-2 prikazana su u tablici 4.1.

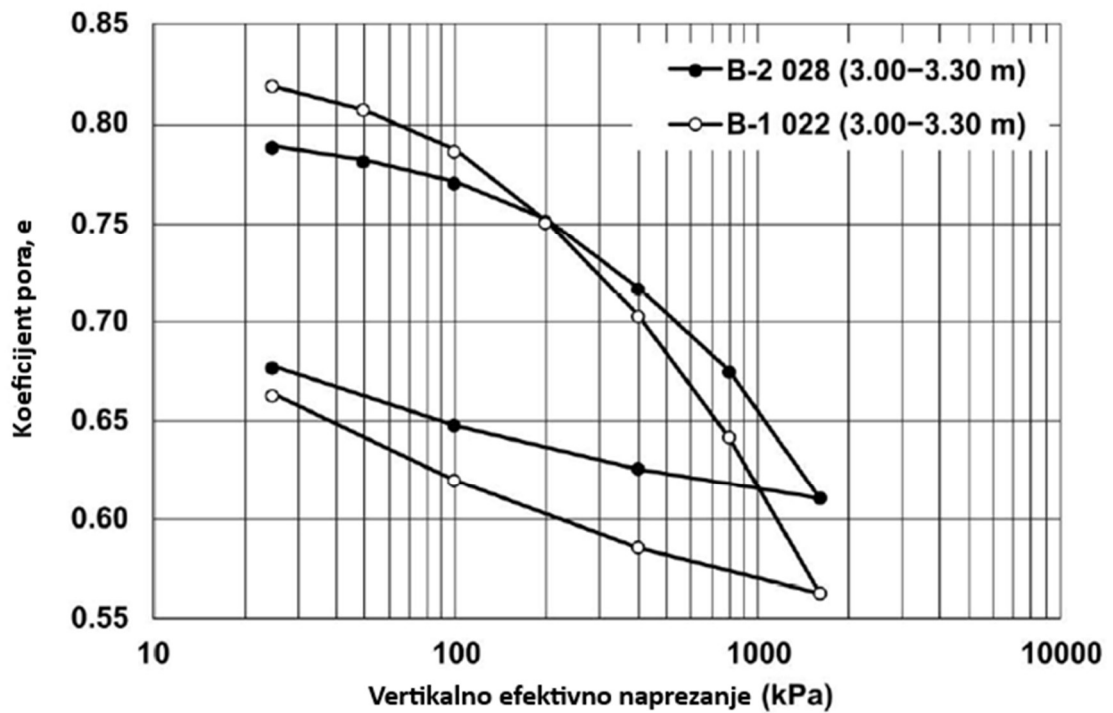
Tablica 4-1. Geotehnička svojstva uzoraka iz bušotina B-1 i B-2 (Tomac i dr., 2021)

Broj uzorka	Dubina (m)	USCS simbol	Prirodna vlažnost (%)	Granica tečenja (%)	Granica plastičnosti (%)
B-1 020	1.00 – 1.30	CH	17.8	51	22
B-1 005	1.70 – 2.00	CL	23.7	43	18
B-1 021	2.00 – 2.15	-	20.7	-	-
B-1 021	2.15 – 2.30	CL	23.2	38	17
B-1 033	2.50 – 2.80	CH	29.1	53	22
B-1 022	3.00 – 3.30	CH	28.9	56	26
B-1 034	3.50 – 3.80	CH	30.1	54	25
B-1 023	4.00 – 4.30	CL	32.2	47	25
B-1 035	4.50 – 4.80	CL	24.5	45	23
B-1 008	4.70 – 5.00	CL	30.7	46	21
B-1 025	6.00 – 6.30	CL	22.1	41	23
B-1 036	6.50 – 6.80	CL	24.9	38	21
B-1 010	7.00 – 7.50	CL	28.8	39	22
B-2 012	0.50 – 1.00	CH	23.7	59	24
B-2 026	1.00 – 1.30	-	20.1	-	-
B-2 037	1.50 – 1.80	-	18.3	-	-
B-2 013	1.80 – 2.00	-	24.6	-	-
B-2 027	2.00 – 2.30	CL	25.1	45	20
B-2 038	2.50 – 2.80	CH	27.8	51	23
B-2 014	2.80 – 3.00	CL	28.1	48	23
B-2 028	3.00 – 3.30	CL	25.7	47	23
B-2 039	3.50 – 3.80	CL	28.9	49	25
B-2 029	4.00 – 4.30	CL	25.3	43	24
B-2 040	4.50 – 4.80	CL	23.8	45	22
B-2 016	4.60 – 5.00	CL	22.4	42	21
B-2 030	5.00 – 5.15	-	23.5	-	-
B-2 030	5.15 – 5.30	CL	22.5	38	22
B-2 041	5.50 – 5.80	CL	24.4	43	22
B-2 031	6.00 – 6.30	CL	21.9	32	19

Edometarski pokus izveden je na jednom uzorku iz bušotine B-1 (022) i jednom uzorku iz B-2 (028). Ispitivanja su izvedena prema ASTM standardu, a rezultati su prikazani na slici 4-7. Vertikalna efektivna naprezanja prekonsolidacije od 230 kPa i 310 kPa zajedno s rezultatima troosnog nedreniranog ispitivanja ukazuju na to da je sloj CL/CH prekonsolidiran, kao i sloj CL. Stupanj prekonsolidacije za oba uzorka određen je Casagrandeovim postupkom. U postupku su korištene dvije različite dubine podzemne vode, razina zabilježena tijekom bušenja i razina vode unutar vrtače. Iz tog razloga dobivene su dvije vrijednosti stupnja prekonsolidacije, a one iznose 3.9 i 4.4 (Tomac i dr., 2021).

Zbog nedostatka podataka o parametrima čvrstoće slojeva bušotine B1, kut unutarnjeg trenja uzet je iz pokusa izravnog posmika na bušotini u blizini (Rudec, 2021) te je za

plastične analize pretpostavljen konstantan kut trenja unutarnjeg od 30° , dok je početna kohezija iznosila 30 kPa.



Slika 4-7. Rezultati edometarskog ispitivanja (Tomac i dr., 2021)

5. NUMERIČKO MODELIRANJE POKROVNO URUŠNE VRTAČE

Kao što je već rečeno, predmetna vrtača ovog rada najveća je vrtača nastala u Mečenčanima nakon Petrinjskog potresa, promjera oko 25,0 m i dubine 11,7 m. Koordinate nastale vrtače su 45.283352° N i 16.425852° E, udaljene dvadesetak kilometara od epicentra potresa.

Kako bi se razumio nastanak tako velikih vrtača na Petrinjskom području modelirana je kaverna, pretpostavljenih dimenzija i oblika, koja je uzrokovala nastanak vrtače navedenih dimenzija i oblika. Također je napravljen dijagram koji pokazuje ovisnost faktora sigurnosti o parametrima tla, debljini pokrovnog sloja i veličini kaverne. Cilj je procijeniti stanje stabilnosti, na samom mjestu gdje je ranije utvrđena dubina kaverne i njene dimenzije te opterećenje na vrhu kaverne, koristeći ranije spomenuti dijagram koji je kasnije u tekstu objašnjen i prikazan.

5.1. Korištene numeričke analize i modeli tla

Svi proračuni provedeni su u računalnom programu PLAXIS 2D metodom konačnih elemenata. Korištena je plastična i sigurnosna analiza, a za tlo su korišteni model ojačanog tla (HS) i Mohr-Coulombov model (MC). HS model korišten je za modeliranje sloja prekonsolidirane gline, dok je MC model korišten za okršeni i netaknuti sloj vapnenca. Svi konstitutivni modeli tla i analize bit će objašnjeni u nastavku.

5.1.1. Sigurnosna analiza

Sigurnosna analiza koristi se za izračun globalnog faktora sigurnosti numeričkog modela, koji je također poznat kao faktor smanjenja čvrstoće (eng. *Strength Reduction Factor – SRF*). Parametri čvrstoće modela smanjuju se za određenu vrijednost faktora smanjenja čvrstoće sve dok se modelu ne dobije slom, tako da vrijedi:

$$\tau = \frac{c' + \sigma' \tan \varphi}{SRF} \quad (5-1)$$

gdje su: τ – posmično naprezanje
 c' – kohezija
 σ' – efektivno vertikalno naprezanje
 φ – kut unutarnjeg trenja
 SRF – faktor smanjenja čvrstoće

5.1.2. Plastična analiza

Plastična analiza uzima u obzir nelinearno i plastično ponašanje tla, a koristi se za izvođenje analize elastično-plastičnih deformacija. Proračun se temelji na teoriji malih deformacija. Matrica krutosti za izračun se temelji na originalnoj nepromijenjenoj geometriji. Ova analiza koristi se za potpuno dreniranu analizu kojom se mogu procijeniti deformacije pri zadanim parametrima tla.

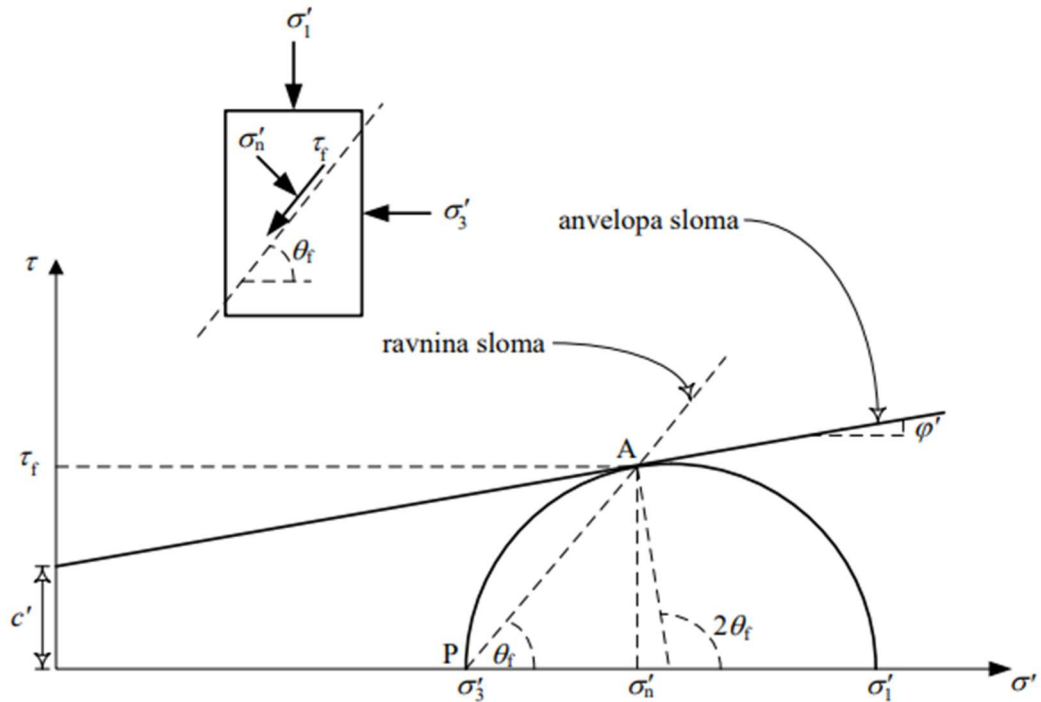
5.1.3. Mohr-Coulombov model tla

Mohr-Coulombov model tla jednostavan je linearno elastičan savršeno plastičan model. Linearno elastični dio MC modela temelji se na Hookovom zakonu o izotropnoj elastičnosti, dok se savršeno plastični dio temelji na Mohr-Coulombovom kriteriju čvrstoće (jednadžba 5-2).

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5-2)$$

gdje je: τ – posmično naprezanje
 c – kohezija
 σ – normalno naprezanje
 φ – kut trenja

Mohr-Coulombov kriterij čvrstoće definira pravac u koordinatnom sustavu. Na ordinatu koordinatnog sustava nanose se vrijednosti posmične čvrstoće, dok se na apcisu nanose vrijednosti normalnog naprezanja. Odsječak pravca na ordinati odgovara koheziji, a nagib pravca u odnosu na apcisu kutu unutarnjeg trenja. σ'_1 i σ'_2 točke su kojima Mohrova kružnica siječe os apcise i određuju glavna naprezanja pri slomu tla. Grafički prikaz Mohrovog kriterija čvrstoće prikazan je na slici 5-1.

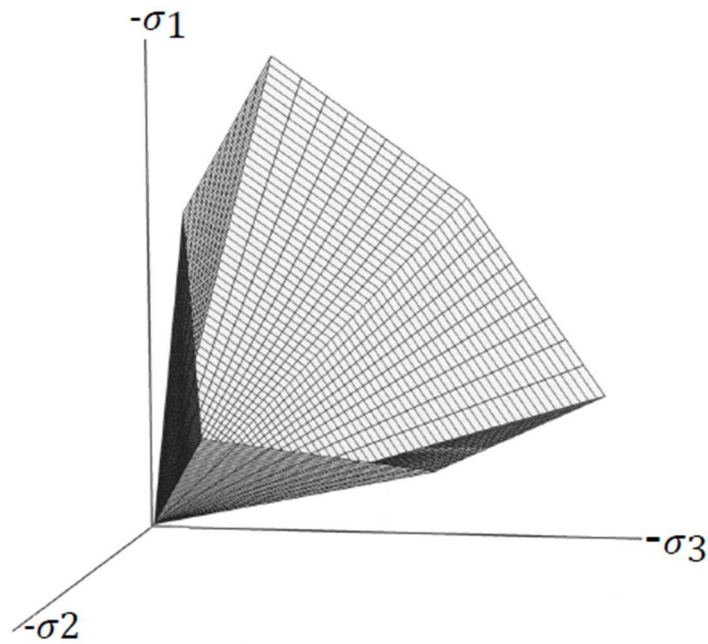


Slika 5-1. Mohr-Coulombov kriterij sloma (Szavits-Nossan, 2014)

Mohr-Coulombovo stanje popuštanja proširenje je Coulombovog zakona trenja na opća stanja naprezanja, a definirano je sa šest jednažbi popuštanja (jednažba 5-3).

$$\begin{aligned}
 f_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\varphi - \arccos\varphi \leq 0 \\
 f_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\sin\varphi - \arccos\varphi \leq 0 \\
 f_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\varphi - \arccos\varphi \leq 0 \\
 f_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\varphi - \arccos\varphi \leq 0 \\
 f_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\varphi - \arccos\varphi \leq 0 \\
 f_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\sin\varphi - \arccos\varphi \leq 0
 \end{aligned}
 \tag{5-3}$$

Uvjet $f_i = 0$ za sve jednažbe popuštanja zajedno predstavlja fiksirani heksagonalni stožac u prostoru glavnih naprezanja (slika 5-2).



Slika 5-2. Mohr-Coulombova ravnina popuštanja u prostoru glavnih naprezanja (PLAXIS, 2016)

Uz jednađbe popuštanja u Mohr-Coulombovom modelu tla definirano je i šest jednađbi plastičnosti (jednađba 5-4).

$$\begin{aligned}
 g_{1a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_3)\sin\psi \leq 0 \\
 g_{1b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_2)\sin\psi \leq 0 \\
 g_{2a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_3 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_3 + \sigma'_1)\sin\psi \leq 0 \\
 g_{2b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_3) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_3)\sin\psi \leq 0 \\
 g_{3a} &= \frac{1}{2}(\sigma'_1 - \sigma'_2) + \frac{1}{2}(\sigma'_1 + \sigma'_2)\sin\psi \leq 0 \\
 g_{3b} &= \frac{1}{2}(\sigma'_2 - \sigma'_1) + \frac{1}{2}(\sigma'_2 + \sigma'_1)\sin\psi \leq 0
 \end{aligned} \tag{5-4}$$

U navedenim jednađbama uvodi se treći parametar plastičnosti – kut dilatancije (ψ). Dilatancija je parametar koji nam govori kakva je promjena volumena tla uočena pri posmičnim deformacijama.

Za stanja naprezanja unutar ravnine popuštanja, ponašanje je elastično i, kao što je već rečeno, slijedi Hookeov zakon izotropne elastičnosti, pa se osim parametara plastičnosti – c , φ i ψ uvode ulazni parametri elastičnosti – Youngov modul (E') i Poissonov koeficijent (ν').

Ukoliko nam nije dostupan modul elastičnosti, za modeliranje krutosti možemo koristiti modul smicanja (jednadžba 5-5) i edometarski modul (jednadžba 5-6).

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (5-5)$$

$$E_{oed} = \frac{(1 - \nu) \cdot E}{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)} \quad (5-6)$$

gdje je: G – modul smicanja
 E – Youngov modul elastičnosti
 E_{oed} – edometarski modul
 ν – Poissonov koeficijent

5.1.4. Model ojačanog tla (HS model)

Model ojačanog tla je izabran jer je bolji za otkrivanje nelinearnog i plastičnog ponašanja tla do kojeg dolazi još u ranim stadijima naprezanja za koje linearno elastični modeli nisu adekvatni.

Za razliku od idealno plastičnog elastičnog modela, zona popuštanja u HS modelu nije fiksirana u glavnom prostoru naprezanja, nego se može proširiti zbog plastičnog naprezanja. Možemo razlikovati dvije vrste ojačavanja: ojačavanje tla smicanjem i kompresijsko ojačavanje. Ojačavanje smicanjem koristi se za modeliranje inverzibilnih deformacija zbog primarnog devijatorskog opterećenja i regulirano je sekantnom krutosti E_{50} pri 50% čvrstoće u troosnom ispitivanju. Kompresijsko ojačavanje koristi se za modeliranje nepovratnog plastičnog naprezanja uslijed primarne kompresije u edometarskom i izotropnom opterećenju i regulirano je edometarskom krutosti E_{oed} . Obje vrste ojačavanja implementirane su u HS modelu.

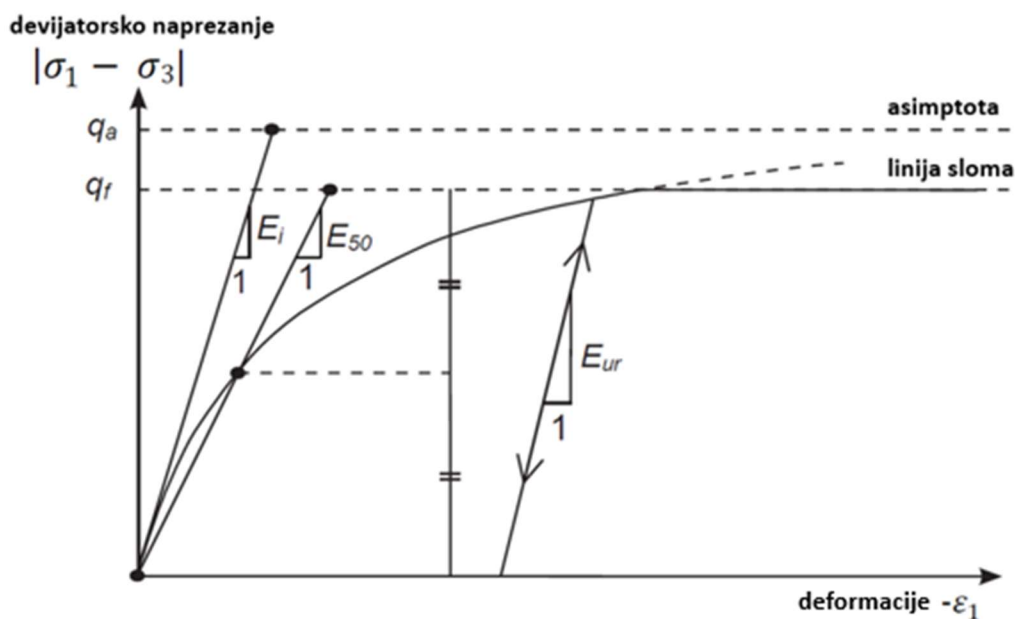
Tlo se ponaša elastično sve dok površina popuštanja nije aktivirana. Trag naprezanja u fazi rasterećenja i ponovnog opterećenja modeliran je kao elastičan, korištenjem krutosti za rasterećenje i ponovno opterećenje E_{ur} .

Površina posmičnog popuštanja pomiče se u q - p prostoru te na taj način početno naprezanje popuštanja može prijeći u naprezanje sloma. Deformacije u tlu smatraju se elastičnim u prostoru između površine posmičnog popuštanja i površine kompresijskog popuštanja, koja je definirana elipsom.

5.1.4.1. Ojačanje smicanjem

Na slici 5-3 prikazana je nelinearna krivulje odnosa naprezanja i defomacija za primarno opterećenja. Krivulja naprezanja-deformacija opisana je hiperboličkom funkcijom. Položaj devijatorske površine ojačanja povezan je s mobiliziranim kutom trenja i reguliran sekantnom krutosti E_{50} .

Tijekom faze rasterećenja i ponovnog opterećenja tlo se ponaša elastično i reakcija je tlo povećane krutosti. Linija sloma, q_f , odgovara Mohr-Coulombovom kriteriju sloma.



Slika 5-3. Hiperbolički odnos naprezanja i defomacija u primarnom opterećenu za standardno drenirano troosno ispitivanje (PLAXIS, 2016)

Kako bi se postigla hiperbolička funkcija bitni su moduli krutosti pri 50% čvrstoće za primarno opterećenje (E_{50}) i krutost tijekom faze rasterećenja/ponovnog opterećenja (E_{ur}), dok se u programu PLAXIS traže referentne vrijednosti istih parametara: E_{50}^{ref} , E_{oed}^{ref} i E_{ur}^{ref} . Navedeni parametri definirani su jednadžbama 5-7 i 5-8.

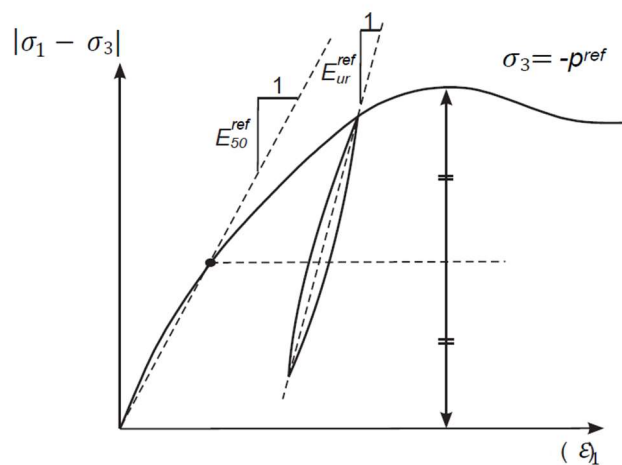
$$E_{ur} = E_{ur}^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi' - \sigma_3' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{ref} \sin \varphi'} \right)^m \quad (5-7)$$

$$E_{50} = E_{50}^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi' - \sigma_3' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + \sigma^{ref} \sin \varphi'} \right)^m \quad (5-8)$$

gdje je: E_{ur} – krutost tijekom faze rasterećenja/ponovnog opterećenja
 E_{ur}^{ref} – referentna krutost tijekom faze rasterećenja/ponovnog opterećenja
 p_{ref} – referentna vrijednost naprezanja
 E_{50} – sekantna krutost pri 50% čvrstoće u troosnom ispitivanju
 E_{50}^{ref} – referentna sekantna krutost pri 50% čvrstoće u troosnom ispitivanju
 c – kohezija
 φ – kut trenja

Omjer sloma R_f definiran je odnosom između krajnjih devijatorskih naprezanja (q_f) izvedenih iz Mohr-Coulombovog kriterija sloma i asimptote naprezanja q_a . Na taj način R_f ograničava naprezanje prilikom sloma i u programu PLAXIS po zadanim postavkama iznosi 0,9.

Definiranje referentnih modula E_{50}^{ref} i E_{ur}^{ref} iz troosnog dreniranog ispitivanja prikazano je slikom 5-4. Referentna vrijednost naprezanja (p^{ref}) definirana je programom PLAXIS i iznosi 100 kN/m².



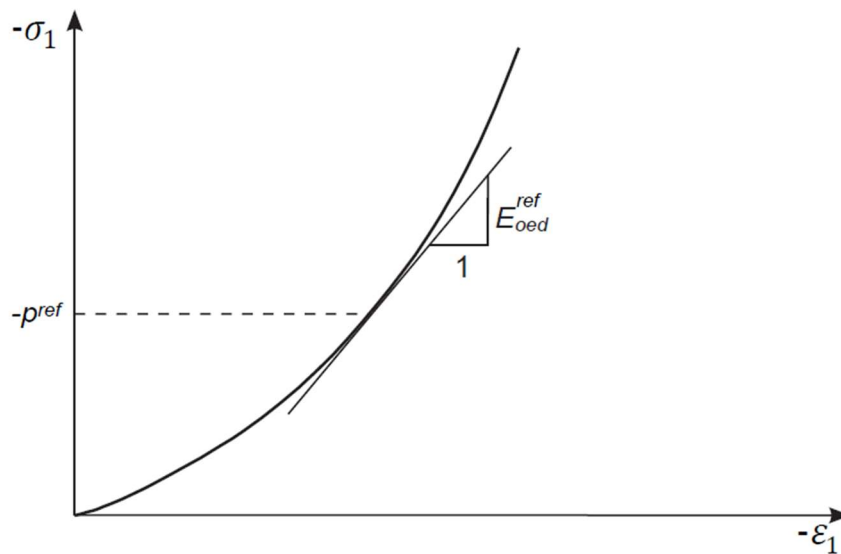
Slika 5-4. Definiranje E_{50}^{ref} i E_{ur}^{ref} za rezultate troosnog dreniranog ispitivanja (PLAXIS, 2016)

5.1.4.2. Kompresijsko ojačanje

Kao što je spomenuto ranije površina kompresijskog ojačanja definirana je elipsom i regulirana naprezanjem ovisnim modulom krutosti iz edometarskog testa E_{oed} , te je definiran jednačinom 5-9 i slikom 5-5.

$$E_{oed} = E_{oed}^{ref} \left(\frac{c' \cos \varphi' + \sigma_1' \sin \varphi'}{c' \cos \varphi' + p^{ref} \sin \varphi'} \right)^m \quad (5-9)$$

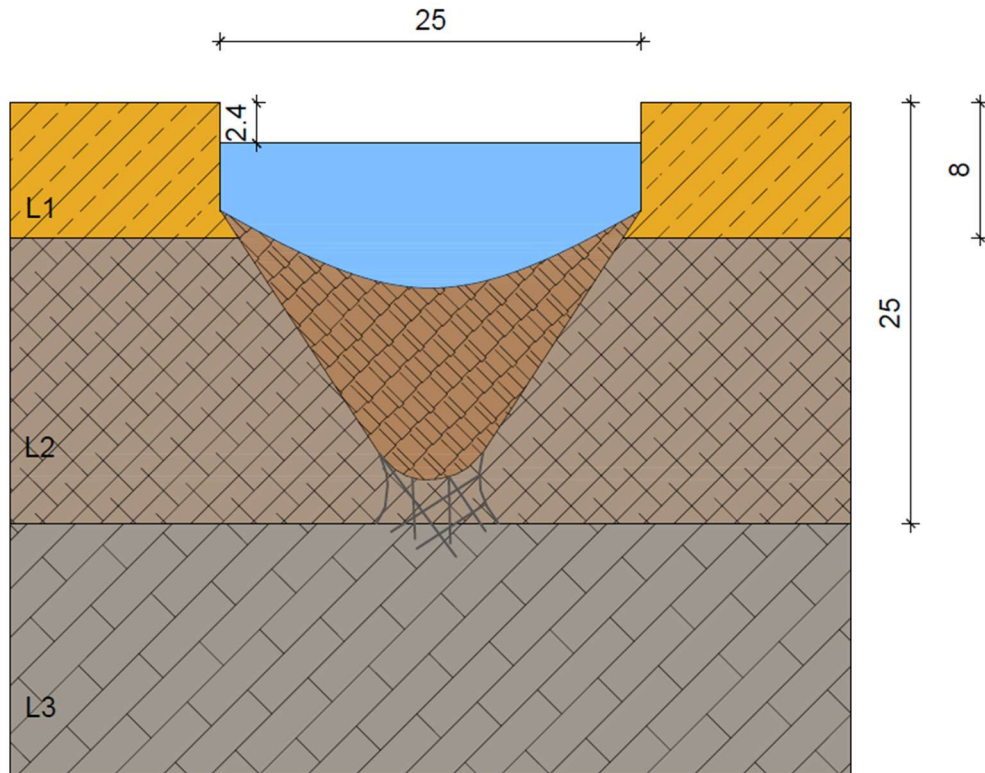
gdje je: E_{oed} – krutost iz edometarskog testa
 E_{oed}^{ref} – referentna krutost iz edometarskog testa



Slika 5-5. Definiranje E_{oed}^{ref} iz edometarskog ispitivanja (PLAXIS, 2016)

5.2. Numerički modeli i rezultati proračuna

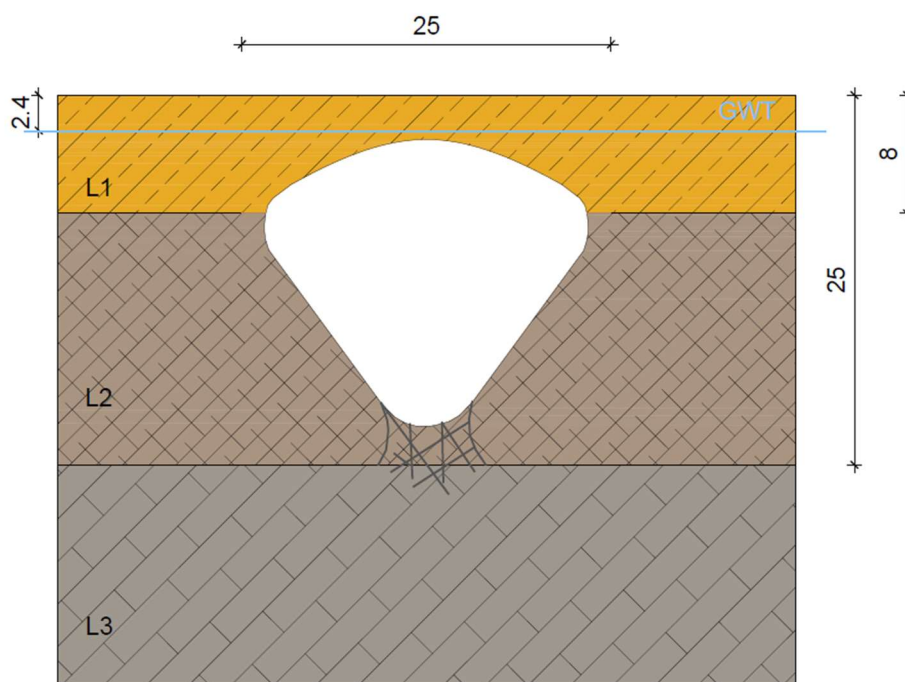
U ovom poglavlju opisan je postupak određivanja ulaznih parametara za numeričku analizu. Kako bi se došlo do svih potrebnih podataka za modeliranje pokrovno-urušne vrtače dobro je razmotrena geometrija vrtače nakon urušavanja, njezin oblik, parametri i dubine slojeva tla te uvjeti podzemne vode. Skica vrtače nakon urušavanja prikazana je na slici 5-6.



Slika 5-6. Poprečni presjek urušene vrtače

Oblik kaverne odabran je iz poznatog volumena materijala koji je bio potreban da bi se vrtača sanirala. Kako je prilikom urušavanja vrtače došlo do razrahljenja tla, pretpostavljeno je da je kaverna bila veća od poznatog volumena materijala, te je volumen neznatno uvećan (4600 m^3). Također je prilikom izrade modela bila bitna pretpostavka da je davno postojeća vrtača u kršu tijekom godina zatrpana sedimentom te je iz tog razloga ona u dnu ljevkastog oblika. U vrhu kaverne prilikom odnošenja čestica tla dolazi do lučenja zbog parametara koherentnih tala. Na temelju tih pretpostavki napravljen je poprečni presjek kaverne prikazan na slici 5-7.

Uzimajući u obzir volumen i geometriju vrtače, matematički je, pomoću stošca i odsječka kugle izračunato kolika je trebala biti debljina krovine iznad kaverne. Proračunom je dobivena debljina krovine od oko 3,0 m (slika 5-7).



Slika 5-7. Pretpostavljeni poprečni presjek kaverne prije urušavanja

Kao što je vidljivo iz prethodnih slika model je podijeljen u tri sloja tla. Kako napredovanje bušenja nije bilo moguće dublje od 8,0 m pretpostavljeno je da je na 8,0 m granica između koherentnog sloja tla i okršenog vapnenca. Geofizičkim istraživanjima je vapnenac podijeljen na dvije zone: okršeni vapnenac do 25,0 m, nakon kojeg slijedi sloj netaknutog vapnenca.

Iako je prvotno podzemna voda u bušotinama bila pronađena na 4,7 m (B1) i 4,0 m (B1), njena razina se naknadno stabilizirala na 2,4 m.

Na pojednostavljenom numeričkom modelu, različiti slojevi gline dobiveni terenskim istražnim radovima u bušotini B1 svedeni su na jedan glineni sloj debljine 8.0 m. Slojevi su imali slične vrijednosti jediničnih težina, prirodne vlažnosti te Attebergovih granica. Iz navedenih parametara uzeta je prosječna vrijednost.

Numerički proračuni u programu PLAXIS 2D izvedeni su za dva modela. Model 1 na slici 5-7 odgovara pretpostavljenom stvarnom izgledu kaverne prije urušavanja. Model 2 predstavlja idealizirani kružni oblik kaverne, a napravljen je radi provedbe parametarske analize kako bi se procijenio utjecaj parametara tla, debljine krovine i veličine kaverne na faktor sigurnosti.

5.2.1. Model 1

Kao što je već ranije rečeno, model ojačanog tla (HS model) korišten je za pokrovni sloj glinenog tla (L1), dok je za slojeve vapnenca (L2 i L3) korišten Mohr-Coulombov model tla.

Kako je u obzir uzeta samo bušotinu B1, zadan je osno-simetrični 15-čvorni tip modela, te je modelu zadana geometrija i pomoću strukturnih elemenata oblik vrtače (slika 5-8).

Geometrija modela po x osi produžena je na 100 m kako rubni uvjeti ne bi utjecali na rezultate proračuna.



Slika 5-8. Oblik kaverne tijekom modeliranja u PLAXIS 2D

Prije zadavanja strukturnih elemenata bilo je potrebno slojevima tla zadati parametre. Parametri vapnenca bili su konstantni, dok je vrijednost kohezije i krutosti sloja gline mijenjana dok nisu postignuta minimalna slijeganja. Naime, prije samog urušavanja pokrovnog sloja kaverne nisu bila primijećena slijeganja, što ukazuje na iznimno dobre parametre gline, a isto je trebalo potvrditi i numeričkim proračunima. Postupnim povećanjem parametara čvrstoće i krutosti dobivena su slijeganja od 11,0 cm, pri kojem ne dolazi do urušavanja tla, što bi se na promjeru od 25,0 m moglo smatrati neprimjetnim.

In-situ terenskim radovima, rezultatima laboratorijskih ispitivanja, iskustvenim podacima i povratnom numeričkom analizom određeni su parametri tla iz tablice 5-1. Parametri su korišteni za daljnje proračune u Modelu 1 i Modelu 2.

Važno je napomenuti da pri proračunima u obzir nije uzeto dinamičko opterećenje, pa navedeni parametri i rezultati ne odgovaraju u potpunosti stvarnom stanju tijekom potresa.

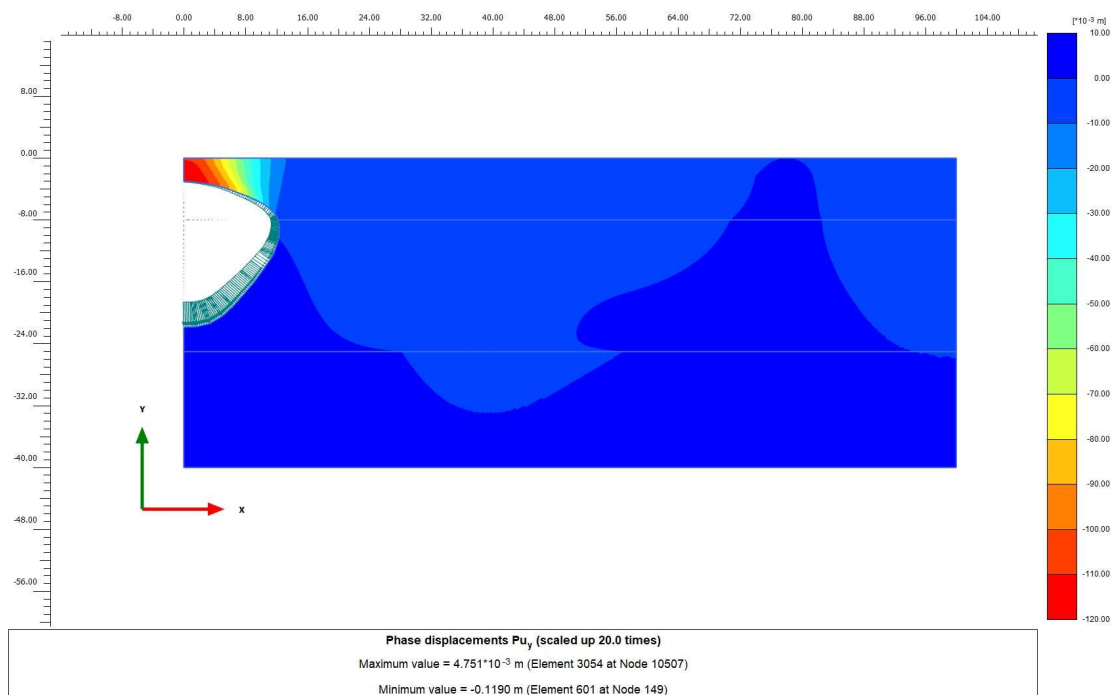
Tablica 5-1. Ulazni parametri za numeričke analize

Sloj tla	c [kPa]	ϕ [°]	E_s [kPa]	E_{oed} [kPa]	E_{ur} [kPa]	ν_{ur}
L1	80	30	8×10^4	8×10^4	24×10^4	0.3
L2	1300	35	1.6×10^5	-	-	0.3
L3	2500	40	7×10^6	-	-	0.25

Za oba modela proveden je tzv. fazni proračun sa sljedeće tri faze: inicijalna faza, plastičnu analizu i sigurnosna analiza. U inicijalnoj fazi je kaverna zapunjena materijalom gline i određeno je primarno stanje naprežanja. U drugoj fazi, plastičnoj analizi, materijal gline koji ispunjava kavernu je isključen, kao i u trećoj fazi, sigurnosnoj analizi.

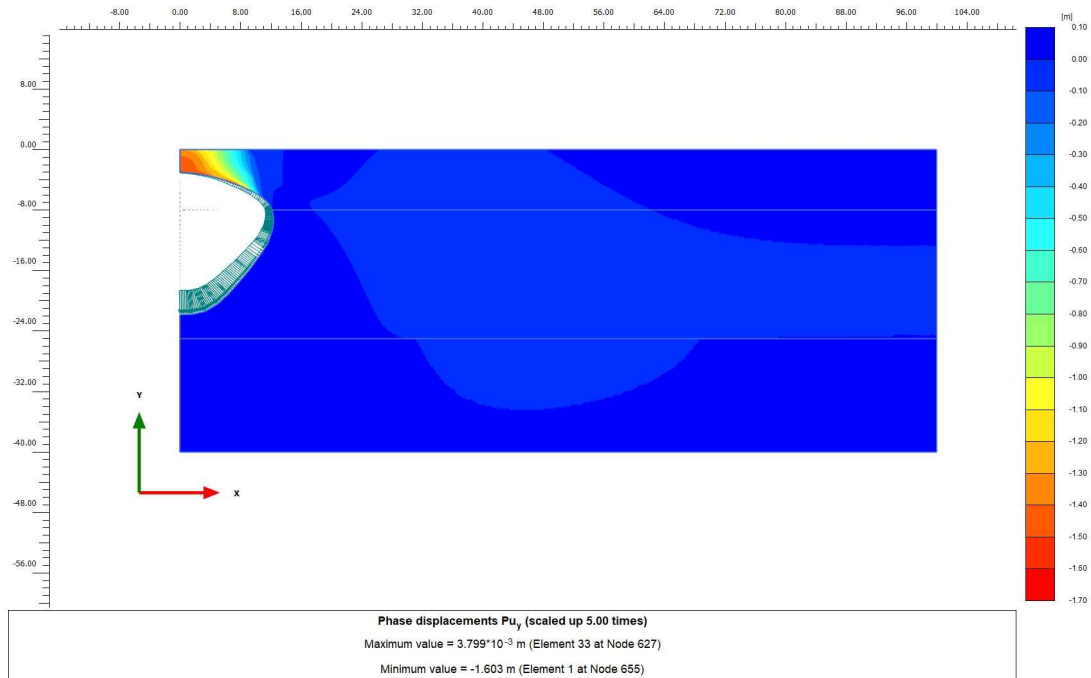
Slike 5-9, 5-10 i 5-11 prikazuju samo odabrane rezultate numeričkih proračuna Modela 1.

Slika 5-9 prikazuje vertikalne pomake Modela 1 u plastičnoj analizi u kojoj su slijeganja dobivena za zadane parametre tla iz tablice 5-1. Slijeganja od 11,0 cm rezultat su postupne promjene parametara čvrstoće i krutosti sve dok nije dobiveno minimalno slijeganje prilikom kojeg ne dolazi do sloma. Kako je i očekivano, najveća slijeganja su u središtu krovine kaverne.



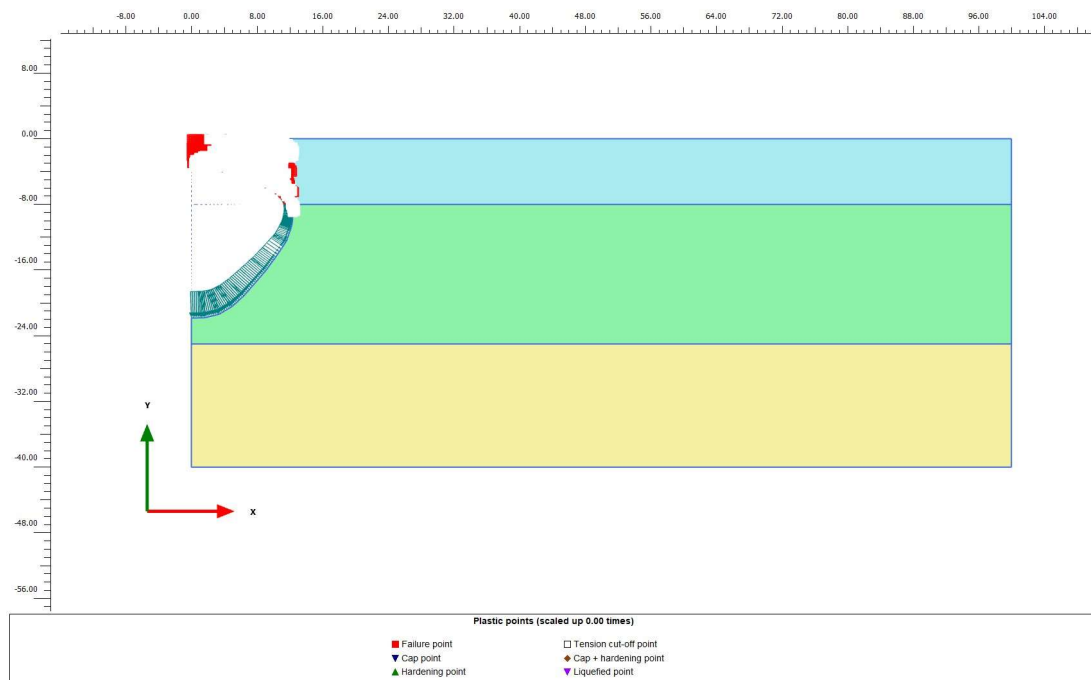
Slika 5-9. Vertikalni pomaci plastične analize Modela 1

Na slici 5-10 prikazani su vertikalni pomaci, odnosno slijeganja, Modela 1 u sigurnosnoj analizi. Sigurnosna analiza provedena je na principu smanjenja parametara čvrstoće sve dok ne dođe do sloma tla. Slijeganja su koncentrirana slično kao i u plastičnoj analizi, ali su zbog sloma tla vrijednosti slijeganja značajno veća te ukazuju na slom tla.



Slika 5-10. Vertikalni pomaci sigurnosne analize Modela 1

Točke sloma u sigurnosnoj analizi Modela 1 prikazane su na slici 5-11, a njihova raspodjela odgovara obliku i dimenzijama nastale vrtače.



Slika 5-11. Točke sloma u sigurnosnoj analizi Modela 1

Već je spomenuto da su u plastičnoj analizi mijenjani parametri čvrstoće i krutosti kako bi se dobili minimalni iznosi slijeganja pri kojima ne dolazi do sloma tla. Kako sigurnosna analiza rezultira slomom tla, rezultati plastične (slika 5-9) i sigurnosne (slika 5-10) analize su očekivano različiti, a faktor sigurnosti s odabranim parametrima veći je od 1, točnije 1,556. Kako dinamičko opterećenje nije uzeto u obzir razlike u rezultatima su bile očekivane.

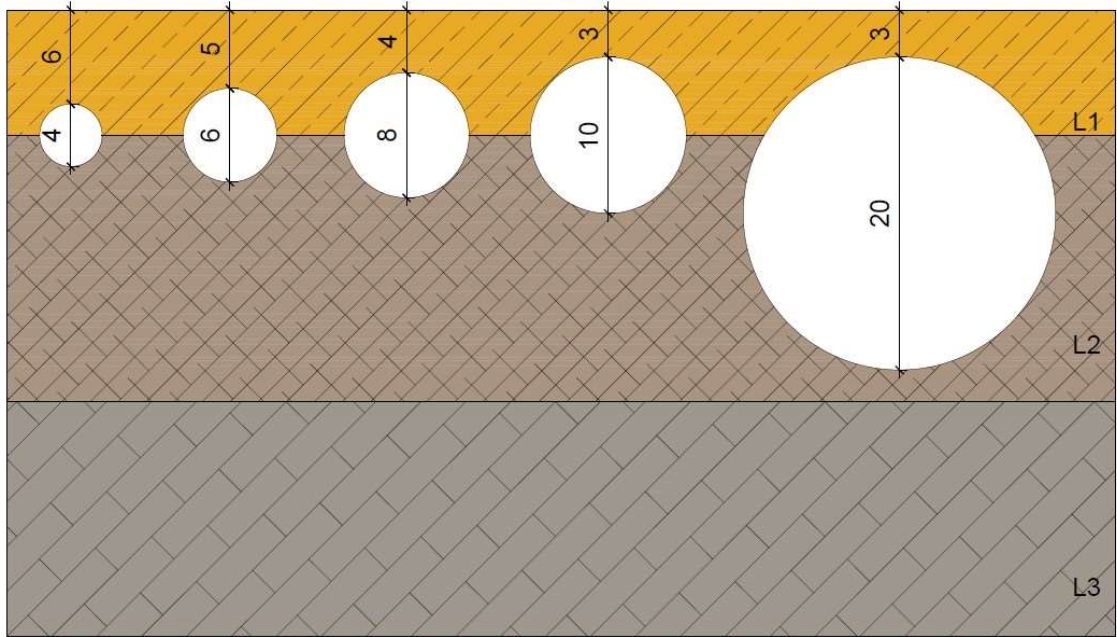
Iz rezultata vertikalnih pomaka i točaka sloma vidljivo je da je linija sloma približno ravna što bi odgovaralo vertikalnim stijenkama stvarne vrtače. Također se lom u horizontalnom smjeru širi do udaljenosti približno 12,5 m, što odgovara polumjeru vrtače. Navedene činjenice ukazuju na dobar odabir oblika kaverne i odabir ulaznih parametara. Kako odabir oblika kaverne utječe na preraspodjelu naprezanja i pomaka bit će vidljivo i u Modelu 2, za kojega su rezultati numeričke analize prikazani u nastavku.

5.2.2. Model 2

U Modelu 2 korišteni su gotovo svi isti parametri tla kao i u modelu 1, osim kohezije, te iste faze proračuna. Geometrija kaverne je pravilna kružnica kojoj su mijenjane dimenzije. Mijenjanjem dimenzija dolazi i do promjene debljine pokrovnog sloja tla iznad kaverne, a na taj način i do promjene naprezanja na vrhu kaverne. Osim geometrije kaverne, mijenjane su i vrijednosti kohezije, kako bi se promotriilo kako promjena parametara čvrstoće i naprezanja utječe na faktor sigurnosti, tj. na mogućnost urušavanja pokrovnog sloja kaverne i nastanka vrtače.

Sve kaverne smještene su tako da je polovina kružnice u sloju gline, a polovina u sloju vapnenca. Jedina iznimka je najveća kružnica, koja ujedno predstavlja idealiziranu kavernu čiji volumen odgovara volumenu kaverne iz Modela 1. Ovaj model je osim cilja navedenog u prethodnom odjeljku, imao za cilj usporediti kako oblik kaverne utječe na rezultate proračuna, pa je osim volumena kaverne i debljina krovine jednaka kao i u prethodnom modelu.

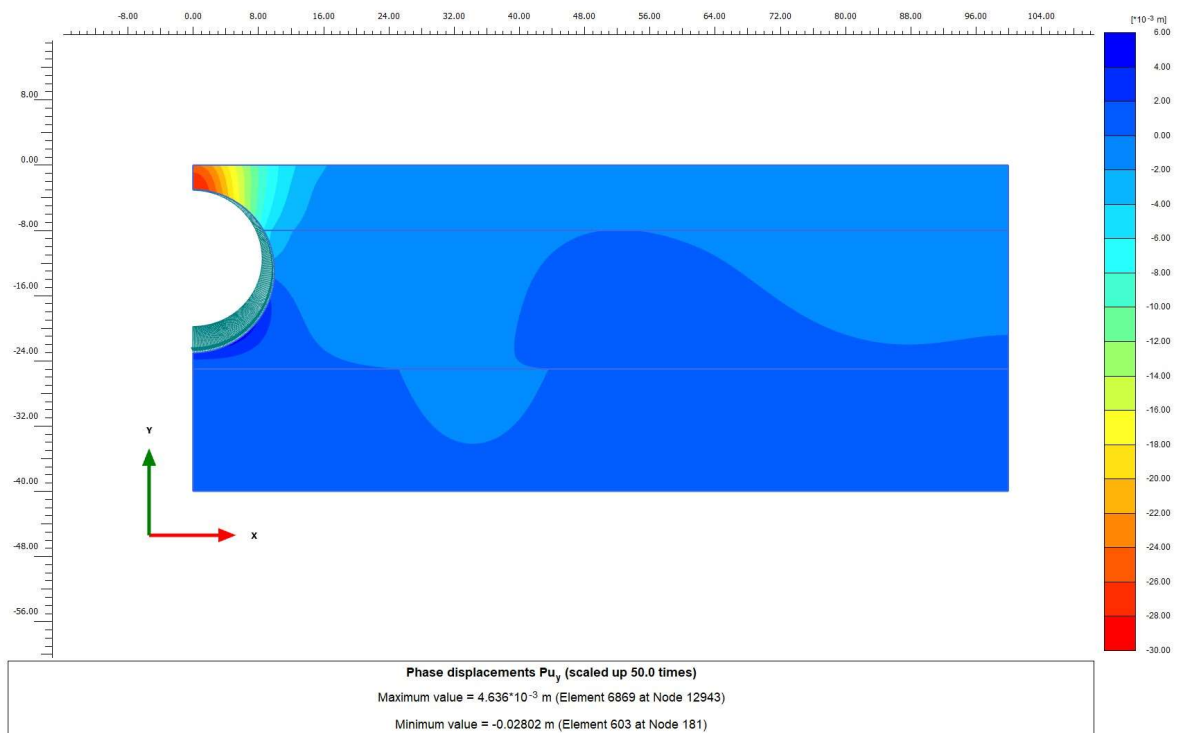
Sve korištene geometrije skicirane su na slici 5-12.



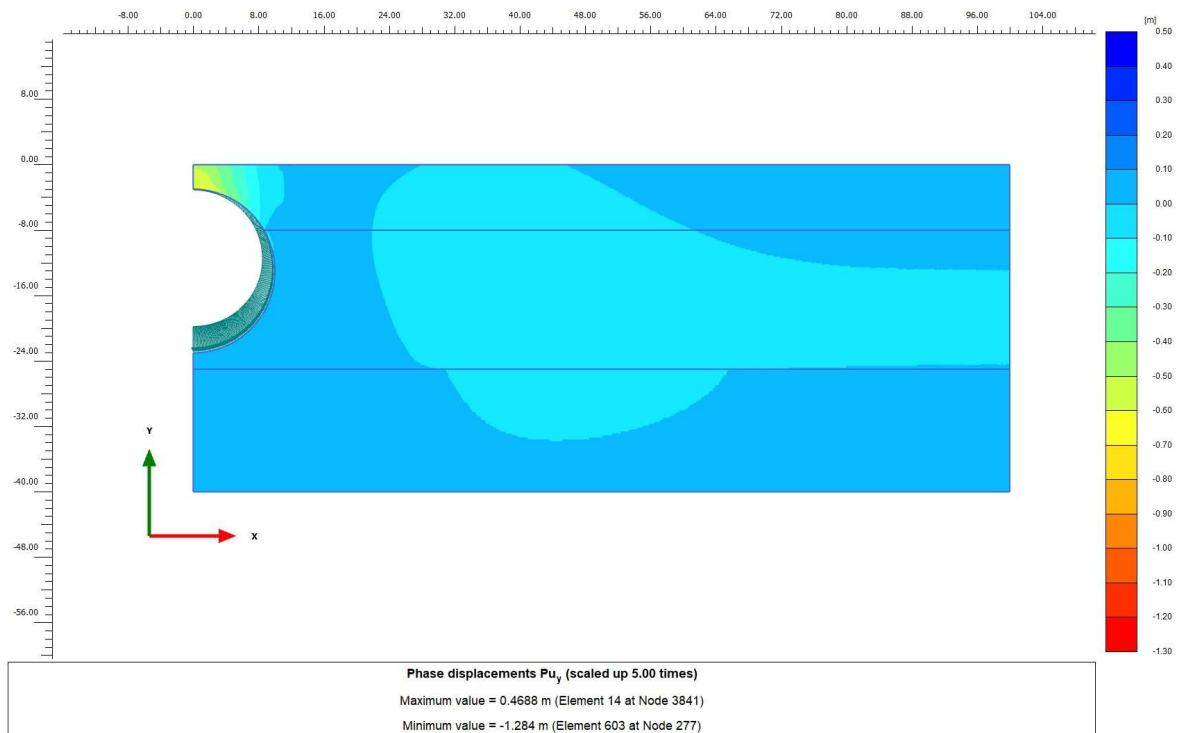
Slika 5-12. Geometrije Modela 2

Na slikama 5-13, 5-14 i 5-15 prikazani su rezultati numeričkih proračuna samo za najveću kavernu. Na slici 5-13 prikazani su vertikalni pomaci plastične analize, tj. slijeganja dobivena iz zadanih parametara tla koji odgovaraju parametrima iz tablice 5-1. Prilikom plastične analize nije došlo do sloma tla, a maksimalna slijeganja iznosila su oko 3,0 cm u središtu krovine kaverne.

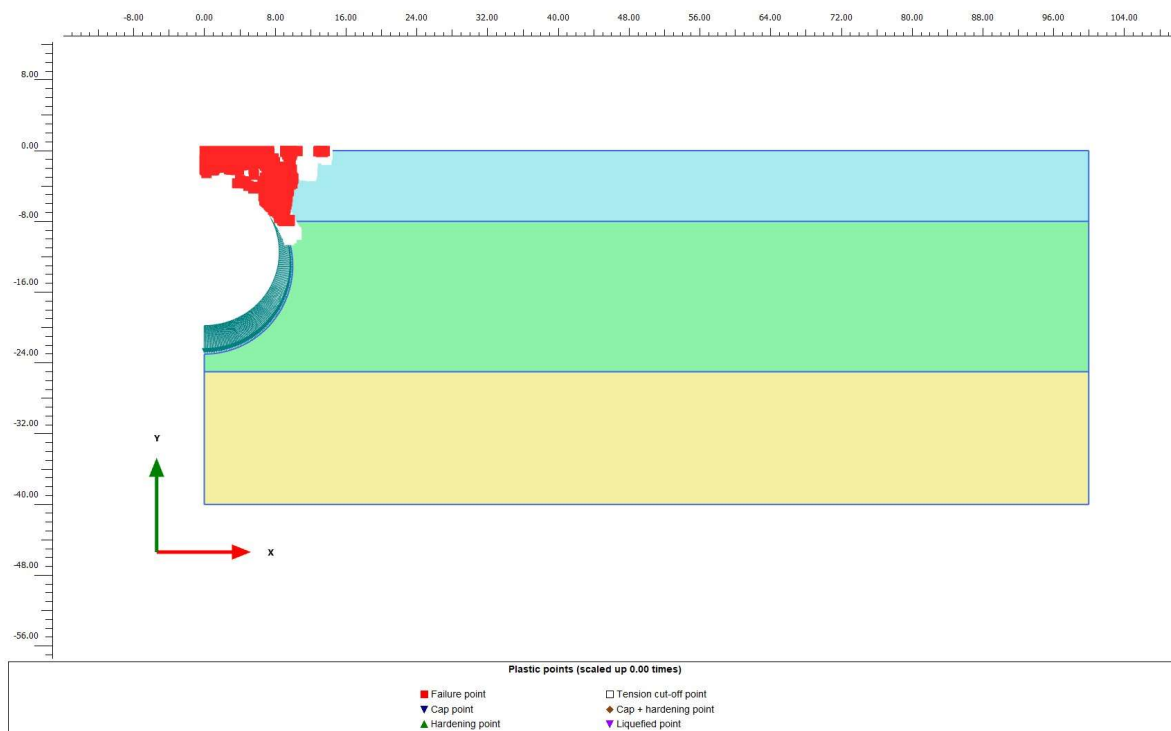
Vertikalni pomaci Modela 2 u sigurnosnoj analizi (slika 5-14) rezultat su smanjivanja parametara čvrstoće tla, do sloma tla, za faktor sigurnosti 1,4, a iznose 1,2 m. Slijeganja su koncentrirana u krovini kaverne u glinenom sloju.



Slika 5-13. Vertikalni pomaci plastične analize Modela 2



Slika 5-14. Vertikalni pomaci sigurnosne analize Modela 2



Slika 5-15. Točke sloma sigurnosne analize Modela 2

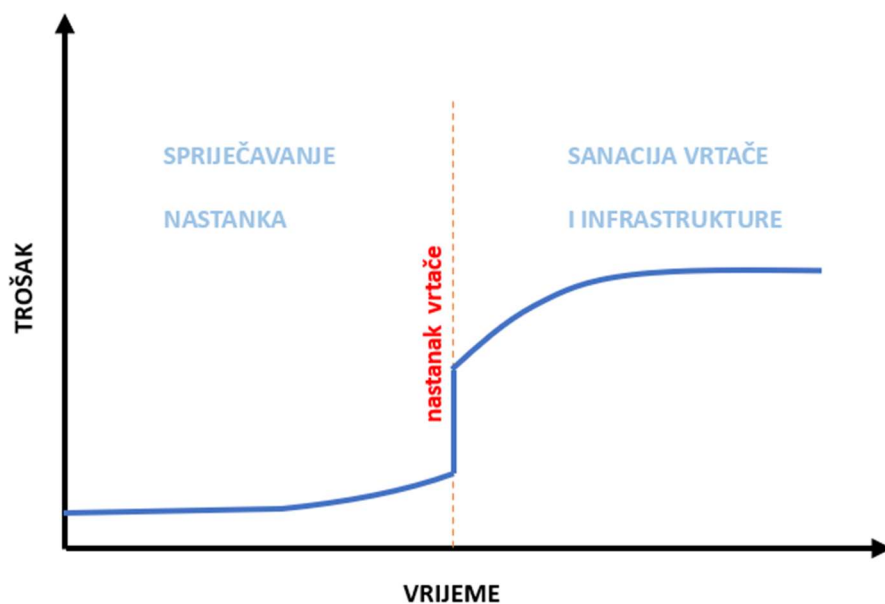
Usporedimo li rezultate Modela 2 s rezultatima Modela 1 može se zaključiti da su vertikalni pomaci puno veći za kavernu nepravilnog oblika u odnosu na one za cirkularnu kavernu zbog različite preraspodjele naprezanja. Stabilne i nestabilne zone Modela 2 šire se prema van što bi odgovaralo nagnutim stijenkama vrtače, što ne odgovara obliku stvarnih vrtača nastalih u Mečenčanima.

5.2.3. Ovisnost faktora sigurnosti o dimenzijama kaverne i parametrima tla

Rano otkrivanje potencijalnih vrtača bitno je kako bi se spriječilo formiranje vrtača prije nego što dođe do oštećenja infrastrukture, što umanjuje dodatne troškove za sanaciju i popravak. Slika 5-16 prikazuje odnos vremena i troškova za sprječavanje nastanka vrtača i sanaciju te moguće popravke na objektima i infrastrukturi nakon što dođe do nastanka vrtača.

Tijekom vremena trošak sprječavanja nastanka vrtače je približno jednak i odnosi se na geotehničke i druge istražne radove i metode kojima bi se nastanak vrtače spriječio. Nakon što dođe do urušavanja i nastanka vrtače vidi se veliki skok u troškovima koji kroz vrijeme raste zbog povećanja štete na infrastrukturi. Nakon nastanka vrtače povećani trošak odnosi se na saniranje vrtače, ali i saniranje sve nastale štete uzrokovane urušavanjem. Uzevši sve to u obzir, dijagram ukazuje da je pravovremeno otkrivanje potencijalnih vrtača i

spriječavanje njihovog nastanka povoljnije od rješavanja svih problema nastalih urušavanjem.



Slika 5-16. Odnos troška i vremena za sprječavanje vrtače i sanaciju vrtače (Hyum Nam i dr., 2018)

Iako potpuno urušavanje vrtača traje jako kratko, formiranje podzemnih prostora (kaverni) može trajati od nekoliko stotina do čak nekoliko milijuna godina, pa se na urušavanje, otkrije li se kaverna na vrijeme, može utjecati.

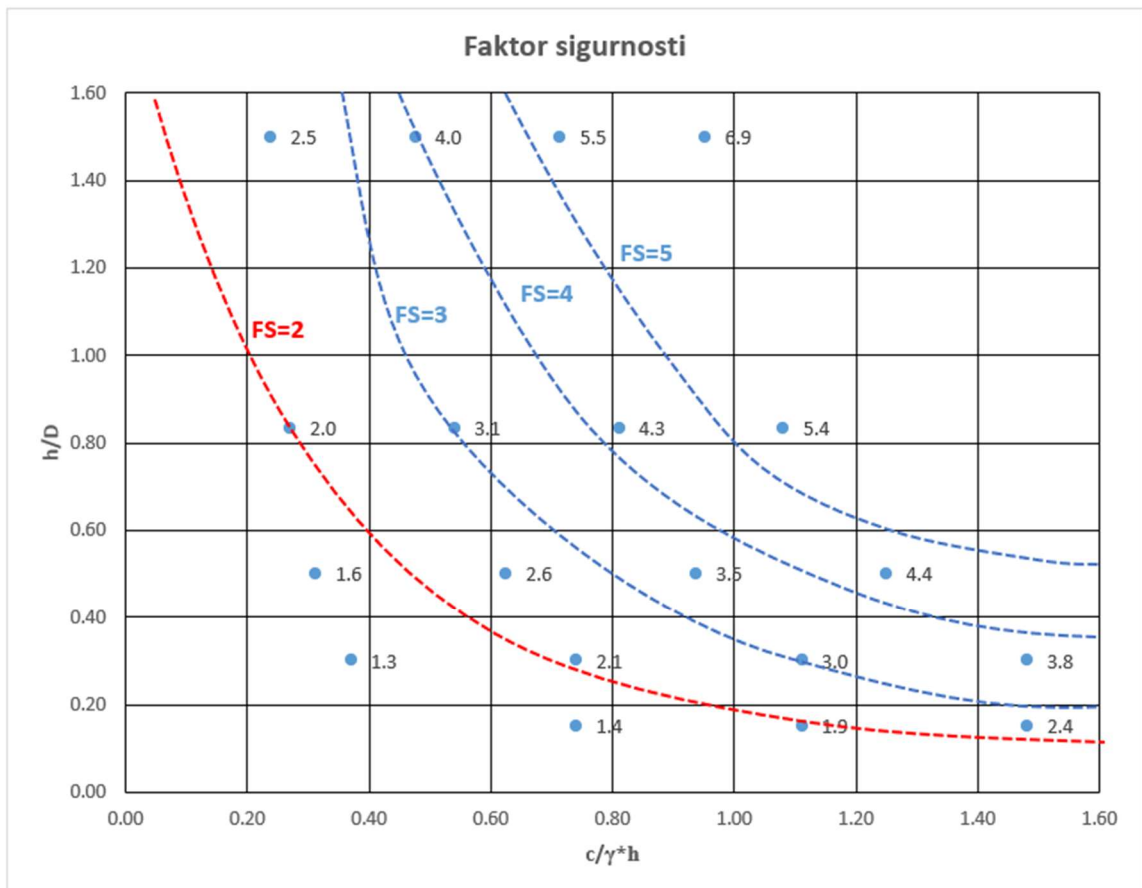
Kako je zabilježeno da je kohezijska komponenta čvrstoće prevladavajući čimbenik za deformacije i preraspodjelu naprezanja oko podzemnih šupljina (Soliman i dr., 2018) može se reći da smanjenje kohezije uzrokuje nastanak vrtača, a upravo do smanjenja kohezije u tlu može doći prilikom potresa.

Analiza mogućnosti nastanka vrtača provedena je za Model 2. Promjeri kaverni kretali su se od 2 m do 10 m, dok su vrijednosti kohezije u intervalima od 20 kPa varirale od 20 do 80 kPa, kako je prikazano i u tablici 5-2. Osim dimenzija kaverne i vrijednosti kohezije, u tablici su navedeni i dobiveni faktori sigurnosti.

Tablica 5-2. Dimenzije kaverni i vrijednosti kohezije korištene u proračunu

debljina krovine [m]	promjer vrtače [m]	kohezija [kPa]	M_{sf} faktor sigurnosti
6	4	80	6,919
6	4	60	5,484
6	4	40	4,029
6	4	20	2,531
5	6	80	5,363
5	6	60	4,250
5	6	40	3,073
5	6	20	1,952
4	8	80	4,423
4	8	60	3,490
4	8	40	2,565
4	8	20	1,575
3	10	80	3,780
3	10	60	2,990
3	10	40	2,095
3	10	20	1,334
3	20	80	2,362
3	20	60	1,866
3	20	40	1,417

Faktori sigurnosti iz tablice 5-2 za sve navedene promjene zabilježeni su te su prikazani dijagramom ovisnosti geometrije i stanja naprezanja (slika 5-17). Geometrijski uvjeti definirani su omjerom debljine krovine iznad kaverne i promjera kaverne (h/d). Stanje naprezanja izraženo je omjerom kohezije tla iznad kaverne i naprezanja na vrhu kaverne ($c/\gamma \cdot h$).



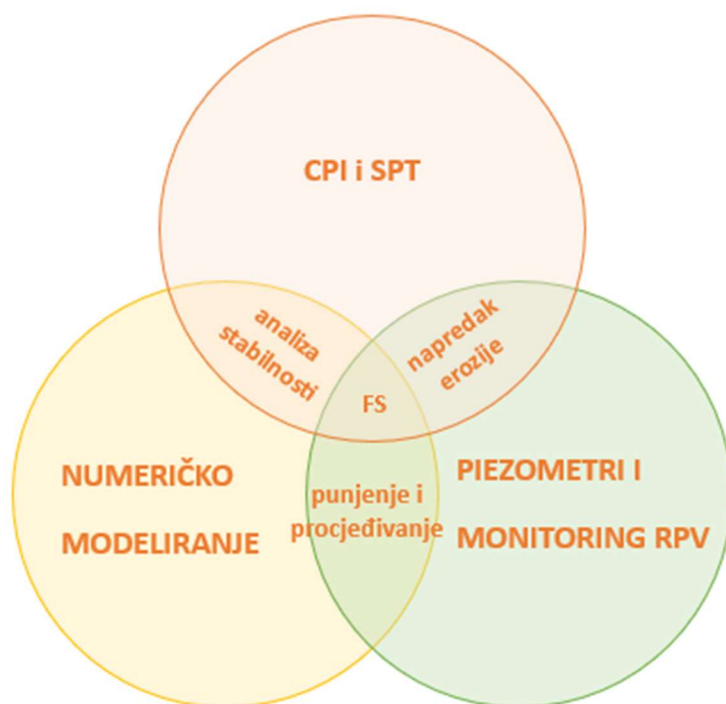
Slika 5-17. Ovisnost faktora sigurnosti o geometrijskim uvjetima i stanju napreznaja

Iz dijagrama je vidljivo da se mogućnost nastanka vrtače smanjuje s povećanjem kohezije i omjera debljine krovine i promjera kaverne. Kao granični faktor sigurnosti iz prethodnih iskustava uzet je $M_{sf}=2,0$ (Soliman i dr., 2018).

6. PREPORUKE ZA RANO OTKRIVANJE MOGUĆNOSTI NASTANKA VRTAČA

Dijagram iz prethodnog poglavlja (slika 5-18) kreiran je na temelju niza podataka koje je potrebno unaprijed imati kako bi se mogao koristiti u praktične svrhe. Dijagram prikazuje kako se geometrija kaverne i stanje naprezanja na vrhu kaverne mogu koristiti za procjenu rizika nastanka vrtače.

Kako bi se mogla procijeniti mogućnost nastanka vrtače potrebne su tri kategorije istraživanja. Prvo je detaljno istraživanje uvjeta na terenu koje se može izvesti SPT i CPT in-situ geotehničkim istraživanjima. Za utvrđivanje stanja podzemnih voda koriste se piezometri i hidrogeološka opažanja terena. Konačno, za procjenu mogućnosti nastanka vrtača navedeni parametri se implementiraju u numeričke modele. Kategorije istraživanja i njihov međusobni odnos prikazani su shematski na slici 6-1.



Slika 6-1. Kategorije istraživanja i njihov odnos (Hyum Nam i dr., 2018)

Prije in-situ istraživanja pretražuju se postojeće studije i geološke karte pomoću kojih se može procijeniti frekvencija pojavljivanja vrtača na području od interesa. Najčešće se gleda šire područje, a ne samo usko predmetno područje.

Također se preporuča prije in-situ istražnih radova pregledati prijašnje istražne radove i potražiti rezultate standardnog penetracijskog pokusa gdje su vrijednosti broja udaraca jako

niske, te sondažna bušenja gdje bušača šipka propada samo uslijed težine šipke, tj. čekića. Ukoliko su izvedena bušenja gdje se za pomoć bušenja koristio neki fluid, treba obratiti pažnju na profile bušotina gdje je naznačen veći gubitak fluida, koji može ukazivati na veće podzemne otvore.

Na područjima na kojima su izvedeni istražni radovi za koje se može reći da su problematični, potrebno je izvesti nova istraživanja. In-situ istraživanja treba započeti sondažnim bušenjima i izvedbom standardnih penetracijskih pokusa u istim bušotinama.

Ukoliko se pri standardnim penetracijskim pokusima primijeti sloj materijala iznimno niske otpornosti, potrebno je oko izvedenog SPT-a izvesti nekoliko CPT ispitivanja. CPT ispitivanjima dobivaju se vrijednosti otpora šiljka, otpora plašta te prekomjerni pritisci vode u porama. Dubina izvođenja CPT-a bit će inženjerska prosudba, ali treba svakako u obzir uzeti dubinu do trošne stijene i debljinu trošnog sloja.

Usporedbom profila izvedenih CPT ispitivanja na manjim udaljenostima može se uočiti razlika u otporima. Ukoliko se na samo jednom CPT-u na nekoj dubini pokaže znatno smanjenje otpora u odnosu na ostale rezultate CPT-a može se pretpostaviti podzemni otvor.

Kako bi se dobili parametri tla mogu se koristiti literaturni podaci odnosno korelacije sa SPT i CPT ispitivanjima, ali se radi preciznijih rezultata preporuča izvesti niz laboratorijskih ispitivanja na uzorcima tla uzetih sondažnim bušenjem. Neizostavno je određivanje granica plastičnosti, jedinične težine i prirodne vlažnosti iz poremećenih uzoraka, te određivanje parametara čvrstoće i krutosti edometarskim i troosnim pokusima na neporemećenim uzorcima. Više pokusa znači precizniji rezultati, ali u obzir treba uzeti i ekonomski faktor.

Nakon što se odrede slojevi tla i njihovi parametri, te dubina kaverne, moguće je iste podatke koristiti u numeričkom modelu čiji će rezultati dati faktor sigurnosti, tj. moći će se procijeniti mogućnost nastanka vrtače na tom području (Hyum Nam i dr., 2018).

7. ZAKLJUČAK

U krškim terenima, gdje vrlo okršene vapnence prekrivaju debeli slojevi kohezivnih tala, u određenim okolnostima može doći do urušavanja pokrova kaverne nastale otapanjem vapnenca i nastanka pokrovno-urušne vrtače. Razlog urušavanja pokrova i nastanka vrtače je gubitak, tj. smanjenje kohezivnosti tla, bilo zbog prirodnih utjecaja kao što su prekomjerne kiše ili jaki potresi, ili antropogenih uzroka kao što su crpljenje vode, poljoprivredne aktivnosti i povećanje opterećenja zbog građevinskih radova.

Pokrovno-urušne vrtače nastaju iznenada, bez vidljivih slijeganja na površini tla. Iz tog razloga materijalne štete uzrokovane urušavanjem mogu biti znatne. Urušavanje pokrova povezano je s lučnom (ne)stabilnošću pokrovnog tla, pa je za procjenu rizika od urušavanja potrebno dobro procijeniti debljinu i svojstva pokrovnog tla, kao i dubinu i geometriju kaverne u vapnenačkoj podlozi.

Dana 29. prosinca 2020. Petrinju je zadesio potres magnitude 6,4. Osim brojnih tipičnih postseizmičkih pojava kao što su klizanje tla, pukotine u tlu, likvefakcija, oštećenja na zgradama, cestama i nasipima, pojavio se niz pokrovno-urušnih vrtača na malom području (preko 100 vrtača). Kako je bilo teško izvesti geotehničke istražne radove odmah nakon potresa, isti su izvedeni u ožujku 2021. godine. Izveden je niz geoloških, hidrogeoloških i geotehničkih istraživanja koja su pokazala da je istraživano područje vrlo osjetljivo na nastanak pokrovno-urušnih vrtača.

Dobiveni rezultati istraživanja korišteni su za izradu karakterističnog profila tla na lokaciji najveće pokrovno-urušne vrtače te za procjenu ulaznih parametara za numeričko modeliranje. Numerički proračuni izvedeni su u programu PLAXIS 2D. Korištene su plastične i sigurnosne analize, te model ojačanog tla i Mohr-Coulombov model tla.

Razvijena su dva modela: Model 1 koji je predstavljao stvarnu kavernu i Model 2 koji predstavlja idealiziranu kružnu kavernu. Povratnom analizom u Modelu 1 procijenjeni su parametri čvrstoće i krutosti pokrovnog sloja, na način da je mijenjana vrijednost kohezija i modula krutosti dok nije dobiveno minimalno slijeganje pri kojem ne dolazi do sloma tla. Uočeno je da su u Modelu 1 stabilne i nestabilne zone podijeljene gotovo okomitom linijom koja bi odgovarala vertikalnim stijenkama stvarne vrtače na terenu. Navedeno se razlikuje od Modela 2 gdje je linija nestabilne/stabilne zone nagnuta i širi se prema van. Ovaj podatak nam ukazuje na važnost dobrog modeliranja oblika kaverne.

Na Modelu 2 izvedene su sigurnosne analize za različite geometrije (promjer kaverne i dubina na kojoj se nalazi) i kohezije pokrovnog tla u odnosu na vertikalna naprezanja, što je rezultiralo dijagramom sigurnosti.

Izvedeni dijagram predstavlja vrlo koristan alat za procjenu rizika nastanka pokrovno-urušnih vrtača na određenoj lokaciji.

Obzirom na ograničeno vrijeme i resurse za terenski rad, te slabe dostupne povijesne podatke, rezultati numeričkih proračuna prikazani u ovom radu mogu se smatrati preliminarnim. Oni se mogu promatrati kao preporuka za daljnja istraživanja i modeliranja čiji bi rezultati bili od velike koristi ne samo u slučaju budućih seizmička događanja, već i u slučajevima izgradnje zgrada, cesta i drugih objekata ili izvođenja poljoprivrednih radova na područjima podložnim kreiranju pokrovno-urušnih vrtača.

8. LITERATURA

BARIĆ, A., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B., *Numerical modelling of cover-collapse sinkholes caused by the earthquake – a case study*. 9th International Congress on Environmental Geotechnics. Athens, 2023. str. 378-385.

BONACCI, O., ROJE-BONACCI, T., 2006. *Zatvorene udubine u kršu i njihova uloga u kretanju vode (II)*. *Hrvatska vodoprivreda*, 15 (168), str. 38-45.

DRUMM, E.C., YANF, M.Z. 2005. *Preliminary Screening of Residual Soil Stability in Karst Terrain*. *Environmental / Engineering Geoscience*, XI(1), str. 29-42.

EEARTHQUAKE USGS. 2022. URL: <https://earthquake.usgs.gov/> (14.3.2023.)

ENVIRONMENTAL SCIENCE INSTITUTE (ESI). 2020. *Caves: A Window into the Edwards Aquifer*. URL: <https://www.esi.utexas.edu/> (28.1.2023.)

GOSPIĆ, A. 2023. *Karst terrain at its best*. URL: <https://www.summitpost.org/karst-terrain-at-its-best-on/61848> (18.10.2023.)

Jinesh IAS Academy. 2015. *William Morris Davis Model*. URL: <https://jineshiasacademy.com> (28.1.2023.)

KUHTA, M., 2000. *Geološke osnove speleologije*. U: Bakšić, D., Lacković, D., Bakšić, A., ur., *Speleologija*. Zagreb: Planinarsko društvo Sveučilišta, str. 263-279.

MARTINEC, M. 2014. *Metode prevencije likvefakcije*. *Technical journal* 8, 2(2014), str. 157-160.

MATAS, M., 2009. *Krš Hrvatske - geografski pregled i značenje*. Split: Geografsko društvo - Split.

NAM, B.H., SHAMET, R., SOLIMAN, M., WANG, D. YUN, H-B. 2018. *Development of a sinkhole risk evaluation program*. Final Report, FDOT, 147 str.

PALMER, Arthur N. 2007. *Cave Geology*. Dayton, OH: Cave Books.

PETROVIĆ, D., 2003. *Geomorfologija*. Beograd: Geografski fakultet.

PIKIJA, M. 1987 *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000, List Sisak L33–93*. – Geološki zavod, Zagreb (1975–1986); Savezni geološki institut, Beograd.

PLAXIS, 2016. *Material Models*. s.l.:Bentley Systems, Incorporated.

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET. 2021. *Preliminarni rezultati serije potresa kod Petrinje od 28. prosinca 2020. do 28. siječnja 2021.* URL: https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/mjesec_dana_od_glavnog_petrinjskog_potresa (14.3.2023.)

RUDEC, E. 2021. *Karakterizacija tla za modeliranje kolapsa pokrovnih naslaga na okršenoj vapnenačkoj podlozi*. Diplomski rad. Zagreb: Rudarsko geološko naftni fakultet.

SOLIMAN, M. H., NAM, B. H., YOUN, H., CHO, S. 2018. *Numerical Analysis on the Mechanical Behavior of Sinkholes*. Transportation Research Board. Washington D.C., USA: Poster.

SZAVITS-NOSSAN, V. 2014. *Mehanika tla i stijena – 7. predavanje*. Građevinski fakultet u Zagrebu.

ŠUMANOVAC, F., PEKAŠ, Ž. 2023. *Modelling Cover-Collapse Sinkholes That Appeared after the M6.2 Petrinja Earthquake in Croatia Using Electrical Resistivity Tomography Dana*. Sustainability 2023, 15, 1124, str. 1-23.

TOMAC, I., ATHANASOPOULOS-ZEKOS, A., BLEIZIFFER, J., DOMITROVIĆ, D., FRANGEN, T., GJETVAJ, V., GOVORČIN, M., GUKOV, I., HERAK, M., HRŽENJAK, P., KINIKLES, D., KOSVIĆ, I., KOVAČEVIĆ ZELIĆ, B., MATOŠ, B., MATEŠIĆ, D., MIHALJEVIĆ, I., MIJIC, Z., MILETIĆ, M., MONTGOMERY, J., PARLOV, J., PAVELIĆ, D., PAVIČIĆ, I., PERIĆ, D., PHAM, N., SALKOVIĆ, I., TERZIĆ, J., VLAHOVIĆ, I., VLAHOVIĆ, Z., VUČENOVIĆ, H., ZIOTOPOULOU, K., ZLATOVIĆ, S., ŽDERIĆ, P.K. (2021). *Geotechnical Reconnaissance and Engineering Effects of the December 29, 2020, M6.4 Petrinja, Croatia Earthquake, and Associated Seismic Sequence*. URL: [Geotechnical Extreme Events Reconnaissance \(GEER\) Association \(geerassociation.org\)](https://www.geerassociation.org/) (17.5.2023)

WALTHAM, A.C., FOOKES, P.G., 2003. Engineering classification of karst ground conditions. *Quarterly Journal of Engineering Geology and Hydrogeology*, 36 (2), str. 101-118.