

# Analize utjecaja oborina na stabilnost pokusa urušnih vrtača

---

**Milošević, Bernard**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2024**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:107774>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-03**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,  
University of Zagreb](#)





Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Bernard Milošević

ANALIZE UTJECAJA OBORINA NA  
STABILNOST POKOSA URUŠNIH VRTAČA

DIPLOMSKI RAD

Zagreb, 2024.



Sveučilište u Zagrebu

GRAĐEVINSKI FAKULTET

Bernard Milošević

ANALIZE UTJECAJA OBORINA NA  
STABILNOST POKOSA URUŠNIH VRTAČA

DIPLOMSKI RAD

izv. prof. dr. sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif

Zagreb, 2024.



University of Zagreb

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

Bernard Milošević

ANALYZES OF THE INFLUENCE OF  
PRECIPITATION ON THE SLOPE STABILITY OF  
COLLAPSE SINKHOLES

MASTER THESIS

assoc. prof. dr. sc. Mario Bačić, mag.ing.aedif

Zagreb, 2024.



OBRAZAC 3

POTVRDA O POZITIVNOJ OCJENI PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Student/ica :

Bernard Milošević

(Ime i prezime)

0082057735

(JMBAG)

zadovoljio/la je na pisanom dijelu diplomskog rada pod naslovom:

**Analize utjecaja oborina na stabilnost pokosa urušnih vrtača**

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

**Analyzes of the influence of precipitation on the slope stability of collapse sinkholes**

(Naslov teme diplomskog rada na engleskom jeziku)

i predlaže se provođenje daljnjeg postupka u skladu s Pravilnikom o završnom ispitu i diplomskom radu Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta.

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu znanstvenog projekta: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Naziv projekta, šifra projekta, voditelj projekta)

Pisani dio diplomskog rada izrađen je u sklopu stručne prakse na Fakultetu: (upisati ako je primjenjivo)

-

(Ime poslodavca, datum početka i kraja stručne prakse)

Datum:

17.09.2024

Mentor:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

Potpis mentora:

Komentor:



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet



OBRAZAC 5

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Ja :

Bernard Milošević, 0082057735

(Ime i prezime, JMBAG)

student/ica Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta ovim putem izjavljujem da je moj pisani dio diplomskog rada pod naslovom:

**Analize utjecaja oborina na stabilnost pokosa urušnih vrtača**

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

izvorni rezultat mogega rada te da se u izradi istoga nisam koristio/la drugim izvorima osim onih koji su u njemu navedeni.

Datum:

18.09.2024

Potpis:

*BT*

Gradjevinski fakultet  
Fra Andrije Kačića-Miošića 26, HR – 10000 Zagreb, OIB: 62924153420  
TEL.: +385 (0)1 4639 115, FAKS: +385 (0)1 4828 051  
www.grad.unizg.hr



Sveučilište u Zagrebu  
Građevinski fakultet



OBRAZAC 6

IZJAVA O ODOBRENJU ZA POHRANU I OBJAVU PISANOG DIJELA DIPLOMSKOG RADA

Ja :

Bernard Milošević, 72376591854

(Ime i prezime, OIB)

ovom izjavom potvrđujem da sam autor/ica predanog pisanog dijela diplomskog rada i da sadržaj predane elektroničke datoteke u potpunosti odgovara sadržaju dovršenog i obranjenog pisanog dijela diplomskog rada pod naslovom:

**Analize utjecaja oborina na stabilnost pokosa urušnih vrtača**

(Naslov teme diplomskog rada na hrvatskom jeziku)

koji je izrađen na sveučilišnom diplomskom studiju Građevinarstvo Sveučilišta u Zagrebu Građevinskog fakulteta pod mentorstvom:

izv.prof.dr.sc. Mario Bačić

(Ime i prezime mentora)

i obranjen dana:

26.09.2024

(Datum obrane)

Suglasan/suglasna sam da pisani dio diplomskog rada u cijelosti bude javno dostupan, te da se trajno pohrani u digitalnom repozitoriju Građevinskog fakulteta, repozitoriju Sveučilišta u Zagrebu te nacionalnom repozitoriju.

Datum:

18.9.2024

Potpis:

Građevinski fakultet  
Fra Andrije Kačića-Miošića 26, HR-10000 Zagreb, OIB: 62924153420  
TEL.: +385 (0) 1 4639 115, FAKS: +385 (0) 1 4828 051  
www.grad.unizg.hr

## SAŽETAK

Krš, kao reljefni oblik, se rasprostire na oko 20 % kontinentalne površine na Zemlji. Jedan od najrasprostranjenijih geoloških prirodnih procesa u kršu koji, između ostalog, mogu predstavljati i iznenadnu opasnost i rizik za ljude, okoliš i infrastrukturu, je pojava urušnih vrtača. Kao globalna pojava uzrokuju velike financijske štete u različitim zemljama svijeta, te je kao takva postala zanimljiva svjetskoj znanosti. Posljednjih desetljeća se zna jako puno o načinu nastanka, o uzrocima pojavnosti, kao i njihovom mogućem širenju kroz modeliranje raznim numeričkim i analitičkim modelima, te posljedično smanjenje rizika. Ovim diplomskim radom dan je pregled mehanizama nastanka urušnih vrtača globalno, kao i pregled geologije i hidrogeologije područja Mečenčani-Borojevići u Sisačko-moslavačkoj županiji u kojoj se otvorilo preko 100 urušnih vrtača kao posljedica potresa koji je u prosincu, 2020. godine zadesio područje Sisačko-moslavačke županije. Pri tome se rad fokusira na analizu stabilnosti pokosa najveće urušne vrtače te utjecaj oborina na stabilnost istih. Razlog za navedeno je u činjenici da je u vremenu od otvaranja urušne vrtače do njezine sanacije bilo više oborinskih događaja koji su uzrokovali dodatna klizanja pokosa i povećanje dimenzija urušne vrtače.

**Ključne riječi:** krš, urušne vrtače, geohazard, analize stabilnosti pokosa, utjecaj oborina



## SUMMARY

Karst, as a landform, covers approximately 20 % of the Earth's continental surface. One of the most widespread geological processes in karst regions, which can pose sudden hazards and risks to people, the environment, and infrastructure, is the occurrence of sinkholes. As a global phenomenon, sinkholes cause significant financial damage in various countries around the world, making them a subject of interest in the global scientific community. In recent decades, much has been learned about their formation, the causes of their occurrence, as well as their potential expansion through modeling with various numerical and analytical models, ultimately contributing to risk reduction. This thesis provides an overview of the mechanisms behind sinkhole formation on a global scale, as well as a review of the geology and hydrogeology of the Mečenčani-Borojevići area in the Sisak-Moslavina County, where over 100 sinkholes appeared as a consequence of the earthquake that struck the region in December 2020. The focus of the study is on the stability analysis of the largest sinkhole's slope and the impact of precipitation on its stability. This focus is driven by the fact that, during the period between the sinkhole's formation and its remediation, multiple rainfall events occurred, causing further slope sliding and an increase in the sinkhole's dimensions.

Keywords: karst, collapse sinkholes, geohazard, analyze of slope stability, influence of precipitation

## SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD .....  | 1  |
| 2. METODE I TEHNIKE RADA .....   | 4  |
| 3. GENEZA URUŠNIH VRTAČA.....  | 5  |
| 3.1 Vrtače (ponikve) – oblik krša.....   | 5  |
| 3.1.1 Vrtače nastale kemijskim otapanjem ( <i>dissolution sinkhole</i> ) .....   | 6  |
| 3.1.2 Urušne vrtače nastale urušavanjem krovne stijene .....   | 7  |
| 3.1.3 Urušne vrtače – urušavanje koherentnog tla .....   | 9  |
| 3.1.4 Vrtače nastale ispiranjem nekoherentnog tla – sufozijske vrtače .....  | 10 |
| 3.2 Urušne vrtače – globalni „geohazard“ .....   | 12 |
| 3.3 Uzroci pojavnosti i akceleratori otvaranja urušnih vrtača.....   | 17 |
| 4. GEOLOGIJA I HIDROGEOLOGIJA PODRUČJA MEČENČANI - BOROJEVIĆI.....   | 18 |
| 4.1 Urušne vrtače na području Mečenčani – Borojevići .....   | 19 |
| 4.1.1 Urušna vrtača S001 .....   | 22 |
| 4.1.2 Primjeri urušnih vrtača u blizini stambenih objekata – S014, S015.....   | 24 |
| 4.2 Uzroci pojavnosti urušnih vrtača na području Mečenčani-Borojevići.....   | 26 |
| 5. ANALIZA UTJECAJA OBORINA NA STABILNOST POKOSA URUŠNIH VRTAČA.....   | 28 |
| 5.1 Odabir i geometrija urušne vrtače.....   | 29 |
| 5.2 Parametri materijala i geotehnički profil tla .....  | 31 |
| 5.3 Analize stabilnosti i procjeđivanja .....  | 37 |
| 5.3.1 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa prilikom crpljenja vode do dna vrtače – proračunska situacija 1 .....               | 37 |
| 5.3.2 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je razina vode na dnu vrtače – proračunska situacija 2 .....                   | 42 |
| 5.3.3 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je razina vode na dnu vrtače uz utjecaj oborina – proračunska situacija 3..... | 44 |
| 5.3.4 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je razina vode 3.6 m od vrha vrtače – proračunska situacija 4.....             | 54 |

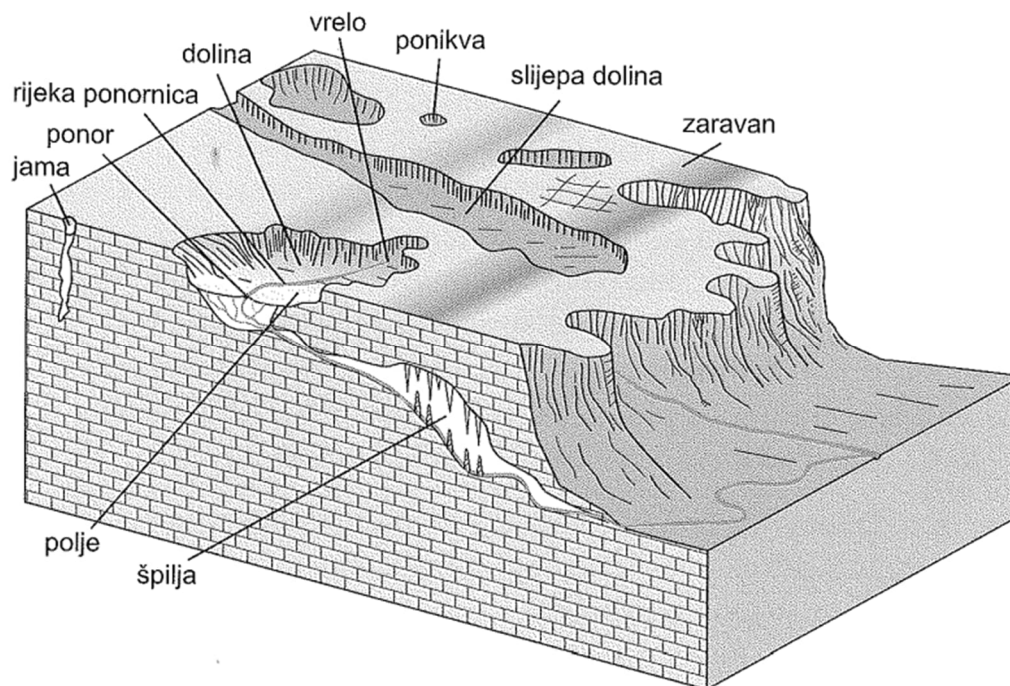
|  |    |
|--|----|
| 5.3.5 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je vrtača ispunjena vodom (razina vode 3.6 m od vrha vrtače) uz utjecaj petodnevne oborine od 80 mm/h – proračunska situacija 5..... | 56 |
| 5.4 Rekapitulacija faktora sigurnosti po svim proračunskim situacijama .....   | 58 |
| 6. ZAKLJUČAK.....  | 60 |
| POPIS LITERATURE.....  | 61 |
| POPIS SLIKA.....   | 63 |
| POPIS TABLICA.....   | 66 |

## 1. UVOD

Krš je izraz koji se koristi za opisivanje jedinstvenog tipa krajolika koji se razvija na stijenama koje su posebno osjetljive na kemijsko otapanje (najčešće kalcijevog karbonata  $\text{CaCO}_3$  ili magnezijevog karbonata  $\text{MgCO}_3$ ). Krš se obično povezuje s procesom korozije ili otapanja stijena, što rezultira specifičnim reljefnim oblicima.

Okršavanje je kemijski proces otapanja vapnenačkih stijena koji oblikuje specifični reljef krša. Topljivost vapnenca u čistoj vodi iznimno je niska, te je ključni faktor ugljikov dioksid, budući da vodene otopine ovog plina s vapnencem stvaraju bikarbonatne ione, koji su izrazito topljivi. Pojednostavljena jednažba otapanja je  $\text{CaCO}_3 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2\text{HCO}_3^-$ . Proces utječe i na dublje dijelove stijenske mase, povezane s površinskim i podzemnim tokovima vode unutar hidrološkog ciklusa.

Krški reljef se sastoji od različitih reljefnih oblika (slika 1), uključujući škrape (grizine), vrtače (ponikve), špilje i jame, uvale, zaravni i suhe doline. Škrape su manja udubljenja oblikovana otjecanjem vode i korozijom. Ponikve su ovalna i ljevkasta udubljenja koja mogu biti posljedica površinske korozije ili urušavanja većih šupljina u podzemlju. Špilje su podzemni prostori koje je moguće pristupiti kroz otvore na površini, horizontalnog usmjerenja, dok su jame usmjerene prema dolje. Uvale su duguljasta udubljenja u krškom reljefu koja su oblikovana kombinacijom tektonskih procesa i korozije, slično većim reljefnim oblicima kao što su polja, velike udoline, kanjoni i doline krških rijeka. Suhe doline su krške depresije oblikovane površinskim tokovima koji su prestali teći. Nerijetko na jednom kraju krškog polja može izvirati rijeka koja na drugom kraju ponire u podzemlje. Takav tip površinskog toka poznat je kao rijeka ponornica, a mjesto gdje nestaje u ponoru. U nekim situacijama, tijekom velikih padalina, razina podzemnih voda može narasti toliko da ponor djeluje kao izvor, što se naziva estavela. Važno je napomenuti da su zbog iznimne razvijenosti krškog reljefa u Hrvatskoj mnogi od ovih pojmove postali dio svjetske terminologije [1].



Slika 1 Oblici reljefa u kršu (Izvor: [2])

Urušne vrtače, kao podvrsta vrtača, su najčešći geohazard u kršu. Kao odgovor na opasnosti koju nose urušne vrtače, geološka i geotehnička zajednica kontinuirano organizira, počevši od 1984. godine, međunarodnu konferenciju o "urušnim vrtačama i inženjerskim i ekološkim utjecajima krša" [3]. U nekim regijama Sjedinjenih Američkih Država, urušne vrtače označene su kao opasnost visokog rizika. Primjerice, u Sjedinjenim Američkim Državama procijenjena vrijednost štete nastale otvaranjem urušnih vrtača se procjenjuje na minimalno 300 mil. dolara godišnje, a stvarnu vrijednost štete je teško utvrditi s obzirom na ograničen broj dokumentiranih incidenata [4]. U Republici Hrvatskoj se otvorilo preko 100 urušnih vrtača nakon razornog potresa u Petrinji, u prosincu 2020. godine [3]. Neke od njih su se otvorile uz obiteljske kuće, kao i na poljoprivrednim površinama i nanijele značajna oštećenja budući da je poljoprivreda osnovna djelatnost na predmetnom području.

U literaturi se navodi da se urušne vrtače, iz godine u godinu, pojavljuju sve češće, a da uzrok tome može biti urbanizacija, sve veća naseljenosti zemljine površine, veći broj infrastrukturnih kao i stambenih objekata. Neki znanstvenici, povećanu pojavnost urušnih vrtača vežu i uz klimatske promjene koje mogu utjecati na vodne režime koji posljedično imaju direktan utjecaj na ubrzanje formiranja urušnih vrtača. Proces pojavnosti urušnih vrtača nije nužno prirodan proces, čovjek također može imati svoju ulogu pri formiranju istih. Znanstvena zajednica posljednjih desetljeća ima sve više saznanja o ovim pojavama, istražen je velik broj uzroka pojavnosti, kao i razne metode procjene rizika od pojavnosti

ovog geohazarda [5]. Nadalje, problem urušnih vrtača nije samo njihovo otvaranje, nego zbog često jako strmih pokosa problem postaje i njihovo širenje odronjavanjem uslijed nestabilnog pokosa, čemu mogu doprinijeti oborine, sezonske promjene razine podzemne vode i slično.

## 2. METODE I TEHNIKE RADA

U ovom diplomskom radu napravljen je sveobuhvatni pregled domaće i svjetske literature vezane za fenomen krša i urušnih vrtača. Detaljnim proučavanjem znanstvenih članaka i publikacija, omogućeno je stjecanje dubljeg razumijevanja mehanizama formiranja urušnih vrtača te faktora koji utječu na njihovu pojavu i razvoj. Tijekom istraživanja korišteni su slikovni materijali preuzeti iz dostupnih stručnih izvora. Ovi materijali omogućili su vizualizaciju geoloških struktura i procesa povezanih s urušnim vrtačama, što je bilo od velike važnosti za dublje razumijevanje ovog geološkog fenomena. Slikovni prikazi poslužili su kao podrška za interpretaciju rezultata i dodatno objašnjenje specifičnih procesa unutar krških formacija.

Za potrebe proračuna stabilnosti pokosa vrtače korišten je program GeoStudio 2024, koji omogućuje numeričko modeliranje u geotehnici. Ulazni parametri korišteni u proračunu, kao što su geometrija vrtače, parametri tla te geodetska mjerenja, preuzeti su iz relevantnih znanstvenih članaka i podataka Zavoda za Geotehniku, Građevinskog fakulteta u Zagrebu. Proračuni su obuhvatili analizu stabilnosti pokosa, kao i analizu procjeđivanja vode. U modulu korištenom za analizu procjeđivanja vode (*SEEP/W*), simulacija utjecaja kišnih oborina, za različite slučajeve, izvedena je korištenjem adekvatnog rubnog uvjeta (eng. *Water flux*), dok je za simulaciju razina podzemne vode korišten rubni uvjet ukupni hidraulički potencijal (eng. *Water total head*). Ovi rubni uvjeti omogućili su precizno modeliranje dinamike podzemnih voda i procjeđivanja, čime je obuhvaćen utjecaj hidroloških čimbenika na stabilnost pokosa vrtače. U modulu korištenom za analizu stabilnosti pokosa (*SLOPE/W*), proračuni stabilnosti su provedeni prema metodama Morgenstern-Price te *grid and radius* metodom. Ove metode omogućile su precizno izračunavanje stabilnosti pokosa vrtače te identifikaciju kliznih ploha s najmanjim faktorima sigurnosti. Dobiveni rezultati pružili su cjelovitu sliku o stabilnosti pokosa i mogućnosti nastanka klizišta ili urušavanja, što je omogućilo donošenje zaključaka rada.

### 3. GENEZA URUŠNIH VRTAČA

#### 3.1 Vrtače (ponikve) – oblik krša

Krški oblici nastaju kao odgovor na oborine i površinske vode koje se infiltriraju u tlo. U zreлом kršu, zbog same propusnosti, ne nastaju tipične riječne doline, te umjesto toga odvodnja i posljedična erozija su usmjereni prema točkama gdje voda ulazi u podzemlje. Vrtače, također poznate kao ponikve, su jedna od najprepoznatljivijih geomorfoloških struktura u kršu. Manifestiraju se kao topografske depresije ljevkastog i ovalnog oblika. Vrtače se razvijaju skupom međusobno povezanih procesa, uključujući otapanje temeljne stijene, urušavanje stijena, ispiranje tla i urušavanje tla. Bilo koji od ovih procesa ili više njih može formirati vrtaču. Zbog kompleksnih geoloških procesa i hidrogeoloških uvjeta, vrtače mogu biti raznih promjera, dubina, nagiba pokosa. Mogu konstantno ili periodično biti ispunjene vodom (slika 2). Postoje vrtače koje tvore složenije strukturne sklopove u kršu, te su povezane s drugim krškim reljefnim oblicima kao što su jame i spilje [6].



Slika 2 Vrtača Crveno jezero (Izvor: [5])

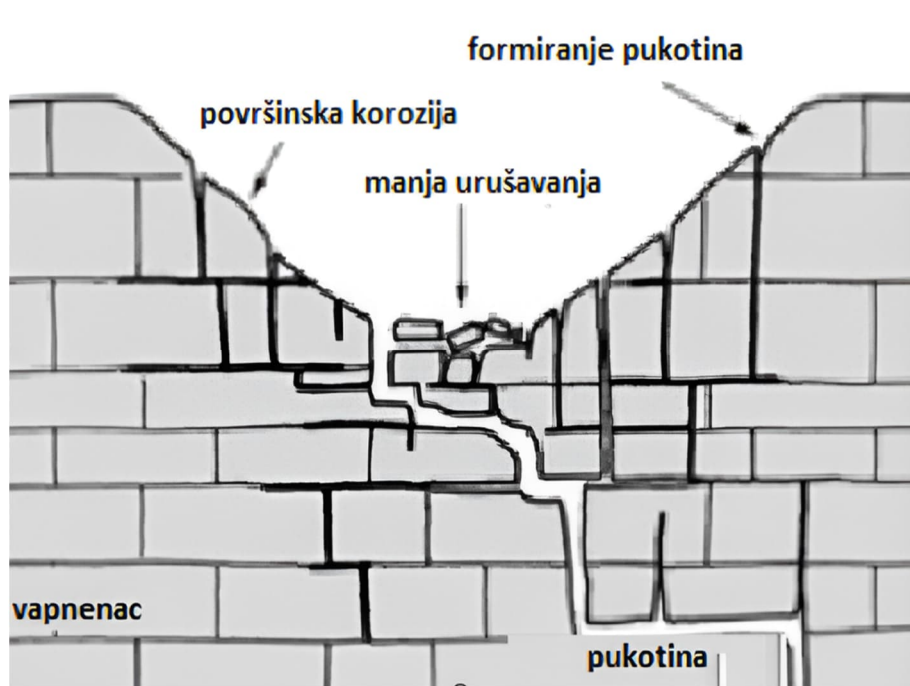


Vrtače se mogu klasificirati u 5 različitih grupa, prvenstveno prema uzrocima pojavnosti:

- nastale kemijskim otapanjem
- nastale urušavanjem krovne stijene u otvor koji se nalazi ispod
- nastale urušavanjem netopive stijene u otvor u topljivoj stijeni koja se nalazi ispod
- nastale propadanjem koherentnog tla u pukotinu u temeljnoj stijeni koja se nalazi ispod
- nastale ispiranjem nekoherentnog tla u pukotinu u temeljnoj stijeni koja se nalazi ispod [5]

### 3.1.1 Vrtače nastale kemijskim otapanjem

Ovakav tip vrtača najčešće nastaje na područjima gdje je stijena (najčešće vapnenac ili dolomit) direktno izložena padalinama. Dakle, nastaju tamo gdje površinska voda i/ili voda iz tla otapa temeljnu podlogu na površini stijene, te posljedično, kroz pukotine krša, voda odlazi u tlo (slika 3). U vrtačama koje pri formiranju imaju više pukotina za otjecanje vode nastaju širi oblici, odnosno oblici manjeg nagiba pokosa, a u vrtačama gdje voda „gravitira“ prema jednoj pukotini, nastaju vrtače konusnog oblika, odnosno većih nagiba pokosa. Ovakvo formirane vrtače su stabilni geomorfološki oblici, koji nastaju kroz duži period, najčešće preko 20.000 godina. Mogu biti promjera do 1000 metara i dubine do 100 metara. Vrtače, većih dimenzija, nastale kemijskim otapanjem u literaturi se često zovu i doline. U inženjerskom pogledu, ovakav tip vrtača nastaje sporo, te ne ostavljaju mogućnost pojave geohazarda za vrijeme projektiranog vijeka građevine. U pravilu, gradnju građevinskih objekata na dnu vrtače treba izbjegavati kad god je to moguće, jer je to mjesto gdje voda i dalje ponire te samim tim erodira temeljnu stijenu, što ostavlja mogućnost i za oštećenja samih temelja građevinskog objekta [1].



Slika 3 Shematski prikaz vrtače nastale kemijskim otapanjem (Izvor: [6])

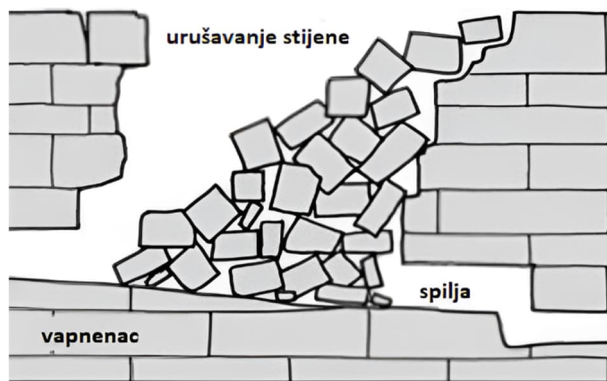
### 3.1.2 Urušne vrtače nastale urušavanjem krovne stijene

Prema navedenoj klasifikaciji postoje 2 tipa urušnih vrtača, pri kojima kod mehanizma sloma dominantno sudjeluje stijenski materijal (slika 4), nastale urušavanjem krovne stijene u otvor koji se nalazi ispod (eng. *collapse sinkhole*) (slika 5), te nastale urušavanjem netopive stijene u otvor u topljivoj sredini koja se nalazi ispod (eng. *caprock sinkhole*) (slika 6). Oba tipa vrtača definirana su propadanjem svoda formiranog od stijene u rastopljeni otvor ispod. Variraju po veličini, ali rijetko imaju promjer veći od 100 metara, i obično su strmog stjenovitog pokosa osim ako nisu degradirane naknadnom erozijom [6].

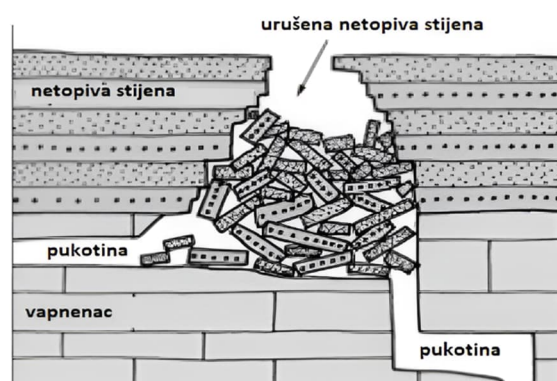


Slika 4 Urušne vrtače nastale urušavanjem krovne stijene, Sjeveroistočna Španjolska  
(Izvor: [5])

Nastanak ovakvih vrtača, uvjetovan je otapanjem stijenske podloge, te posljedično formiranje većih pukotina i šupljina u stijeni. Urušne vrtače ovog tipa nisu česta pojava u prirodi, ali mogu izazvati katastrofalne posljedice u inženjerskoj praksi jer se događaju gotovo trenutno, a sama izvedba građevinskih objekata na stijenskom svodu koji „premošćuje“ šupljinu može potaknuti formiranje urušne vrtače [1].



Slika 5 Shematski prikaz urušne vrtače s urušavanjem vapnenca (Izvor: [6])



Slika 6 Shematski prikaz urušne vrtače s urušavanjem netopive stijene (Izvor: [6])

### 3.1.3 Urušne vrtače – urušavanje koherentnog tla

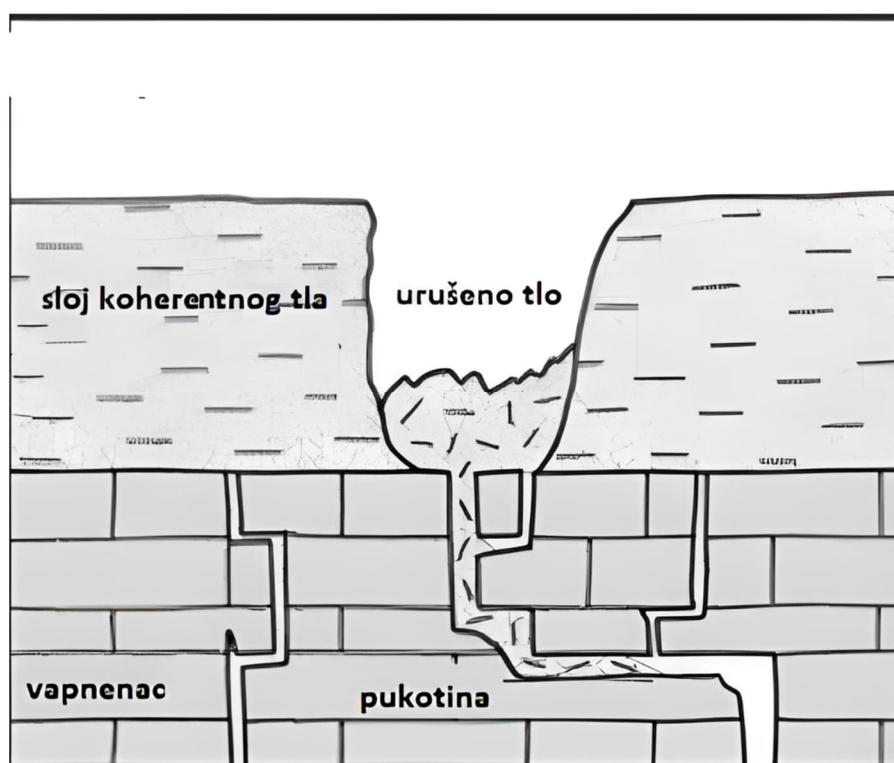
Formiranje urušnih vrtača može se dogoditi i ispiranjem koherentnog tla (eng. cover-collapse sinkhole) u šupljine ili pukotine u temeljnoj stijeni koje su se formirale tijekom određenog geološkog razdoblja, te tvorenjem kaverni i posljedičnim urušavanjem površine tla u te iste kaverne. Urušne vrtače ovog tipa (slika 7) češće se pojavljuju u prirodi od urušnih vrtača gdje je urušni materijal stijena.



Slika 7 Vrtača nastala urušavanjem koherentnog tla, zapadna Ukrajina (Izvor: [5])

Kada je urušni materijal kohezivno tlo, urušavanje se može dogoditi gotovo trenutno, a same dimenzije vrtače mogu biti promjera i do 50 metara te mogućih dubina i preko 15 metara [5]. Prije formiranja urušne vrtače ovog tipa, ovisno o litifikaciji tla, moguće je vidjeti udubljenja na površini tla. U slučaju kada su pokrovne naslage slabije litificirane, očekuje se da se prije pojave urušne vrtače na površini pojave manja ulegnuća. Ovisno o geologiji područja, debljina sloja koherentnog materijala može iznositi preko 10 metara [6].

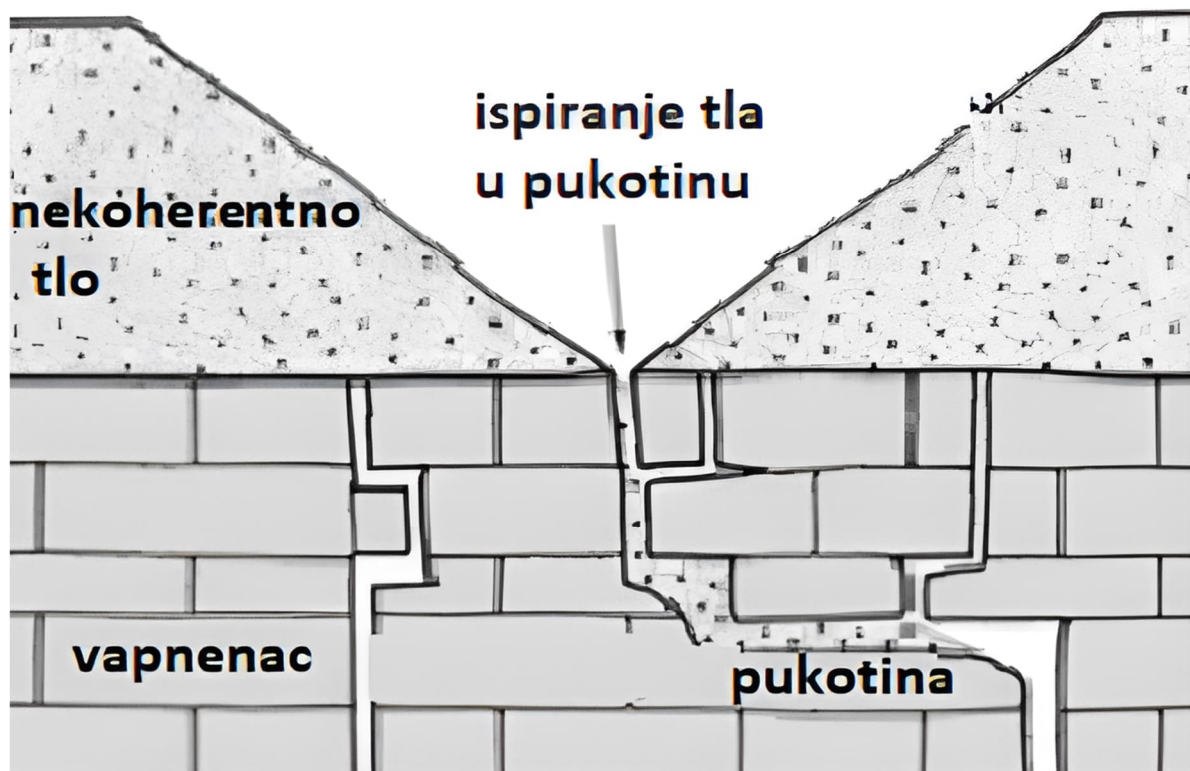
Upravo se ovakav tip vrtača pojavio na području Mečenčani-Borojevići (Republika Hrvatska) prilikom i nakon potresa 2020. godine. Kasnije u radu će biti prikazan proračun stabilnosti pokosa kao i utjecaj vodnog režima na stabilnost pokosa ovog tipa vrtača.



Slika 8 Shematski prikaz vrtače nastale urušavanjem koherentnog tla (Izvor: [6])

### 3.1.4 Vrtače nastale ispiranjem nekoherentnog tla – sufozijske vrtače

Ovakav tip vrtača nastaje ispiranjem nekoherentnog tla u šupljine temeljne stijene (eng. *suffosion sinkhole*) (slika 9) [1].



Slika 9 Shematski prikaz vrtače nastale sufozijom (Izvor: [6])

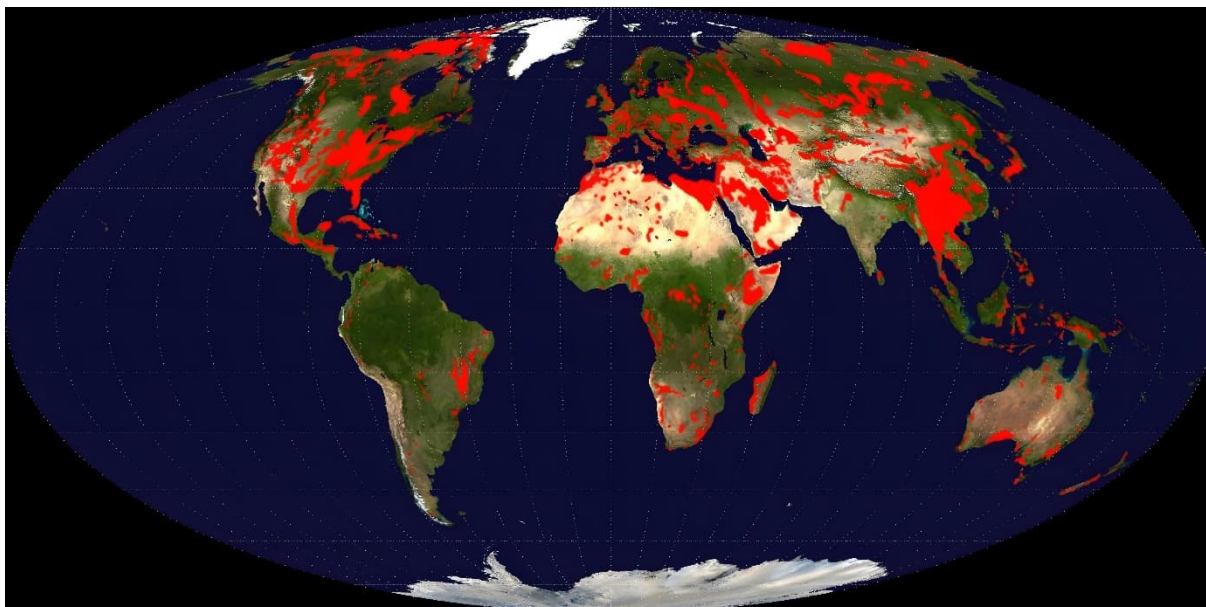
Za razliku od vrtača koje nastaju u na područjima s dominantno koherentnim tlima, formiranje ovih vrtača traje duže. Ovakve vrtače mogu biti promjera i do 50 metara te dubine do 10 metara, te su najčešće ljevkastog oblika (slika 10) [5].



Slika 10 Vrtača nastala sufozijom - Iberijski poluotok, Španjolska (Izvor: [5])

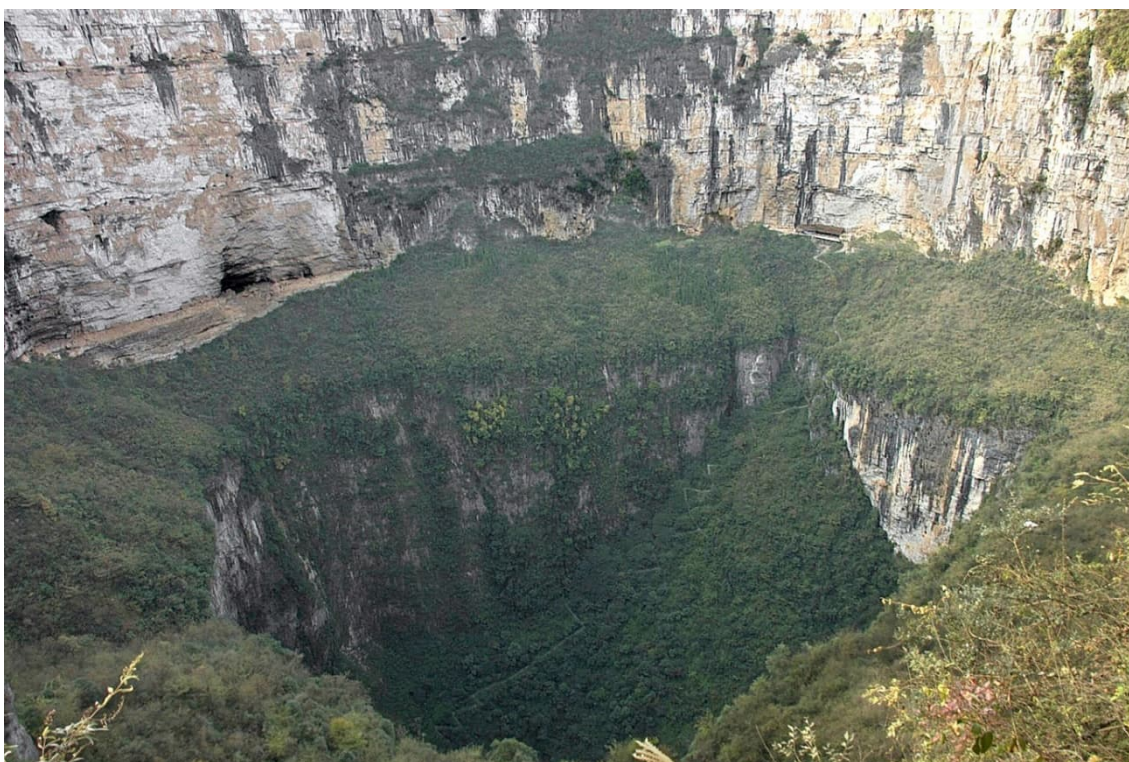
### 3.2 Urušne vrtače – globalni „geohazard“

Urušne vrtače su prepoznatljive kao jedan od najčešćih geomorfoloških oblika u krškim područjima, te su rasprostranjene svuda u svijetu. Krš je rasprostranjen na više od 20 % kontinentalne površine, a četvrtina ljudske populacije ovisi o vodi iz krša (slika 11).



Slika 11 Rasprostranjenost krša u svijetu (Izvor: [7])

Krš se rasprostire u Kini, na više od 30 % njene kontinentalne površine, a u Sjedinjenim Američkim Državama na 18 % kontinentalne površine [6,8]. U 20. stoljeću, europski geolozi su za vrtače koristili termin doline (ovaj termin su prvi počeli koristiti austrijski geolozi, sredinom 19. stoljeća pri istraživanjima provedenim u dinarskom kršu), dok je u novijoj literaturi eng. *sinkhole* najčešće korišten izraz. Postoji, globalno, velik naziva koji se koriste u različitim regijama, npr. *cenok* u Meksiku, *obruk* u Turskoj, *kokpit* na Jamajci ili *dahl* na Arapskom poluotoku. Najveća poznata urušna vrtača na svijetu je Xiaohzai Tiankeng (slika 12) u Kini, 662 metra duboka, volumena 111.9 milijuna m<sup>3</sup>.



Slika 12 Xiaohzai Tiankeng (Kina) - najveća poznata urušna vrtača na svijetu (Izvor: [8])

Jedna od dubljih urušnih vrtača na svijetu, je vrtača Crveno jezero, koja se nalazi u Republici Hrvatskoj, vertikalne visine 528 m uključujući jezero duboko 280 m [5].

Urušne vrtače predstavljaju glavnu i najveću opasnost vezanu uz krške geološke oblike. Slijeganje tla, vezana uz nastanke vrtača, kao i urušavanje samih vrtača mogu oštetiti građevine, infrastrukturu, te potencijalno rezultirati ozbiljnim ekonomskim i društvenim posljedicama. 2012. godine u Kini, obilna kiša u selu Mahoe je izazvala otvaranje 41 urušne vrtače, oštetivši 143 kuće, što je posljedično izazvalo i preseljenje 1830 osoba [5]. Nadalje,



nagla urušavanja vrtača mogu biti pogubna za čovjeka. Na području Južne Afrike, Far West Randa, urušavanjem vrtača, uglavnom uzrokovanim isušivanjem vodonosnika, za potrebe rudarenja zlata, poginulo je 39 osoba [5]. U studenom 2003., pored i ispod peterokatnice u gradu Calatayud, u sjeveroistočnoj Španjolskoj, otvorila se urušna vrtača (slika 13). Slijedom događaja, zgrada je morala biti srušena, uz izravne ekonomske posljedice od 5 milijuna eura [5].



Slika 13 Urušna vrtača u Catalayadu, Španjolska (Izvor: [5])

U literaturi se može pronaći primjer iz 2001. godine u Zaragozi, Španjolska gdje se urušna vrtača otvorila u samoj tvornici (slika 14).



Slika 14 Otvaranje vrtače u tvornici, Zaragoza, Španjolska (Izvor: [5])

U nastavku, u tablici 1, je prikazano više pojedinačnih slučajeva geohazarda vezanih uz otvaranje vrtača.

Tablica 1 Otvaranje urušnih vrtača i prouzročene štete (Izvor: [5])

| DATUM | LOKACIJA                                 | OPIS GEOHAZARDA  | ŠTETA  |
|-------|--|--|--|
| 1963. | Selo Liangwu, Kina                       | Otvaranje 157 urušnih vrtača na području dugom 1800 m širokom 250 m                              | Selo je napušteno  |
| 1976. | Brana Keban, rijeka Firat, Turska        | Otvaranje vrtače povezane sa spiljom.  | Skupi sanacijski radovi i kašnjenje u radu rezervoara                  |
| 1981. | Zimski Park, Florida                     | Urušna vrtača promjera 106 metara i dubine 36 metara   | Uništavanje ulica, komunalija, uništena jedna kuća i nekoliko poduzeća |
| 1988. | Grad Kuwait, Kuwait                      | Otvorene tri urušne vrtače promjera do 15 metara i dubine do 31 metra                            | Evakuacija 133 kućanstva   |
| 1995. | Camaiore, Italija                        | Urušna vrtača promjera 30 metara i dubine 18 metara  | Uništeno nekoliko kuća   |
| 1998. | Oviedo, Spain                            | Otvaranje urušne vrtače  | Rušenje bloka višekatnica. Procijenjena šteta 18 milijuna eura         |
| 2012. | Assumption Parish, Louisiana             | Vrtača koja se širi velikom brzinom zbog nestabilnosti pokosa, s istovremenim ispuštanjem metana | Evakuirano 350 stanovnika. Podignuta tužba vrijedna 50 milijuna dolara |
| 2013. | Disney World, Lake Coutny, Florida       | Urušna vrtača promjera 30 metara   | Srušila se trokatnica, 36 osoba evakuirano. Nema ozljeda               |
| 2020. | Mečenčani-Borojevići, Republika Hrvatska | Otvaranje preko 100 vrtača, najveća promjera 24.5 m  | Oštećenja agrikulturnih površina, oštećenje stambenih objekata         |

Drugi problemi, osim urušavanja, koji se vežu uz vrtače su diferencijalna slijeganja ispunje vrtače zbog nepravilnog oblika stijene ispod, poplave vezane uz otjecanje vode ka grlu vrtače, kao i povratno plavljenje pri visokim vodama i pornim tlakovima krškog vodonosnika, gubici vode u akumulacijama, kao i iznenadni prodori vode u podzemnim iskopima u blizini vrtača. Unatoč tome što je znanstvena zajednica napredovala pri različitim metodama procjene pojavnosti urušnih vrtača i upravljanjem njima povezanih rizika, posljednjih godina, nastanci štete povezane s urušnim vrtačama bilježe porast. Ovaj fenomen se može povezati s ubrzanom izgradnjom infrastrukture, urbanizacijom, samim tim i većim brojem građevina

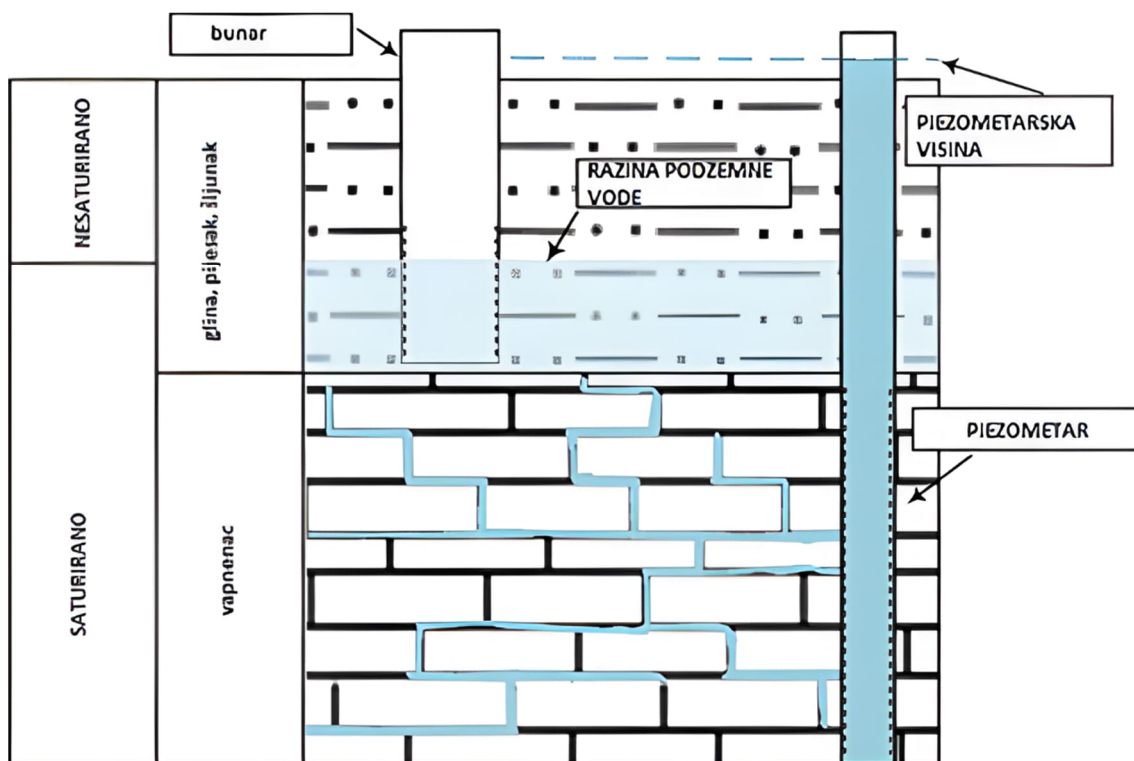
koje se nalaze na krškom području. Sve većim zahtjevima za vodom, te većim crpljenjem podzemnih voda iz krških vodonosnika se također potiče formiranje urušnih vrtača [1].

### 3.3 Uzroci pojavnosti i akceleratori otvaranja urušnih vrtača

Pojava urušnih vrtača može biti uzrokovana prirodnim fenomenima ali i djelovanjem čovjeka. Urušne vrtače ne treba promatrati strogo kao prirodan proces, već kao i opasnost koja može biti izazvana djelovanjem čovjeka. Jedan od faktora koji utječe na otvaranja urušnih vrtača, kao i na stabilnosti pokosa postojećih je povećana količina procjednih voda u tlo. Povećanjem količine vode koja se infiltrira u podzemlje, ubrzava se i sufozija, otapanje, a povećava se i sama težina nadsloja, te se smanjuje i posmična čvrstoća tla. Ova pojava može biti uzrokovana, osim padalinama, kontroliranim navodnjavanjem, kvarovima u vodovodnoj mreži, bušenjem tla i stijene, uklanjanjem vegetacije. Smanjenje vodnog lica također može biti okidač za pojavu urušnih vrtača tako da se povećava brzina toka vode prema dolje, gubi se korisno djelovanje uzgona na krovni luk potencijalne urušne vrtače, ubrzava se tok podzemne vode prema područjima gdje je smanjeno vodno lice čime se ubrzava otapanje i eroziju. Ova pojava može biti uzrokovana i prekomjernim crpljenjem podzemne vode, dugotrajnijim crpljenjima podzemne vode za potrebe gradnje i rudarenja. Gradnja brana i akumulacija može biti jedan od uzročnika otvaranja urušnih vrtača, može doći do visokih hidrauličkih gradijenata koji vode do većih brzina toka vode, što posljedično može ubrzati eroziju i otapanje. Iskopi, poglavito iznad kaverni, zbog smanjenja debljine nosivog luka, mogu biti okidač za pojavu urušne vrtače. Gradnjom građevina, na krškom terenu, povećava se opterećenje na nosivi luk, tj. krovište potencijalne urušne vrtače. Akceleratori su također razna dinamička opterećenja, poput potresa, podzemnih miniranja, iskopa udarnim strojevima [5,6].

#### 4. GEOLOGIJA I HIDROGEOLOGIJA PODRUČJA MEČENČANI - BOROJEVIĆI

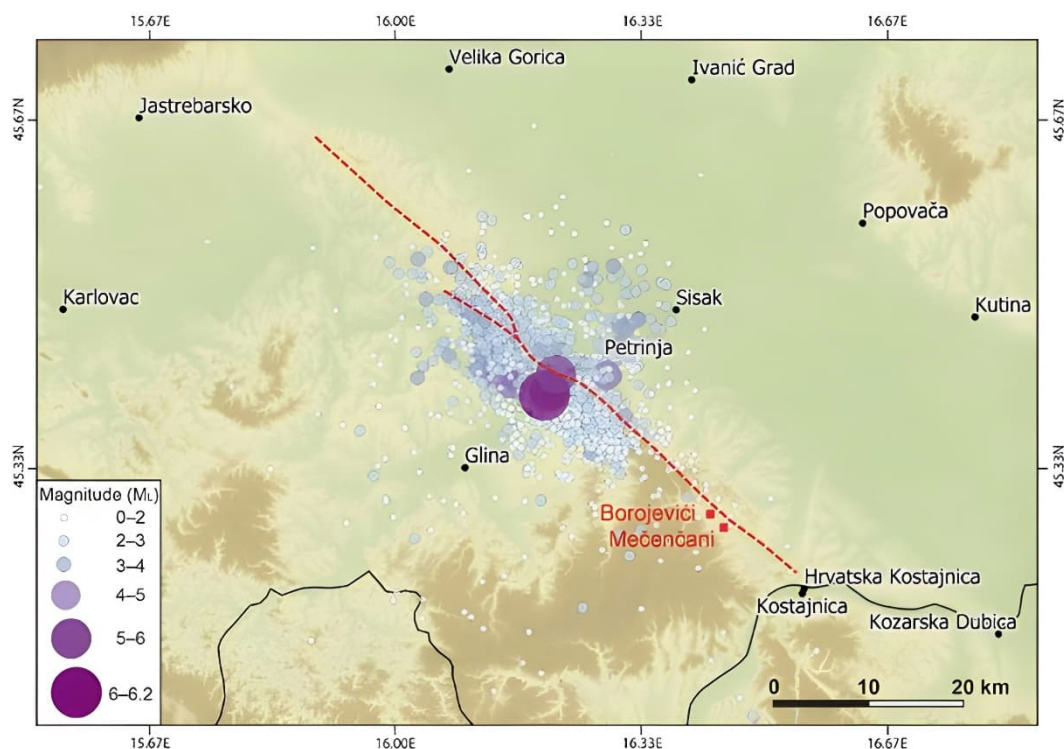
Urušne vrtače, na mikrolokaciji Mečenčani-Borojevići, se pojavljuju isključivo u područjima gdje prevladavaju deluvijalno-proluvijalne naslage, koje uključuju slabo do dobro vezane šljunke-konglomerate, pijesak i gline. U šljuncima i konglomeratima nalaze se dobro zaobljeni kamenčići promjera između 2 i 15 cm, koji su vjerojatno rezultat erozije zelenih magmatskih stijena, kao i crvenih i tamnosivih klastičnih i karbonatnih stijena. Te stijene su prenesene rijekom Sunjom i njenim pritocima s vrha Zrinske gore, gdje su te vrste stijena vidljive na površini, te su se taložile u poplavnoj ravnici rijeke Sunje u blizini sela Mečenčani. Starost ovih deluvijalno-proluvijalnih naslaga datira iz holocenskog razdoblja. Podlogu holocenskih, deluvijalno-proluvijalnih naslaga čine erodirane vapnenačke stijene badenske starosti koje grade jugozapadnu padinu Zrinske gore blizu sela Mečenčani. Podaci ukazuju da su slojevi ovih stijena nagnuti prema sjeveroistoku (prema poplavnoj ravnici rijeke Sunje) pod kutom nagiba između 25 i 45 stupnjeva. Stoga se može pretpostaviti da ove stijene čine temeljni sloj ispod deluvijalno-proluvijalnih naslaga u području sela Mečenčani. U pretholocenskom razdoblju, prije nego što su se holocenske deluvijalno-proluvijalne naslage taložile preko badenskih stijena, badenski vapnenac bio je izložen površini tijekom dugog razdoblja. Vjerojatno je da su ove stijene pretrpjele eroziju zbog djelovanja vanjskih čimbenika poput oborina i lokalnih vodotoka. Tijekom tog procesa, u vapnenačkim stijenama temeljnog sloja mogli su se oblikovati površinski krški oblici kao što su vrtače (ponikve), privremeni ili stalni vodotoci i ponori, koji bi služili za odvodnju površinskih voda u okršeno podzemlje. Debljina gornjeg sloja, koji se sastoji od šljunka pijeska i gline, u prosjeku iznosi 10 metara, te je izrazito slabe propusnosti. U izmjenama vlažnih i suhih perioda razina vode u ovom vodonosniku varira za oko 2 metra, te za vrijeme vlažnih perioda razina podzemne vode je jako blizu površini tla. Ispod tog aluvijalnog sloja nalazi se dobro propusna krška stijena, u kojoj se za vrijeme vlažnih perioda pritisak vode znatno povećava, te piezometarska visina doseže i do 10 centimetara iznad razine tla (slika 15) [1,10].



Slika 15 Hidrogeološka svojstva područja Mečenčani – Borojevići (Izvor: [10])

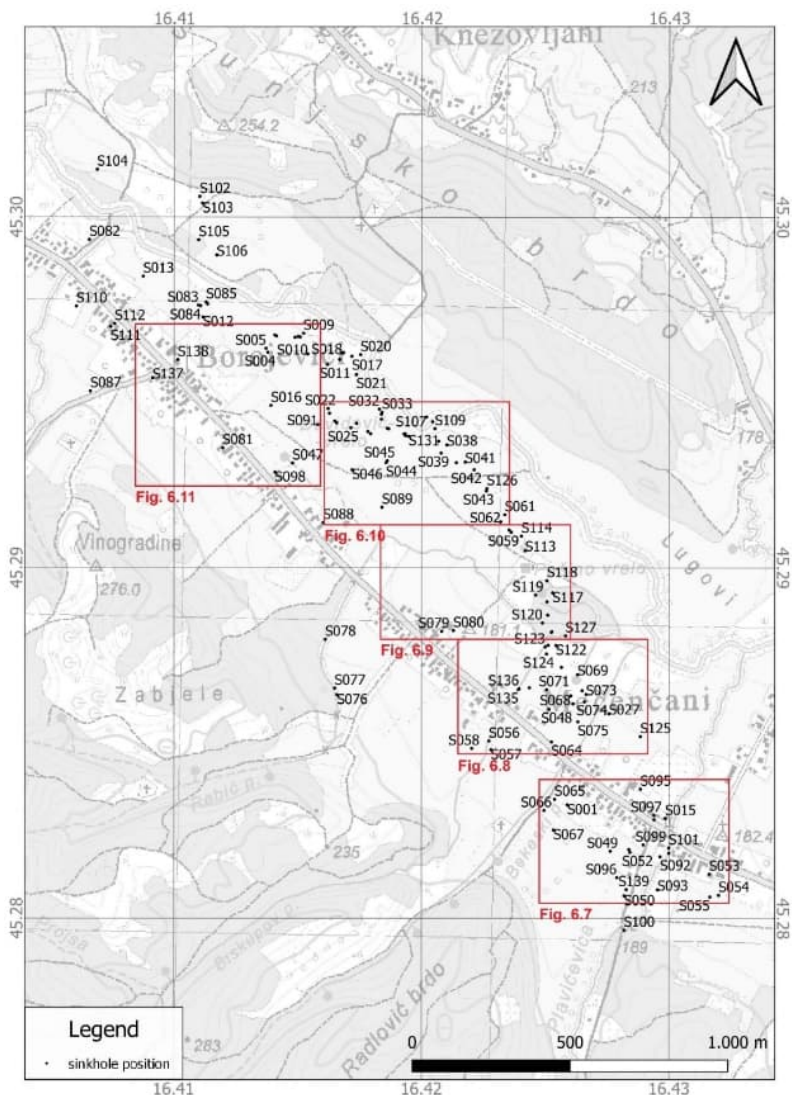
#### 4.1 Urušne vrtače na području Mečenčani – Borojevići

Potres magnitude 6.2 po Richterovoj ljestvici je pogodio područje Banovine u Republici Hrvatskoj, u prosincu 2020. godine, s epicentrom pet kilometara jugozapadno od Petrinje, u selu Strašnik, na dubini od 11.5 kilometara. Glavnom udaru magnitude 6.2, prethodili su dva manja potresa, magnitude 4.7 i 5.2, a nakon glavnog udara uslijedilo je više desetaka manjih podrhtavanja tla od kojih je najjači bio magnitude 4.9 po Richterovoj ljestvici (slika 16) [11].



Slika 16 Pozicije epicentara potresa u okolici Petrinje u razdoblju od 28. prosinca 2020. do siječnja 2021. (Izvor: [10])

Od posljedica potresa je poginulo sedam ljudi, oštećeno je više stambenih, kulturnih i poslovnih građevina, a oštećena je i infrastruktura za zaštitu od poplava. Geotehnički problemi povezani s potresom na tom području manifestirali su se u obliku dinamičke nestabilnosti tla, uključujući aktivaciju više klizišta i likvefakciju tla. Osim ovih učestalih i standardnih pojava od djelovanja potresa, na području južno od epicentra pojavilo se više od 100 urušnih vrtača (slika 17), a nije zabilježeno da su se u tom obimu i toj veličini pojavljivali na predmetnoj lokaciji [11].



Slika 17 Pozicije novih urušnih vrtača nakon potresa 2020. (Izvor: [10])

Takva neuobičajena pojava je zaintrigirala i zabrinula širu javnost, kao i samu znanstvenu i inženjersku zajednicu. Većina urušnih vrtača se pojavila na poljoprivrednim zemljištima, ali neke su se pojavile i uz stambene građevine. Na formiranje urušnih vrtača nisu ukazivale nikakve prethodne deformacije tla, što ih čini iznimno opasnim. Nedostatak indikatora njihove pojavnosti, kao i porast broja urušnih vrtača, na tom geološki specifičnom području, doveli su do toga da se područje proglašeno visokorizično za stanovnike koji žive na tom području. Pokosi urušnih vrtača su vertikalnog ili subvertikalnog nagiba, te kao takvi, pod djelovanjem više čimbenika kao što je promjena porinutih tlakova, utjecaj potresa, postaju nestabilni te dolazi do progresivnog urušavanja i širenja urušnih vrtača (slike 17, 18, 19, 20) [10].





Slika 18 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače - 1 (Izvor: [10])



Slika 19 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače - 2 (Izvor: [10])



Slika 20 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače - 3 (Izvor: [10])



Slika 21 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače -4 (Izvor: [10])

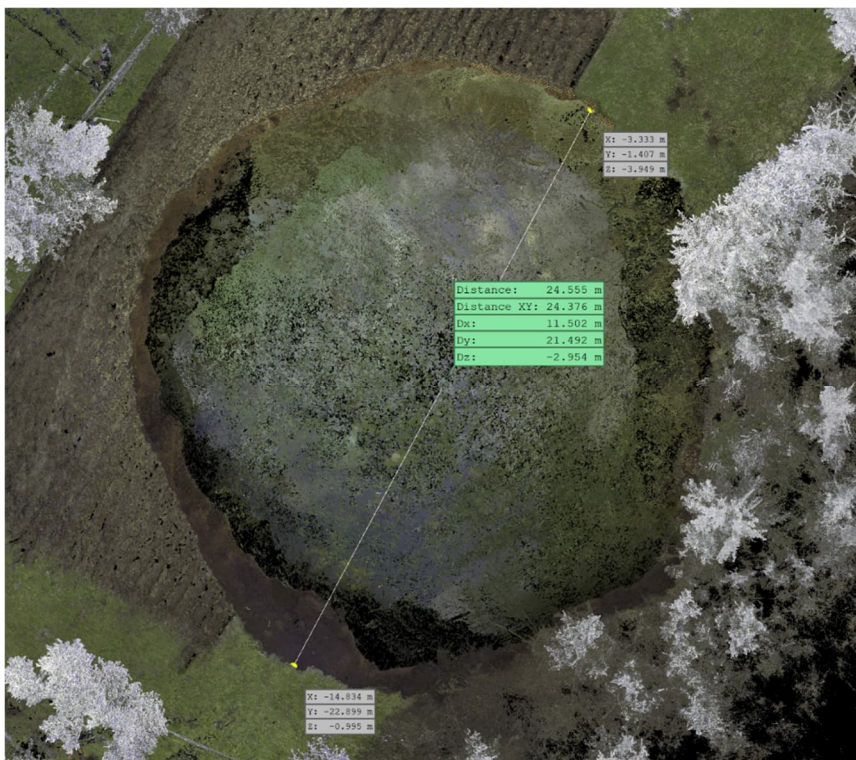
#### 4.1.1 Urušna vrtača S001

Najveća vrtača na ovom području (slika 22), koja se otvorila 6. siječnja, nekoliko sati nakon potresa magnituda 4.9 stupnjeva po Richterovoj skali, je vrtača oznake S001. Vlasnici zemljišta su dan prije, 5. siječnja primijetili manja slijeganja.



Slika 22 Urušna vrtača S001 (Izvor: [10])

Razina vode u vrtači, mjereno 15. veljače je bila 2.5 metara ispod površine tla i bila je na relativno istoj razini od otvaranja. Najveća izmjerena dubina vrtače, mjerena s ručno izrađenim mehanizmom, uteg s konopom, je bila 11.7 metara. LiDAR snimkom iz zraka (slika 23) je utvrđen najveći promjer vrtače i iznosi 24.55 m. Mjerenjem na dubini od 3,97 metara, najveći promjer je iznosio 21.87 m [10].



Slika 23 LiDAR snimak iz zraka - najveći promjer urušne vrtače S001 (Izvor: [10])

Bušenjem dvije geotehničke istražne bušotine u blizini urušne vrtače, utvrđeno je da se tlo sastoji od 0.5 m humusnog sloja, ispod kojeg se nalazi do dubine 4 m sloj visokoplastične gline s primjesama krupnijih čestica, pijeska, promjera do 20 mm. Ispod ovog sloja, sloj debljine 2.5 metra se sastoji od krute do jako krute gline. Ispod toga u bušotini B-1 je pronađena laporasta kruta siva glina, a u bušotini B-2 glinovito tlo s primjesama pijeska [4]. Detaljniji prikaz bušotina i vizualni presjek je obrađen u poglavlju 5.

#### 4.1.2 Primjeri urušnih vrtača u blizini stambenih objekata – S014, S015

Vrtača S014 se urušila 31. prosinca 2020. godine, odmah pored obiteljske kuće, (slika 24) čija je nosiva konstrukcija zidana opeka. Urušavanje vrtače je prouzrokovalo pucanje zidova i podne ploče [10].



Slika 24 Urušna vrtača S014 (Izvor: [10])

Šest sati poslije najjačeg potresa, 29. prosinca 2020. godine, došlo je do urušavanja i formiranja dvije manje vrtače kod obiteljske kuće, promjera oko 1.5 m i dubine oko 1 m, koje su se daljnjim urušavanjem, nakon 3 sata spajanjem formirale urušnu vrtaču S015 (slika 24).



Slika 25 Lidarski snimak urušne vrtače S015 (Izvor: [10])

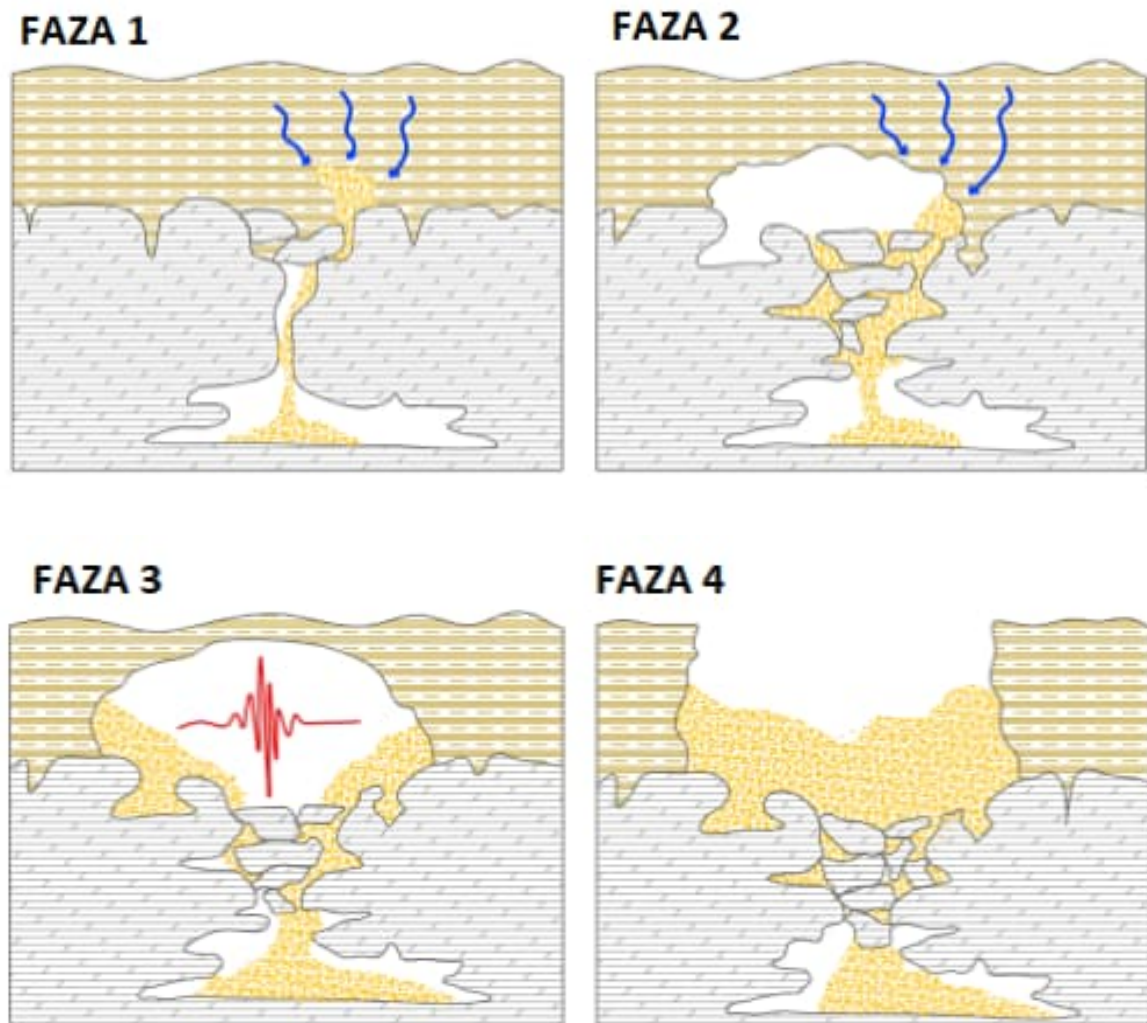
#### 4.2 Uzroci pojavnosti urušnih vrtača na području Mečenčani-Borojevići

Zbog specifičnosti geologije i hidrogeologije ovog područja, kako je i objašnjeno u poglavlju 4, postojale su predispozicije za formiranje većeg broja urušnih vrtača. Tijekom vlažnih razdoblja i visokih pritisaka vode iz krškog vodonosnika, kao i ispiranjem čestica s vodom koja se infiltrira u podzemlje iz površinskih tokova i oborina, dolazi do postupne podzemne erozije nekoherentnog sitnozrnatog pokrovnog tla (sufozija) i/ili uzastopno komadanje koherentnog tla, te posljedično odnašanje ispranog materijala u krški, raspucali podzemni sustav (FAZA 1, slika 26).

Ovakvim mehanizmom se postupno stvaraju kaverne, tj. formiraju se šupljine u podzemlju. Iznad tih šupljina se onda formira svod od pokrovnog tla, a urušavanje tog pokrovnog tla u šupljinu je češće u razdobljima obilnih oborina, jer sama voda povećava zapreminsku težinu tla, a smanjuje posmičnu čvrstoću te se time narušava i sama stabilnost luka (FAZA 2, slika 26).

Ako je pokrovni materijal krući, odnosno prekonsolidiran, nema naznaka pojavnosti urušnih vrtača, odnosno nema prethodnih površinskih slijeganja, što predstavlja iznimnu opasnost, jer se urušavanje događa trenutno ili u roku od par sati. U konkretnom slučaju, potres jakog

intenziteta (FAZA 3, slika 26) je bio okidač koji je uzrokovao urušavanje materijala luka (FAZA 4, slika 26) [3, 10].



Slika 26 Shematski prikaz nastanka urušnih vrtača (Izvor: [3])

## 5. ANALIZA UTJECAJA OBORINA NA STABILNOST POKOSA URUŠNIH VRTAČA

Dobro je poznato da infiltracija vode može destabilizirati prirodne, ali i izgrađene kosine. Nestabilnosti kosina izazvanih kišom pojavljuju se tijekom ili odmah nakon razdoblja intenzivnih oborina, ili dugotrajnih oborina niskog intenziteta. Postoji niz faktora koji utječu na stabilnost kosine tijekom oborina, uključujući geometriju kosine, svojstva tla, intenzitet i trajanje kiše, prethodni uvjeti vlažnosti kosine kao i razina podzemne vode.

Ideja ovog proračuna je metodološki prikazati kako oborine kao i razina vode u vrtači utječu na stabilnost pokosa vrtače, te je napravljen proračun analize procjeđivanja i analize stabilnosti pokosa vrtače za sljedećih 5 proračunskih situacija koje su prikazane u tablici 2.

Tablica 2 Prikaz 5 proračunskih situacija koje su analizirane

| Proračunska situacija | Opis situacije  |
|-----------------------|---|
| 1                     | Stabilnost pokosa prilikom crpljenja vode do dna vrtače   |
| 2                     | Stabilnost pokosa kada je razina vode na dnu vrtače   |
| 3                     | a<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj petodnevne kiše od 20 mm/dan                                   |
|                       | b<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj petodnevne kiše od 40 mm/dan                                   |
|                       | c<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj petodnevne kiše od 80 mm/dan                                   |
|                       | d<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj desetodnevne kiše od ukupno 253.6 mm                           |
| 4                     | Stabilnost pokosa kada je vrtača ispunjena vodom (razina vode na 3.6 m ispod površine tla)  |
| 5                     | Stabilnost pokosa kada je vrtača ispunjena vodom (razina vode na 3.6 m ispod površine tla) + utjecaj petodnevne kiše od 80 mm/dan |

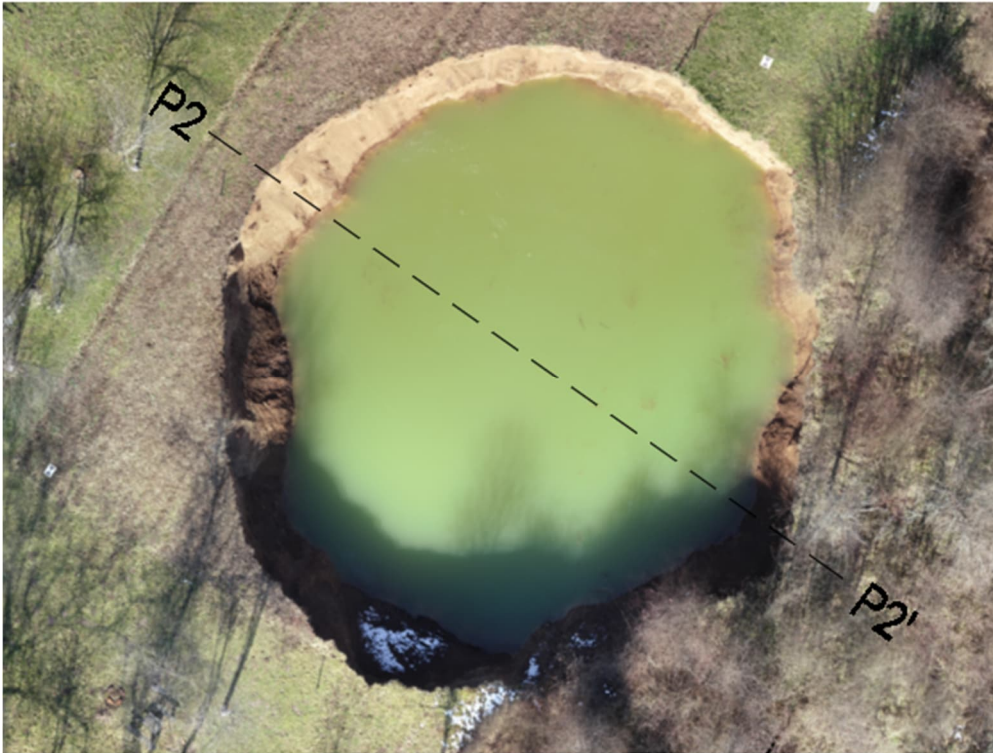
Proračunska situacija 1 je razmatrana radi potrebe sanacije urušne vrtače, tj. izvedbe radova u suhom. Proračunske situacije 2 (voda na dnu vrtače) i 4 (vrtača ispunjena vodom, razina vode 3.6 m ispod površine tla prema geodetskom mjerenju 2. ožujka 2022. godine (detaljnije u poglavlju 5.1)) su razmatrane radi prikaza utjecaja razine vode u vrtači na stabilnost pokosa. U proračunskoj situaciji 3, napravljene su 4 podanalize, a odabrane su količine petodnevne kiše od 20 mm/dan, 40 mm/dan i 80 mm/dan kako bi se demonstrirao utjecaj različitih intenziteta kiše na faktor sigurnosti. Desetodnevna kiša od ukupno 253.6 mm izabrana je na temelju podataka preuzetih od Državnog hidrometeorološkog zavoda (detaljnije u poglavlju 5.3.3). Proračunska situacija 5 analizirana je da bi se dobio uvid kako ekstremne oborine utječu na stabilnost pokosa već saturiranog tla.

Za provedbe analize, korišten je program Geostudio i njegovi pripadni proračunski moduli *SLOPE/W* i *SEEP/W*. Unutar proračunskog modula *SLOPE/W* odabrana je metoda analize stabilnosti kosine Morgensten-Price.

## 5.1 Odabir i geometrija urušne vrtače

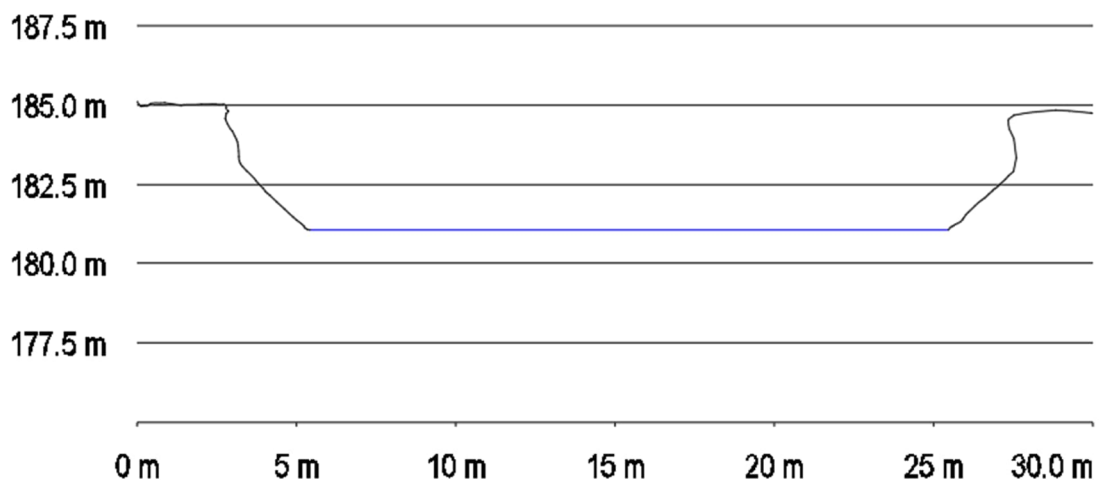
Za potrebe analize, odabrana je urušna vrtača S001 s područja Mečenčana, prethodno opisana u poglavlju 4.1.1. Za provedbu analiza, odabran je poprečni presjek P2-P2' kao na slici 27.





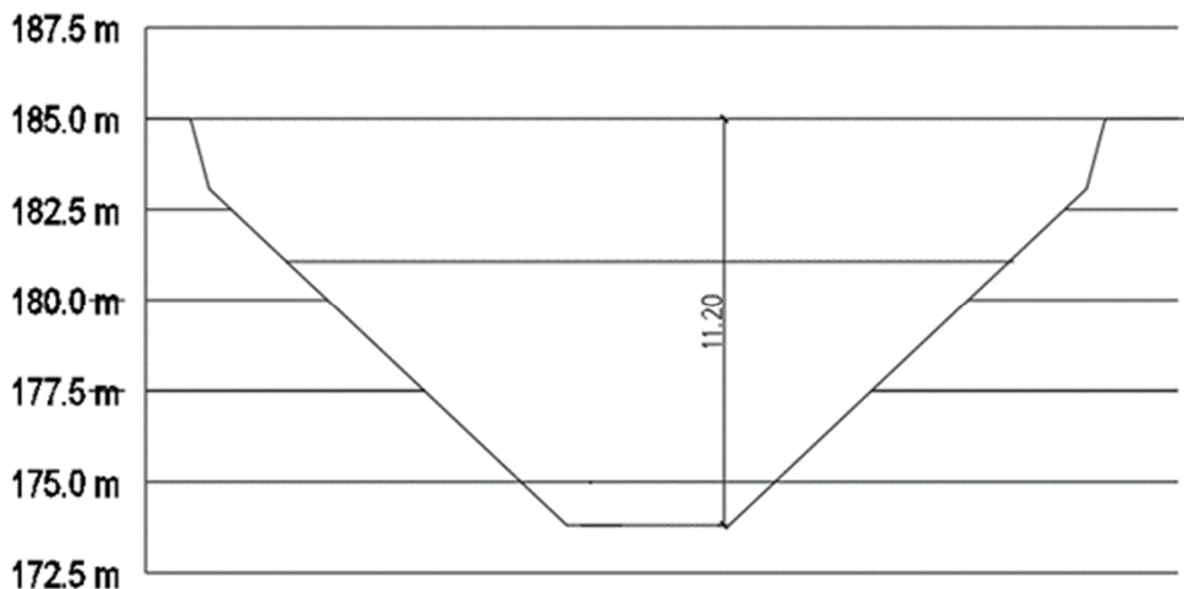
Slika 27 Urušna vrtača S001 i poprečni presjek P2-P2'

Geodetskim mjerenjima, koja su provedena 2. ožujka 2022. godine, izrađen je geometrijski profil presjeka P2-P2' kao na slici 28. Razina podzemne vode na dan mjerenja bila je 3.6 m ispod površine tla.



Slika 28 Geodetski profil vrtače S001, mjereno 2. ožujka 2022. godine

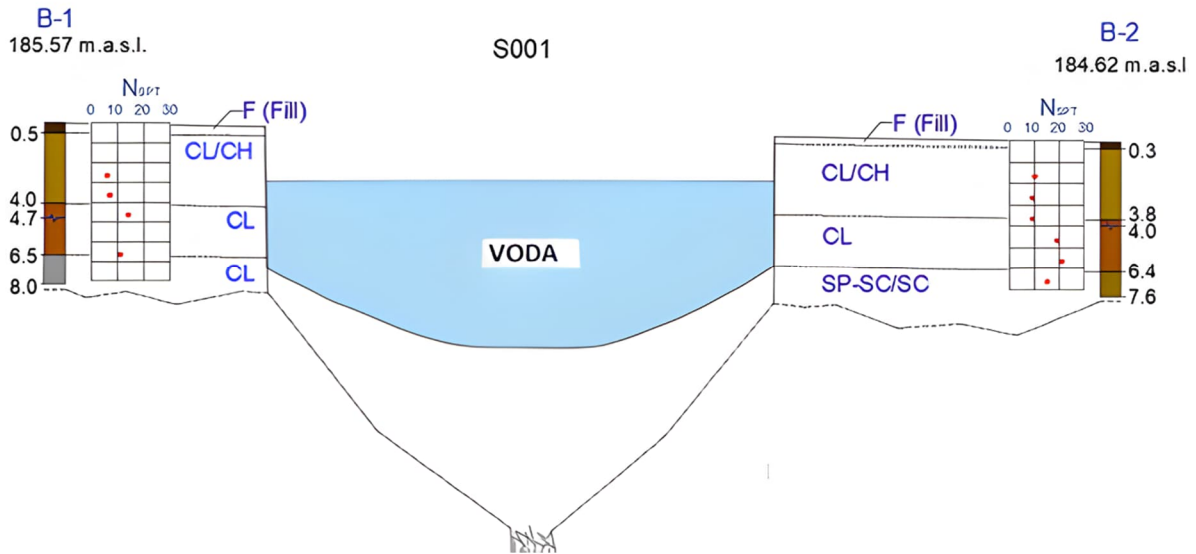
Geodetsko snimanje pokosa seže do razine vode, daljom razradom podloge, za potrebe analize stabilnosti pokosa, izrađen je pojednostavljen profil (slika 29) s pretpostavljenim nagibom pokosa do dna vrtače, te ukupnom dubinom vrtače 11.20 m.



Slika 29 Pojednostavljeni profil vrtače za potrebe analize

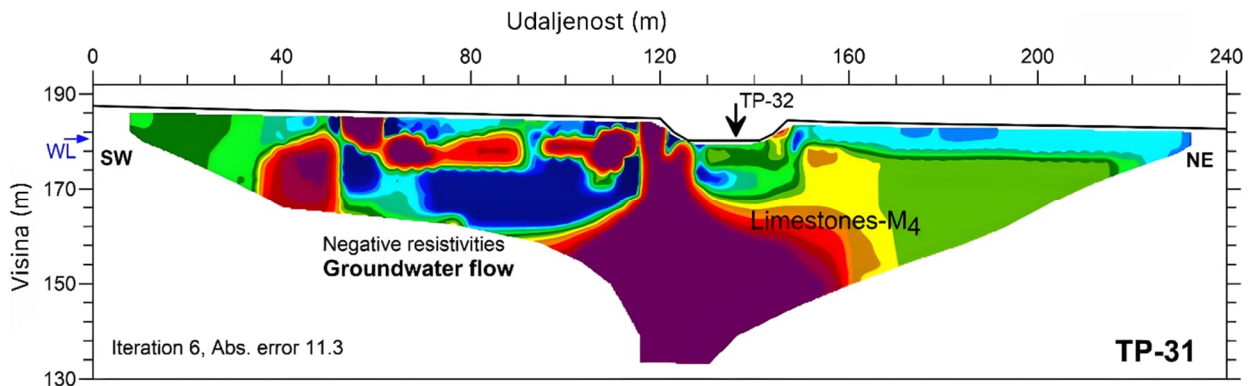
## 5.2 Parametri materijala i geotehnički profil tla

Parametri materijala korišteni u ovim analizama su pretpostavljeni na osnovu geotehničkog profila (slika 30), odnosno prema nazivlju slojeva prema USCS klasifikaciji. Prikazani geotehnički profil je izrađen na osnovu istražnih geotehničkih radova u neposrednoj blizini urušne vrtače S001. Istraženo je tlo iz dvije bušotine B-1 do dubine 8.0 metara i B-2 do dubine 7.6 metara [11]. Parametri potrebni za provedbu ove analize su kohezija, kut unutarnjeg trenja, zapreminska težina i koeficijent propusnosti. Temeljni sloj, odnosno dno urušne vrtače je za potrebe ovih analiza definirano kao jako čvrsta nepropusna stijena. U tablici 3 su prikazani odabrani parametri za provedbu ove analize.



Slika 30 Geotehnički profil tla (Izvor: [11])

Na predmetnoj lokaciji su rađena i geofizička ispitivanja električnom tomografijom. Na slici 31 je prikazan jedan od profila izrađenih na osnovu ispitivanja električnom tomografijom, na lokaciji urušne vrtiće S001, koji pokazuje da u gornjim dijelovima litotamnijskih vapnenaca postoje brojne veće i manje podzemne šupljine, te se struktura može opisati kao mrežasta [12].



Slika 31 Profil izrađen na osnovu ispitivanja električnom tomografijom (Izvor: [12])

Tablica 3 Parametri materijala potrebnih za provedbu analize

| PARAMETRI             |                                      | γ<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | c<br>(kPa) | φ<br>(°) | k<br>(m/s)           |
|-----------------------|--------------------------------------|---------------------------|------------|----------|----------------------|
| OZNAKA                | TLO                                  |                           |            |          |                      |
| CL-CH                 | GLINA<br>(pjeskovita i masna glina)  | 20                        | 10         | 28       | 1 × 10 <sup>-6</sup> |
| CL 1 (gornja)         | GLINA<br>(kruta do jako kruta glina) | 19                        | 14         | 20       | 1 × 10 <sup>-7</sup> |
| CL 2 (donja)          | GLINA<br>(laporasta siva glina)      | 19                        | 12         | 18       | 1 × 10 <sup>-6</sup> |
| NEPROPUSNA<br>STIJENA | -                                    | 25                        | -          | -        | 0                    |

Pri modeliranju i zadavanju materijala u proračunskom modulu za analizu procjeđivanja, odabrani su saturirani/nesaturirani uvjeti, a pri takvoj analizi potrebno je dodatno definirati odnos obujamske vlažnosti s negativnim pornim tlakom, kao i odnos koeficijenta propusnosti s negativnim pornim tlakom.

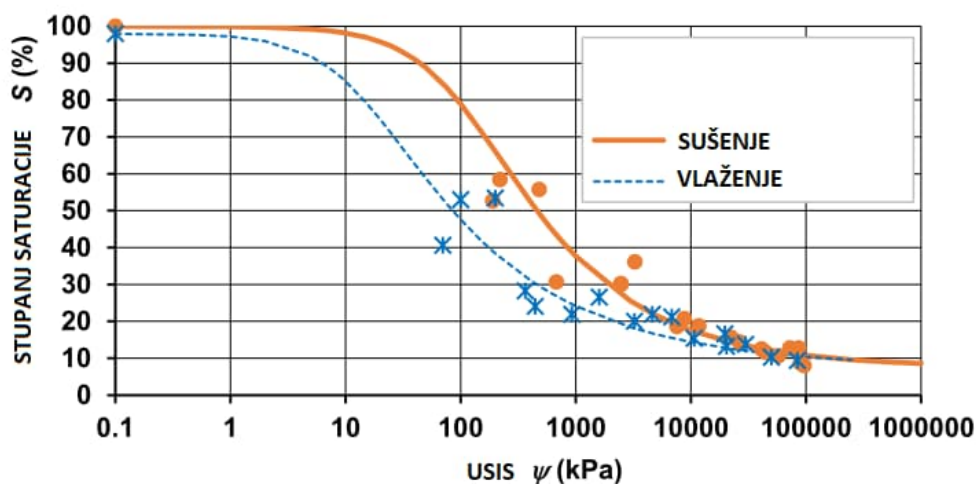
Obujamska vlažnost je omjer volumena vode prisutnog u tlu u odnosu na ukupni volumen tla. Ovaj pojam opisuje koliko vode se nalazi u jedinici volumena tla, uključujući čestice tla, vodu i zrak. U nesaturiranom tlu volumen vode ovisi o negativnom tlaku vode, a što je manji volumen vode u tlu to je manji i stupanj saturacije. Da bi tlo prešlo iz saturiranog u nesaturirano stanje tlak vode u porama mora postati negativan (usis), a nakon dostizanja određene vrijednosti usisa (različito za različite vrste tla) zrak ulazi u pore tla, te se bitno smanjuje obujamska vlažnost sve do rezidualne vlažnosti, pri kojoj dalje smanjenje tlaka vode ne utječe bitno na smanjenje obujamske vlažnosti. Usis u tlu, ili negativni porni tlak, značajno utječe na stabilnost kosine jer djeluje na povećanje efektivnog naprezanja u nezasićenom tlu, što doprinosi povećanju stabilnosti kosine. Usis pomaže održati čestice tla čvrsto povezane, povećavajući unutarnje trenje i otpornost tla na klizanje. Koeficijent propusnosti se smanjuje s povećanjem udjela zraka u tlu, a posmična čvrstoća raste s porastom negativnog tlaka. Pri modeliranju parametara materijala, za prikaz ovisnosti obujamske vlažnosti s obzirom na usis korištena je Van Genuchtenova funkcija. Odnosi iz te funkcije su dalje definirali pad koeficijenta propusnosti s obzirom na pad obujamske vlažnosti, tj. povećanje usisa a, Van Genuchtenova funkcija definirana je na sljedeći način:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m}$$

gdje su:

- $\theta(h)$  – obujamska vlažnost pri određenom usisu  $h$
- $\theta_r$  – rezidualna obujamska vlažnost tla
- $\theta_s$  – zasićena obujamska vlažnost tla
- $h$  – usis
- $\alpha$  – tlak potreban za ulazak zraka u pore [13]

Iz dostupnih podataka vezanih u vrtaču S001 (slika 32), a na osnovu pokusa higrometrom koji je urađen na dubini 2 m, odabrani su parametri za Van Genuchten-ovu jednadžbu, a zbog nedostatka podataka, pretpostavljeni jednaki parametri za sve slojeve, te je pretpostavljeno da obujamska vlažnost potpuno saturiranog tla iznosi 50 % [11].

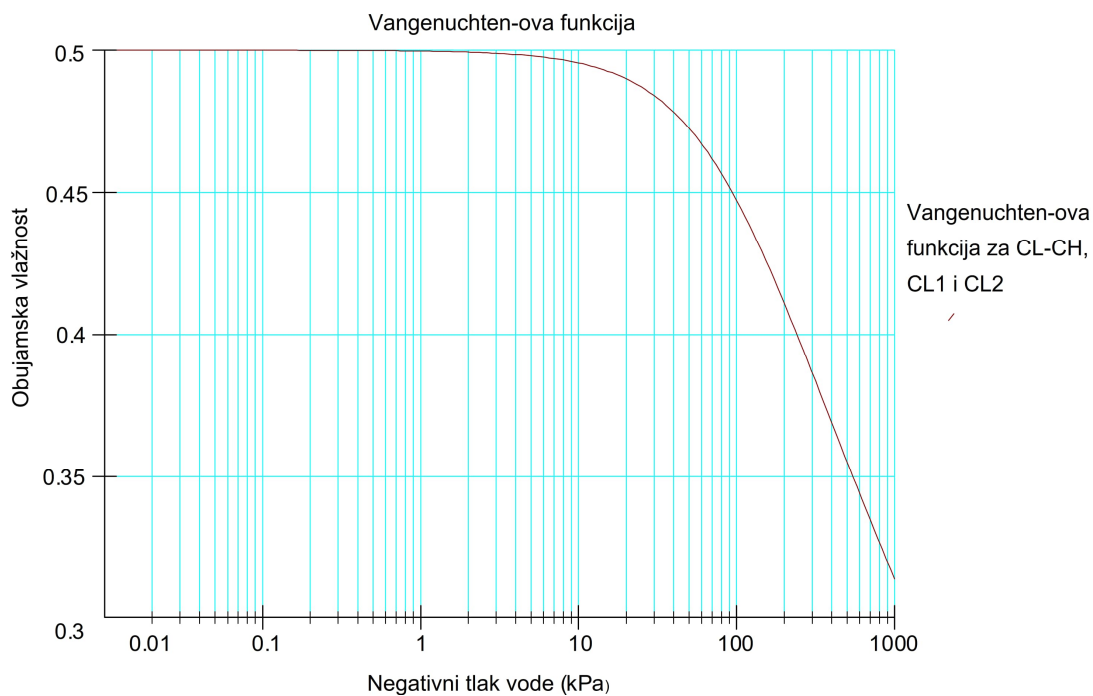


Slika 32 Izlazni rezultati pokusa higrometrom (Izvor: [11])

Tablica 4 Parametri za Van Genuchtenov model (Izvor: [11])

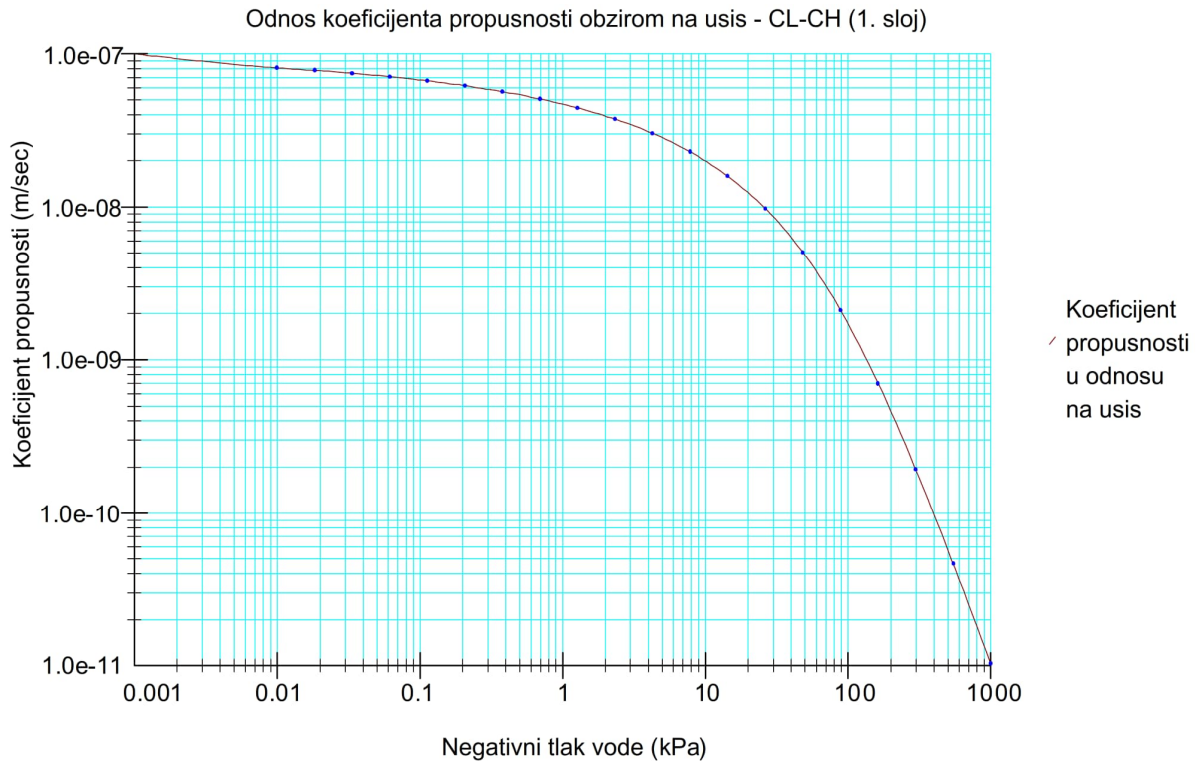
| $\alpha$ (kPa) | $m$  | $n$  | $\theta_s$ (%) |
|----------------|------|------|----------------|
| 95             | 0.39 | 1.25 | 50             |

Na slici 33 je prikazana krivulja odnosa obujamske vlažnosti i pornog tlaka pri zadanim parametrima.

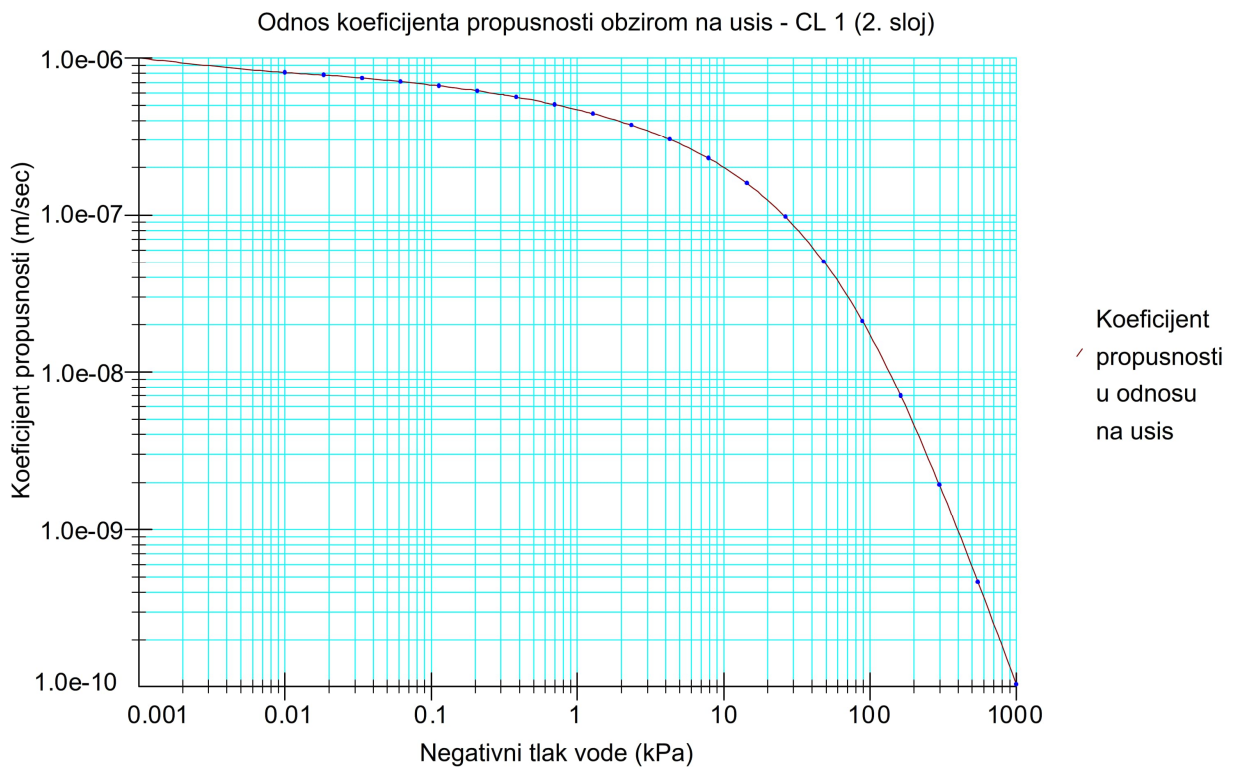


Slika 33 Odnos obujamske vlažnosti s porastom negativnog purnog tlaka

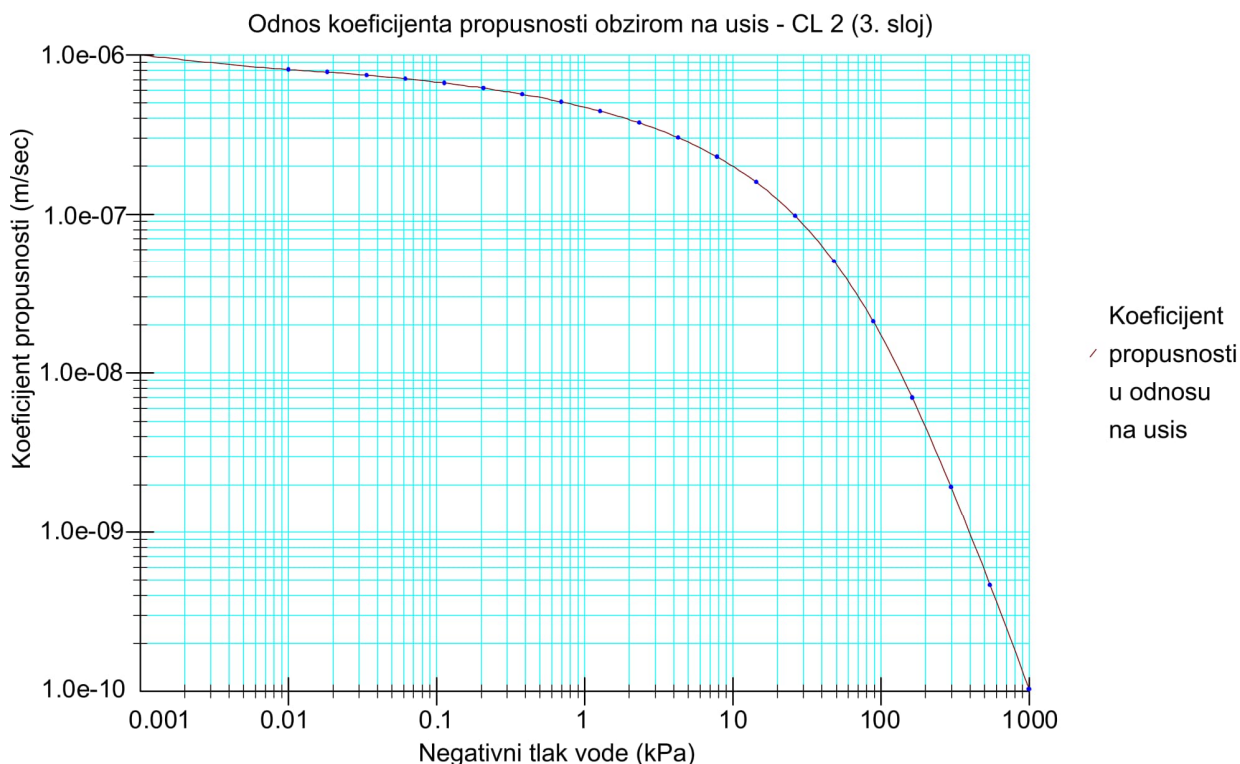
Potrebno je definirati i funkciju ovisnosti koeficijenta propusnosti s negativnim tlakom vode. Koeficijenti propusnosti se mijenjaju u nesaturiranom tlu, jer čim u porama ima zraka, koeficijent propusnosti se smanjuje jer je protok vode kroz tlo otežan. U ovom slučaju je također korišten Van Genuchtenov model procjene. Na slikama 34, 35 i 36, možemo vidjeti odnos koeficijenta propusnosti i negativnog purnog tlaka (usisa) za sva tri sloja koja se koriste u analizi.



Slika 34 Odnos koeficijenta propusnosti i usisa za CL-CH (1. sloj)



Slika 35 Odnos koeficijenta propusnosti i usisa za sloj CL 1 (2. sloj)



Slika 36 Odnos koeficijenta propusnosti i usisa za sloj CL 2 (3. sloj)

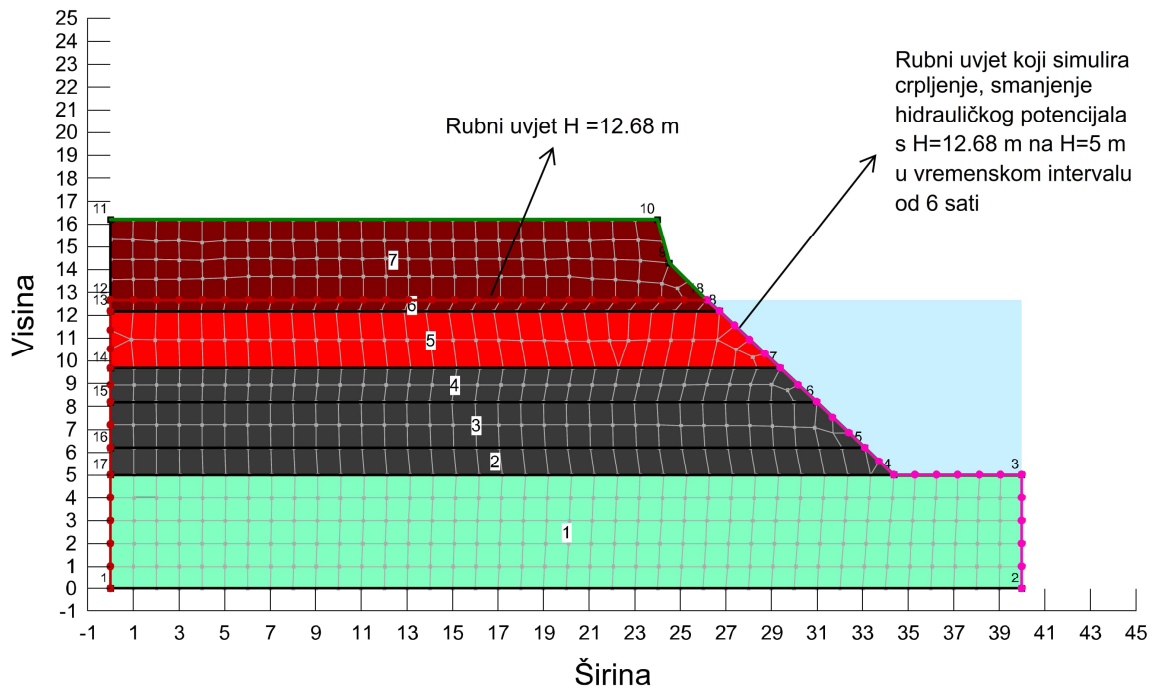
Prethodno definirana Van Genuchtenova funkcija, korištena je pri definiranju materijala u oba tipa analiza, u analizi procjeđivanja pri definiranju koeficijenta propusnosti, a u analizi stabilnosti pri definiranju karakteristike usisa materijala.

### 5.3 Analize stabilnosti i procjeđivanja

#### 5.3.1 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa prilikom crpljenja vode do dna vrtače – proračunska situacija 1

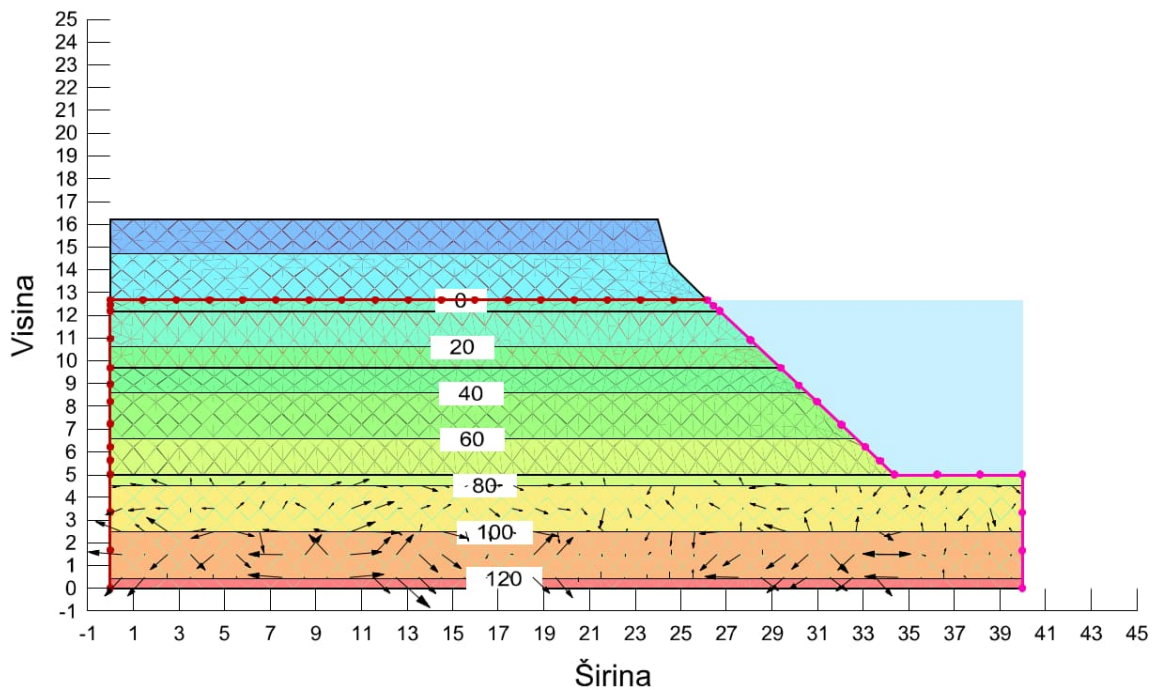
U ovoj proračunskoj situaciji, prvotno je simulirano crpljenje vode iz vrtače, u proračunskom modulu za analizu procjeđivanja, gdje je rubnim uvjetima definirano spuštanje vode do dna vrtače, za 7.68 m, u vremenskom intervalu od 6 sati (slika 37).



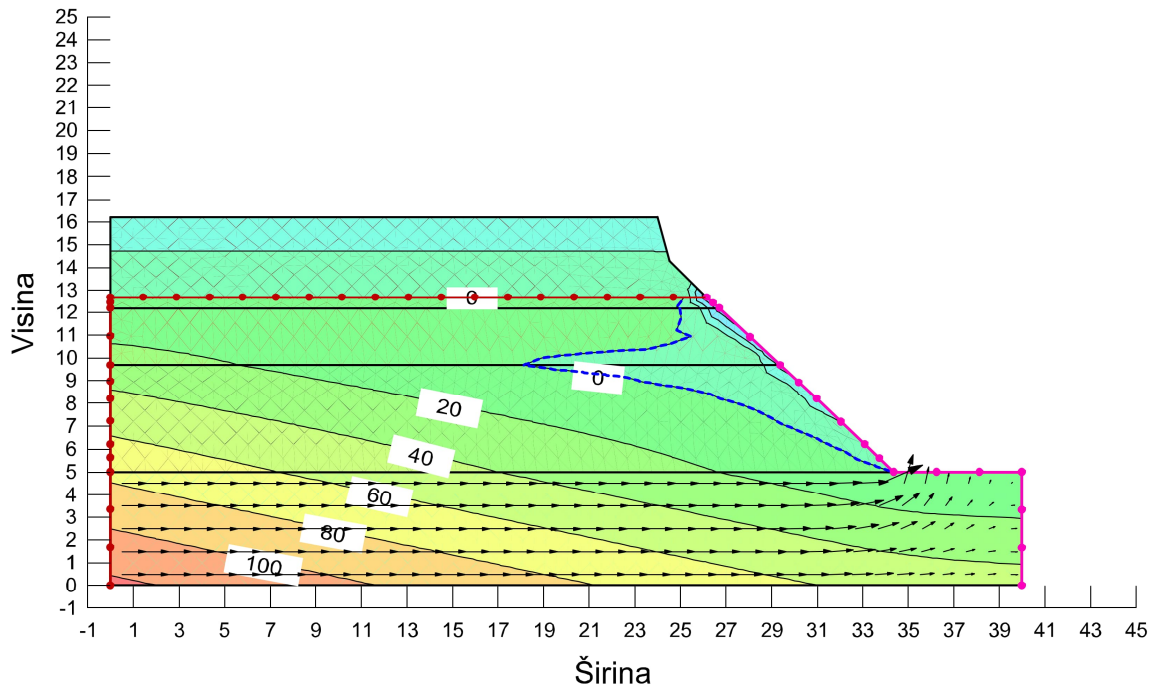


Slika 37 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 1

Izlazni rezultati analize procjeđivanja su prikazani na slici 38 (izlazni rezultat prije početka crpljenja) i slici 39 (izlazni rezultat nakon završetka crpljenja od 6 sati).



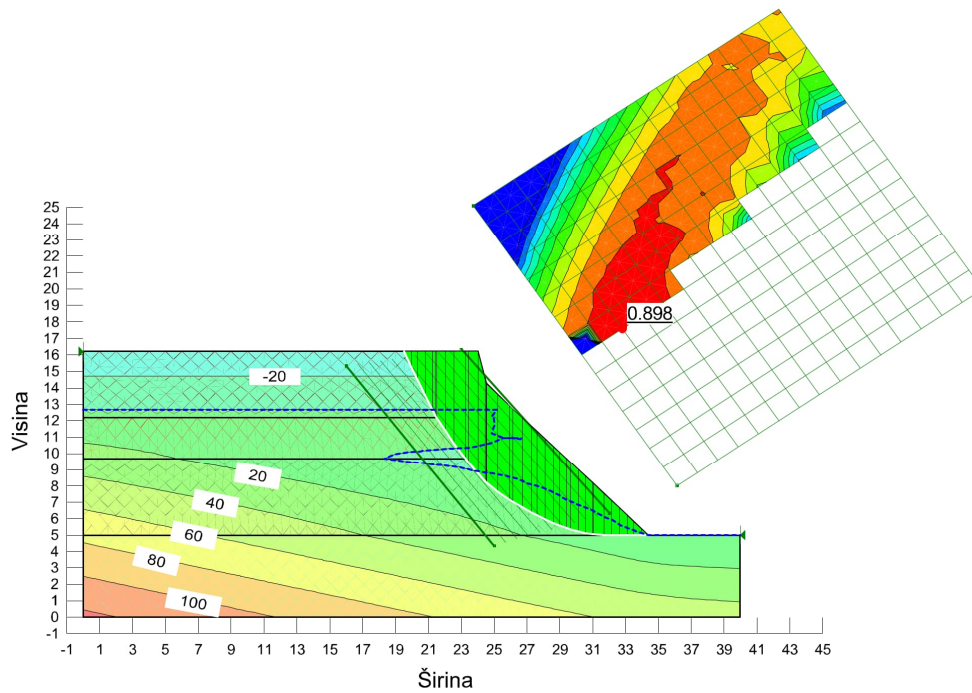
Slika 38 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – prije početka crpljenja – proračunska situacija 1



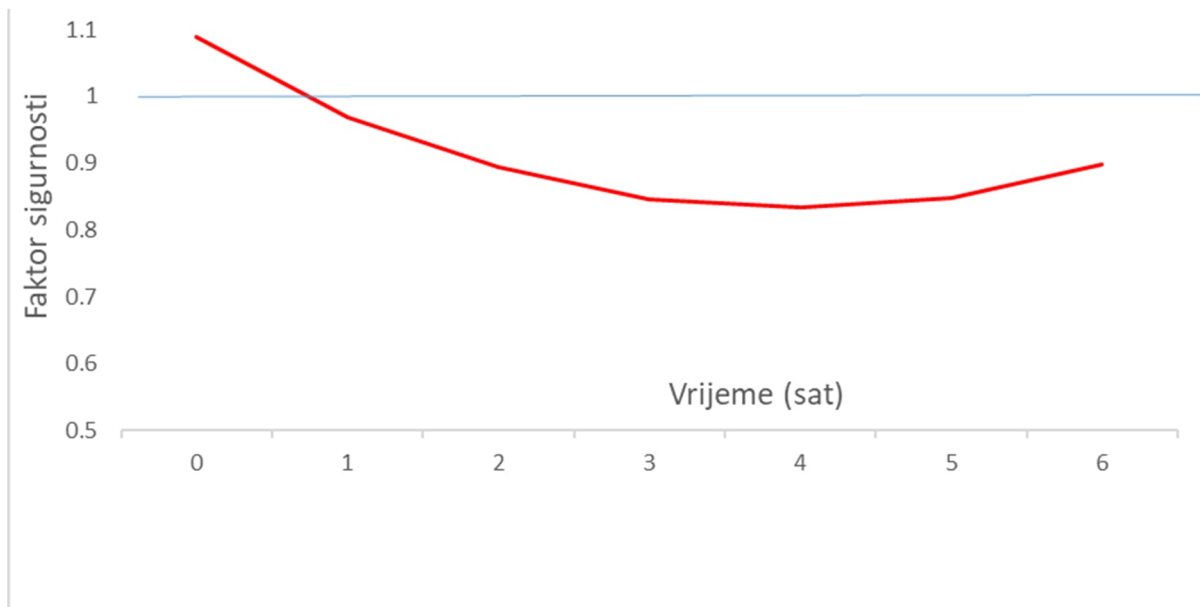
Slika 39 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – završetak crpljenja – proračunska situacija

1

Nakon što su definirani uvjeti vode, prelazi se na proračunski modul za analizu stabilnosti kosine, te uz odabranu Morgensten-Price metodu, preuzete porne tlakove iz analize procjeđivanja, te metodu odabira kliznih ploha *grid and radius*, uz opciju optimizacije kritične klizne plohe. Faktor sigurnosti nakon završetka crpljenja je iznosio  $F_s = 0.898$  (slika 40), a promjena faktora sigurnosti nakon svakog sata crpljenja je prikazana na slici 41.



Slika 40 Izlazni rezultat analize stabilnosti- faktor sigurnosti nakon završetka crpljenja – proračunska situacija 1



Slika 41 Promjena faktora sigurnosti prilikom crpljenja – proračunska situacija 1

Vidljivo je da faktor sigurnosti poprima vrijednosti manje od 1 već nakon prvog sata crpljenja, što dovodi do nestabilnosti pokosa vrtače. Nestabilnost pokosa i urušavanje je i dokumentirano in-situ na vrtači S001. Prilikom probnog crpljenja, a za potrebe radova

sanacije, došlo je do pojave pukotina pri dnu vrtače (slika 42), a nakon toga, odmah nakon crpljenja, posljedično je došlo do formiranja klizne plohe i klizanja kliznog tijela. (slika 43).



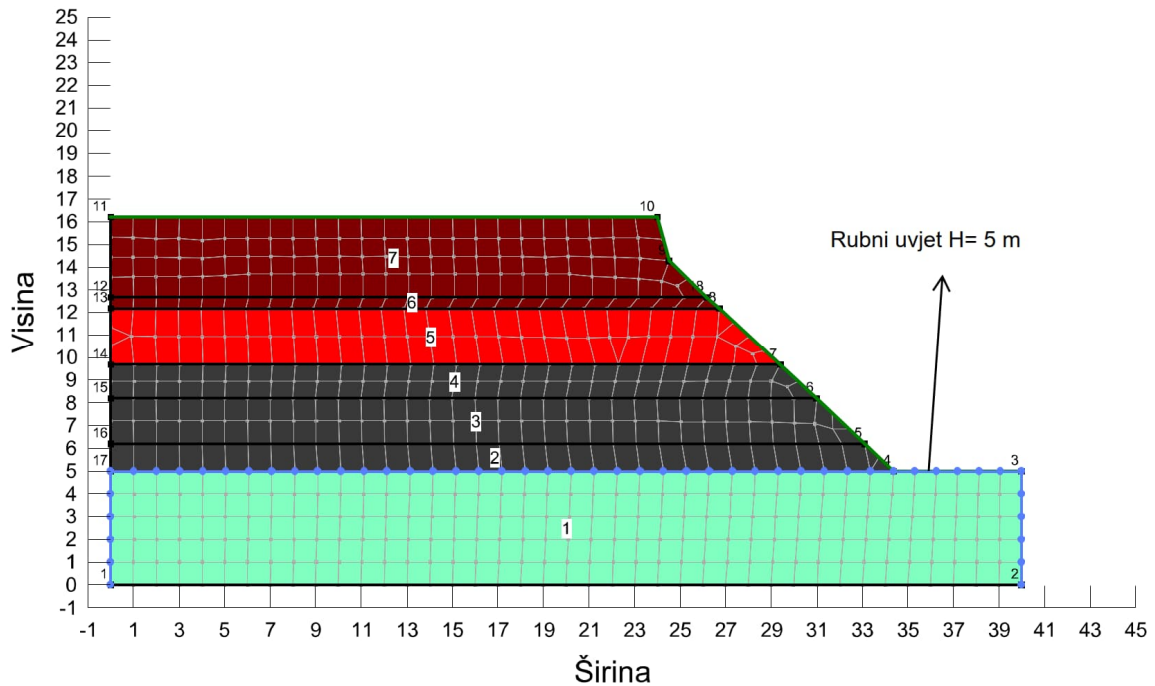
Slika 42 Crpljenje vode iz urušne vrtače S001 - 27.10.2022. (Izvor: [14])



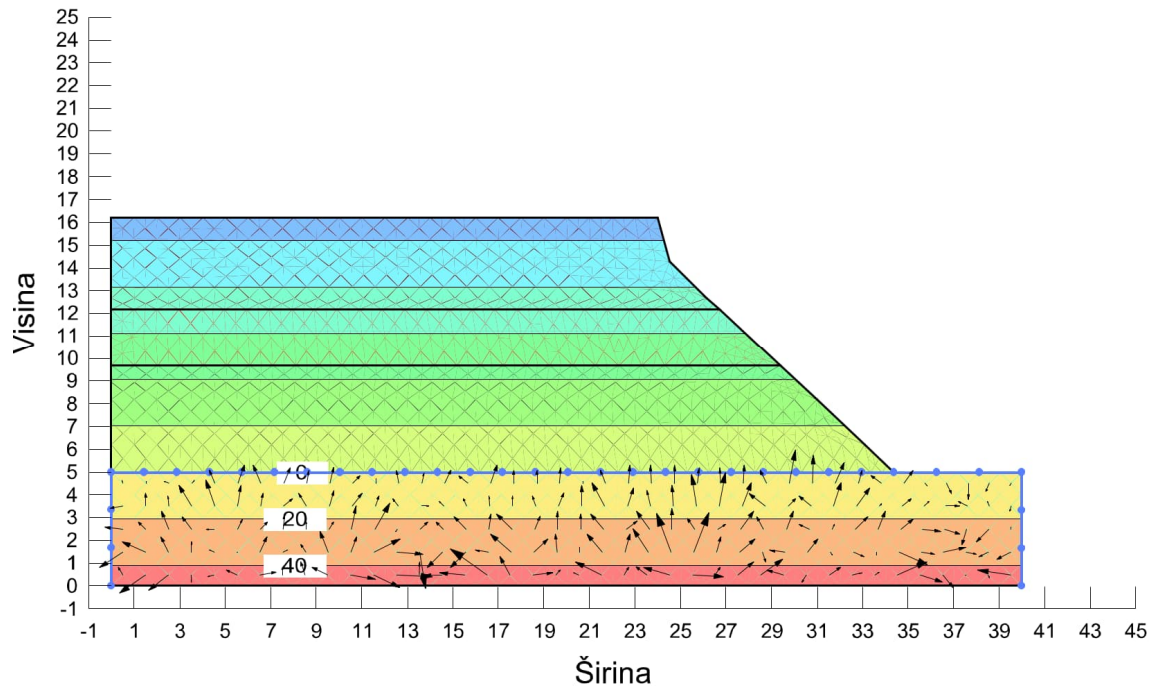
Slika 43 Urušavanje pokosa vrtače S001 - 23.11.2022. (Izvor: [14])

### 5.3.2 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je razina vode na dnu vrtače – proračunska situacija 2

U proračunskom modulu za analizu procjeđivanja definiran je rubni uvjet koji predstavlja razinu podzemne vode na dnu vrtače (slika 44). Na slici 45 je prikazan izlazni rezultat analize procjeđivanja.

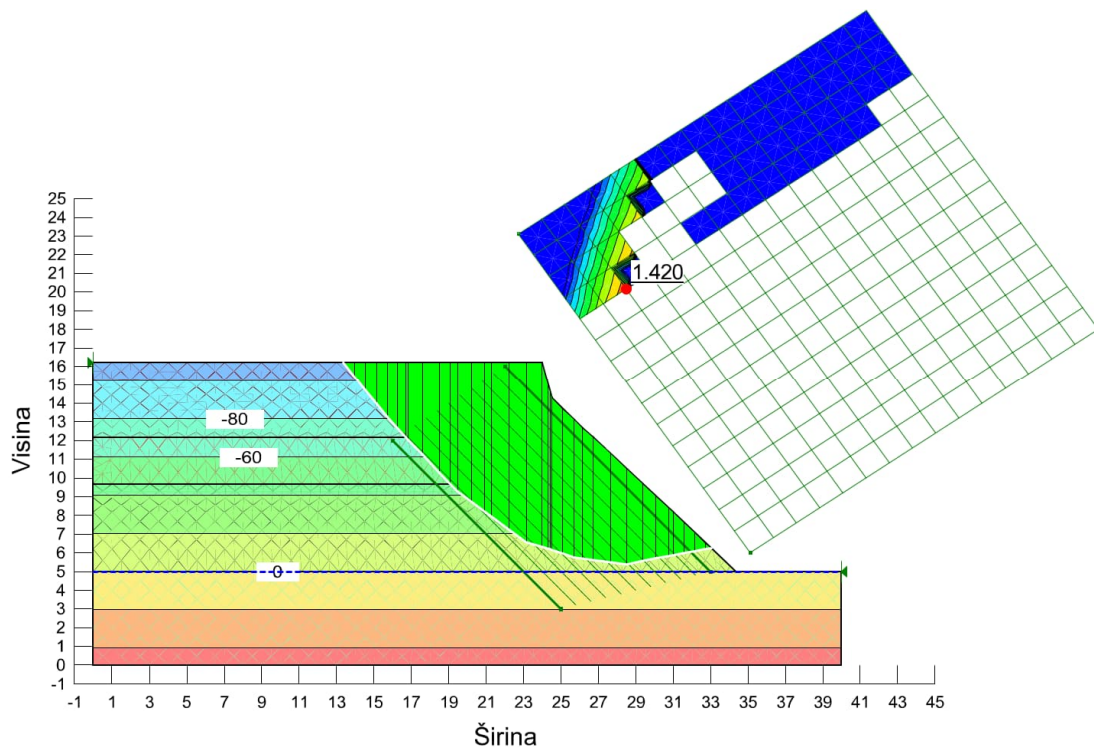


Slika 44 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 2



Slika 45 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – proračunska situacija 2

Shodno tome, pod istim općim uvjetima proračuna kao u proračunskoj situaciji 1, pokreće se analiza stabilnosti kosine uz prethodno preuzete uvjete pornih pritisaka iz analize procjeđivanja, a izlazni rezultat analize je faktor sigurnosti  $F_s = 1.420$  (slika 46).



Slika 46 Izlazni rezultat analize stabilnosti kosine – proračunska situacija 2

### 5.3.3 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je razina vode na dnu vrtače uz utjecaj oborina – proračunska situacija 3

U ovom poglavlju analiziran je utjecaj oborina na stabilnost pokosa urušne vrtače. Uz početne rubne uvjete kao u analizi 2 dodan je rubni uvjet koji predstavlja kišu. Analizirana su četiri različita slučaja:

- Petodnevna kiša od 20 mm/dan
- Petodnevna kiša od 40 mm/dan
- Petodnevna kiša od 80 mm/dan
- Desetodnevna kiša od 253.6 mm (prema podacima Državnog Hidrometeorološkog Zavoda u rujnu 2022. godine, na mjernoj stanici Sisak je izmjereno 253.6 mm kiše, te je zbog nedostatka podataka na razini dana ugrubo pretpostavljeno da je sva kiša pala 10 dana zaredom, a raspodjela oborinskog događaja je pretpostavljena prema funkciji danoj na slici 49)

Rubni uvjet koji simulira oborine zadan je preko opcije protok vode (*water flux*). Kako se u korištenom programu za analizu (Geostudio) protok vode zadaje u mjernoj jedinici  $m^3/s/m^2$  radi lakšeg razumijevanja prikazana je jednadžba pretvorbe u mm/dan:

$$1 m^3/s/m^2 = 1 m/s$$

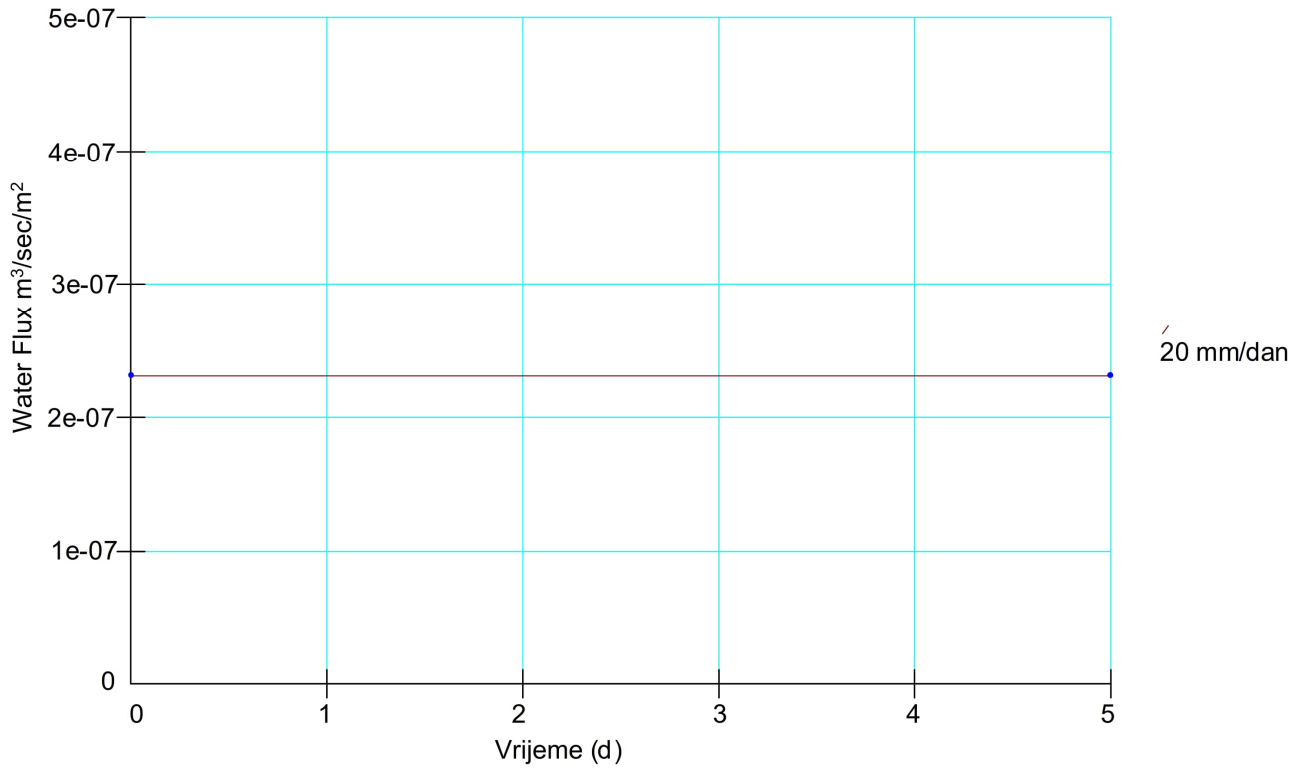
$$1 m/s = 1000 mm/s$$

$$1000 mm/s \times 86.400 s/dan = 86.400.000 mm/dan$$

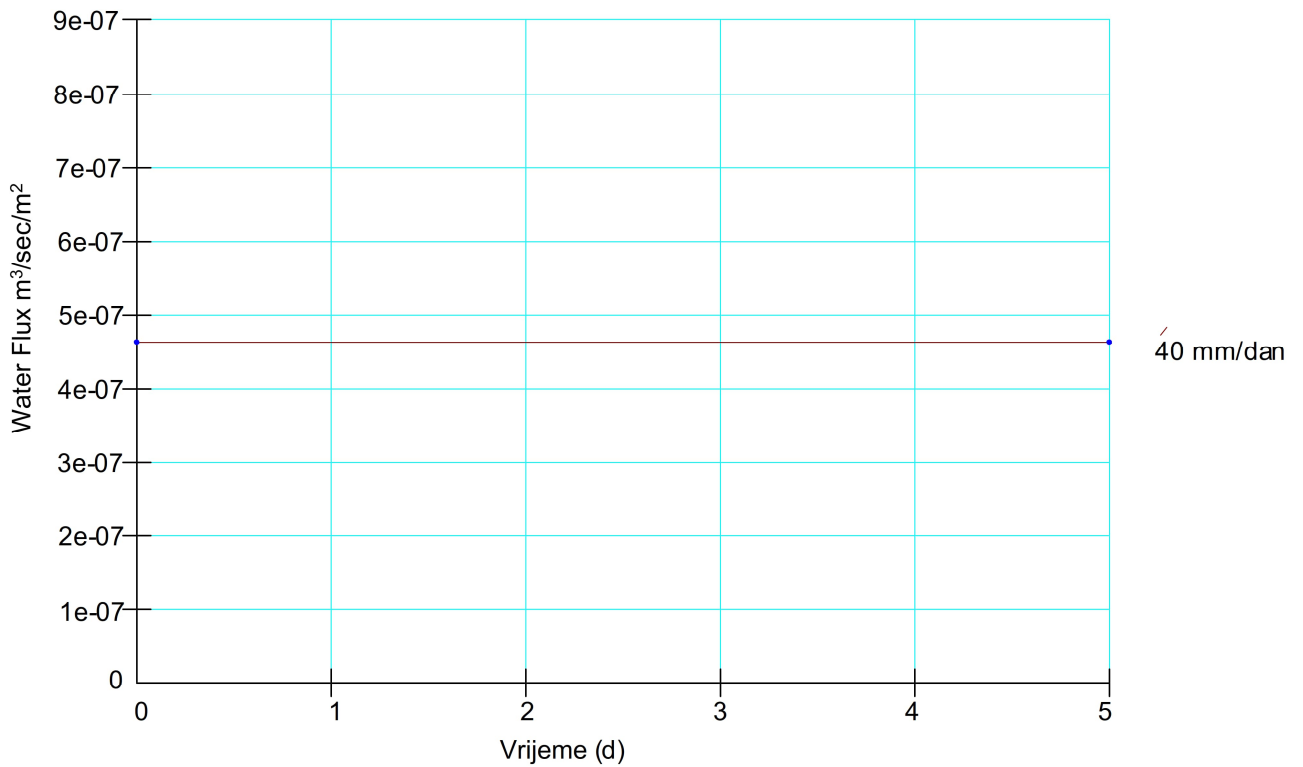
Dakle  $1 m^3/s/m^2$  odgovara 86.400.000 mm/dan. U tablici 4 su prikazane vrijednosti u obje mjerne jedinice, a na slikama 47, 48, 49 i 50 možete vidjeti funkciju kojom se definira rubni uvjet za pojedini slučaj.

Tablica 5 Pretvorba iz mm/dan u  $m^3/s/m^2$

|             |                                 |
|-------------|---------------------------------|
| 20 mm/dan   | $2.31 \times 10^{-7} m^3/s/m^2$ |
| 40 mm/dan   | $4.63 \times 10^{-7} m^3/s/m^2$ |
| 80 mm/dan   | $9.26 \times 10^{-7} m^3/s/m^2$ |
| 25.4 mm/dan | $2.93 \times 10^{-7} m^3/s/m^2$ |

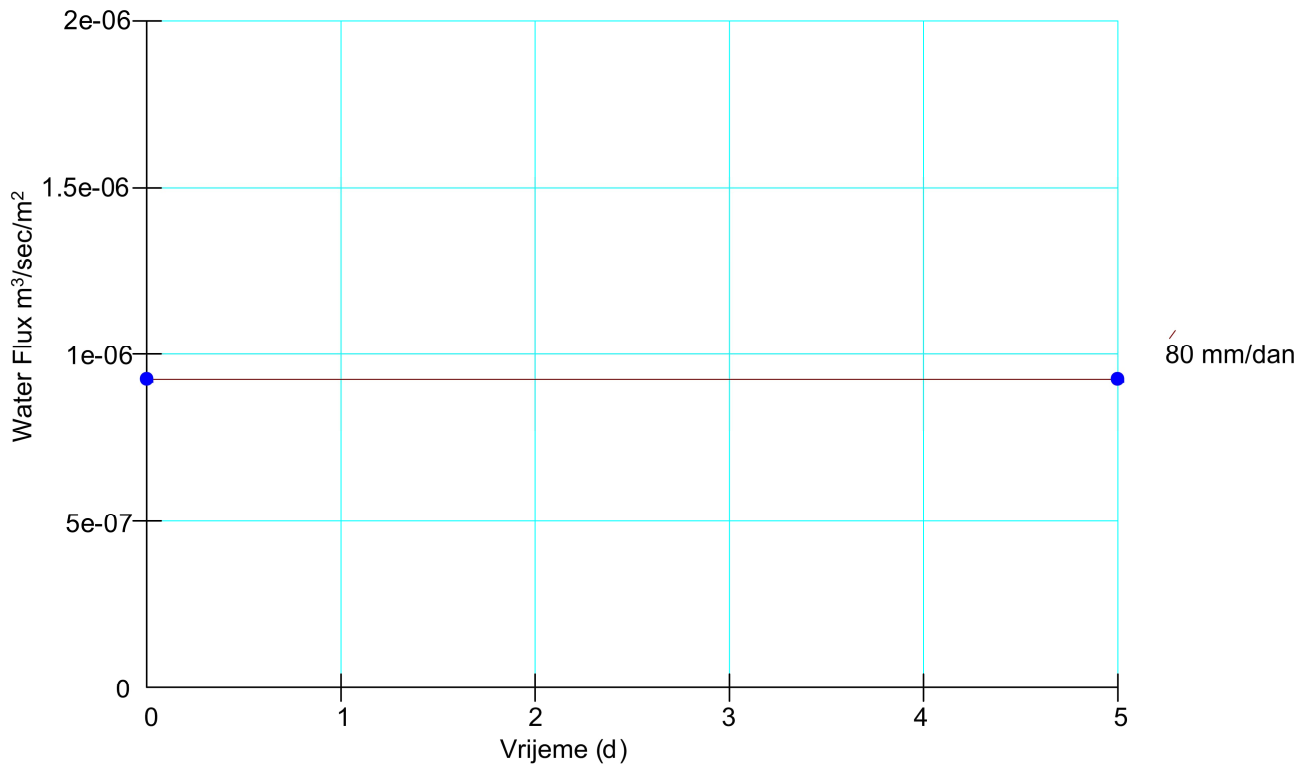


Slika 47 Definiranje rubnog uvjeta petodnevnu kišu od 20 mm/dan

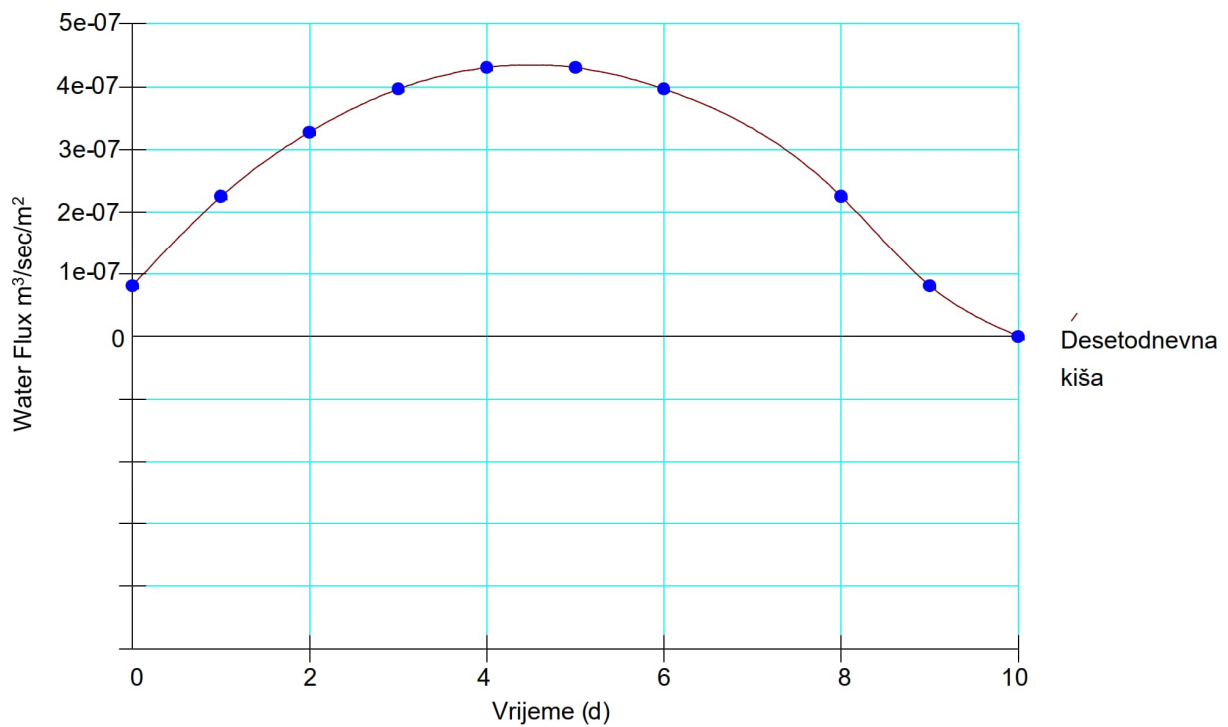


Slika 48 Definiranje rubnog uvjeta petodnevnu kišu od 40 mm/dan



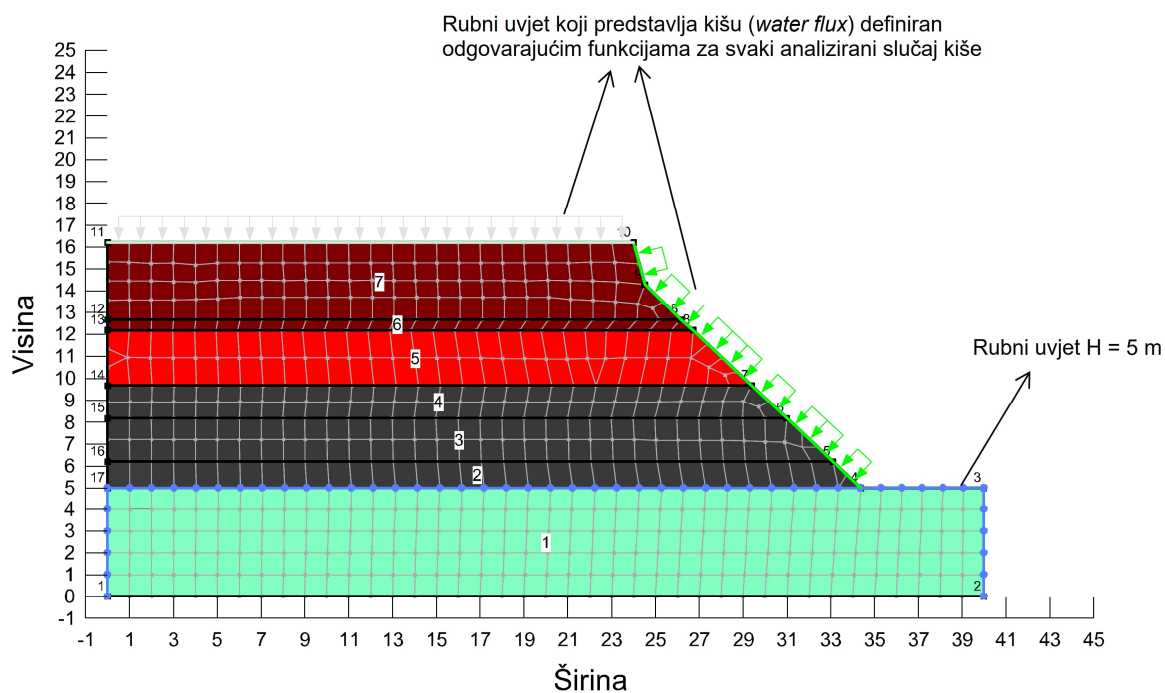


Slika 49 Definiranje rubnog uvjeta za petodnevnu kiša od 80 mm/dan



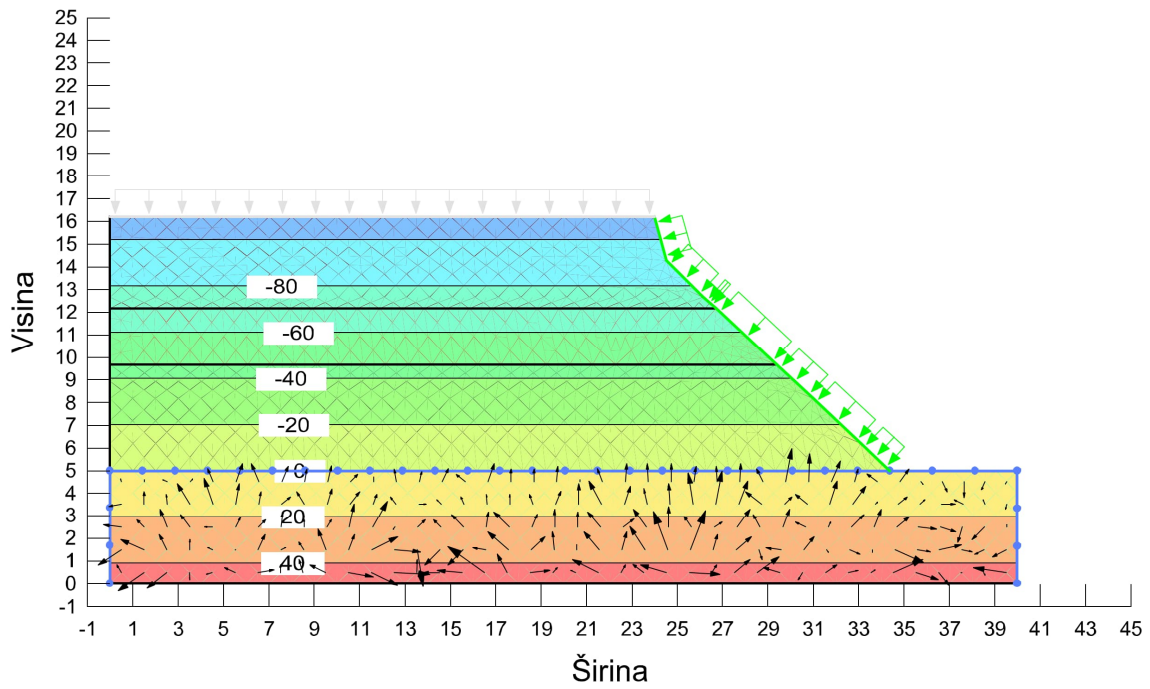
Slika 50 Definiranje rubnog uvjeta za desetodnevnu kišu

Rubni uvjet po pokosu vrtače je prilagođen činjenici da oborine padaju okomito na pokos. Na slici 51 je prikazan model sa zadanim rubnim uvjetima za analizu procjeđivanja.



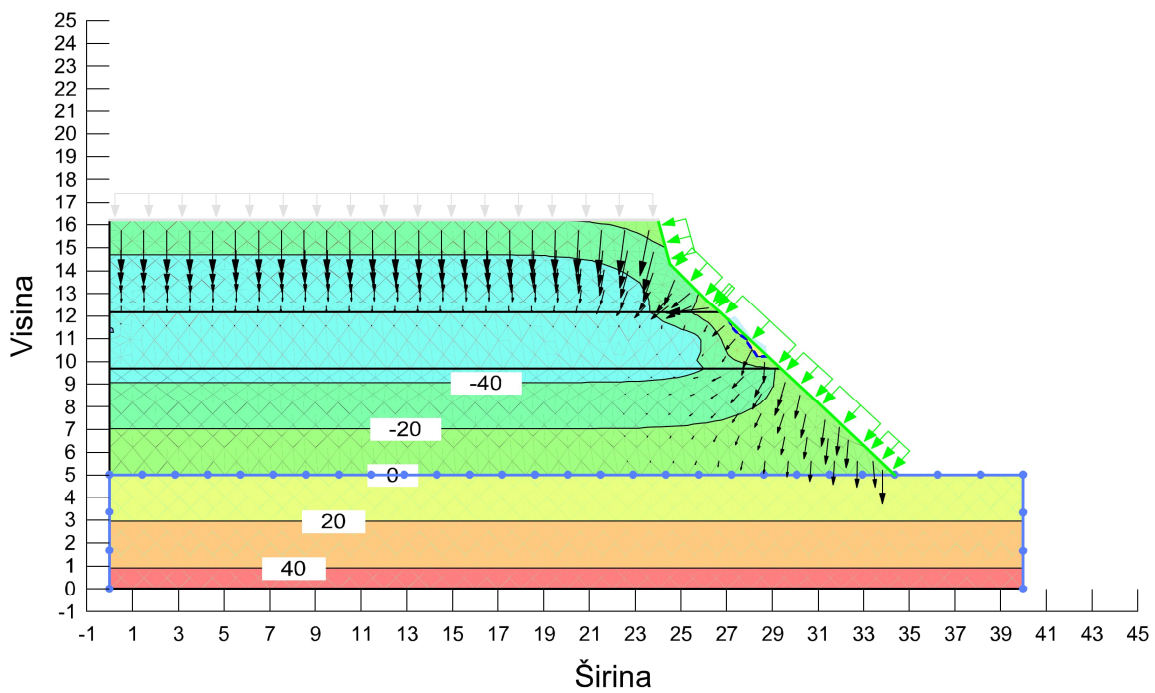
Slika 51 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 3

Na slici 52 je prikazan izlazni rezultat analize procjeđivanja u početnom trenutku (prije početka oborina, dakle isti je za svaku od provedenih analiza za različite količine oborine).

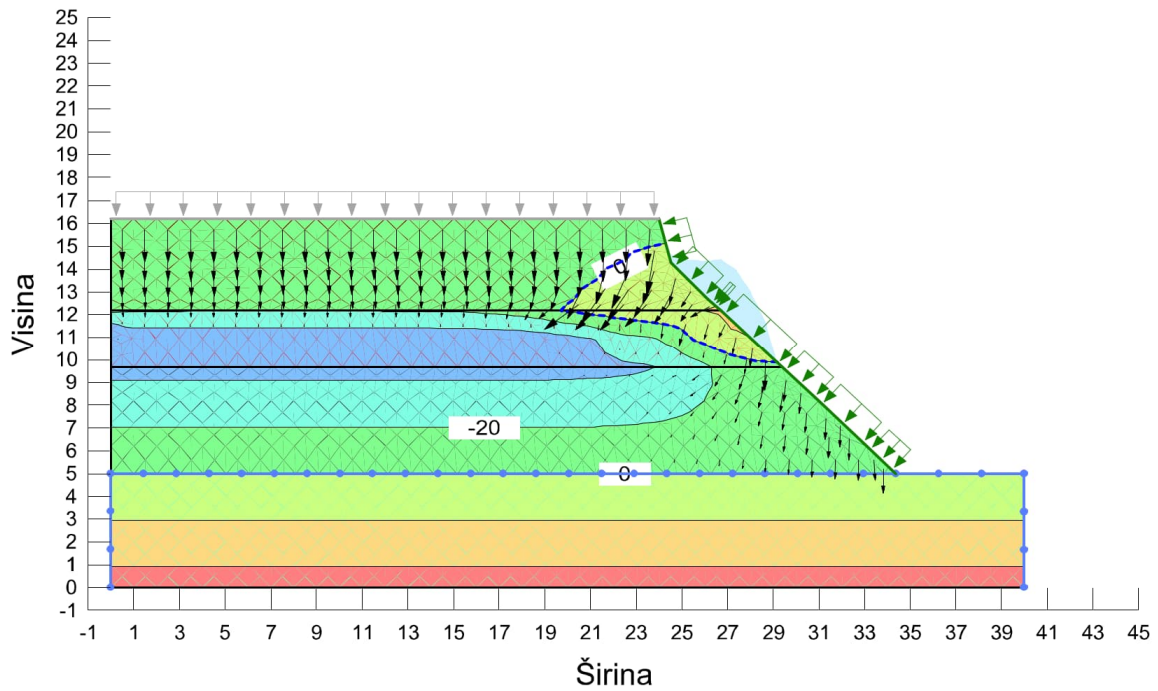


Slika 52 Izlazni rezultat analize procjeđivanja u početnom trenutku – proračunska situacija 3

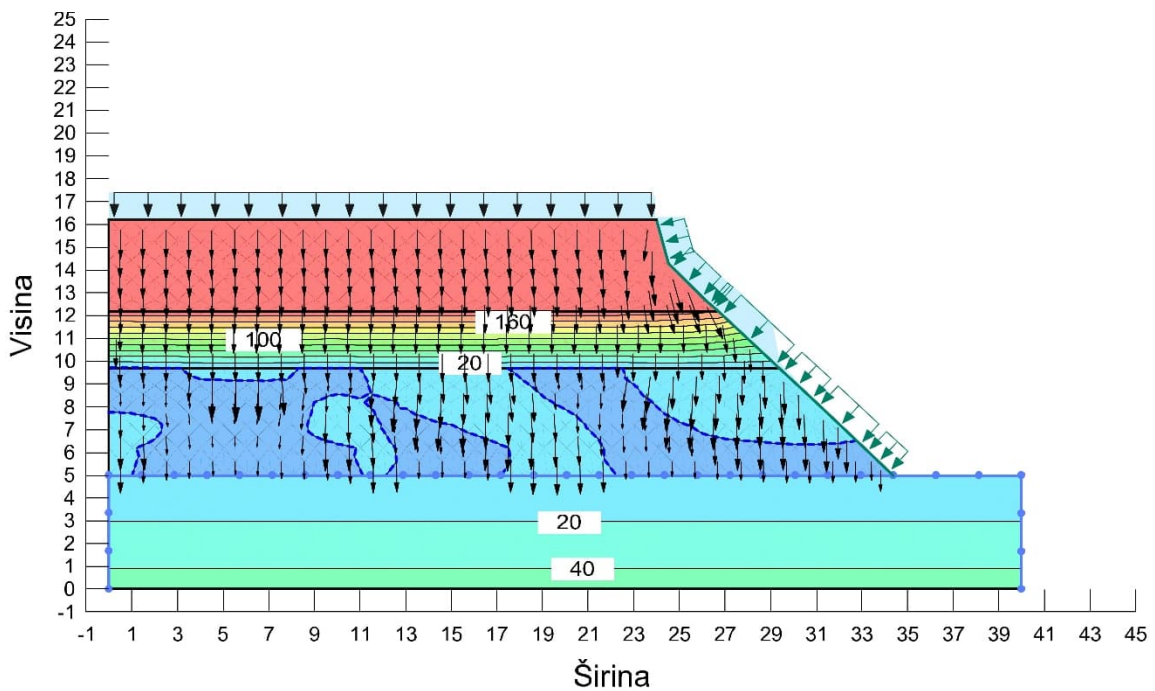
Na slikama 53, 54, 55 i 56 je prikazan izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja.



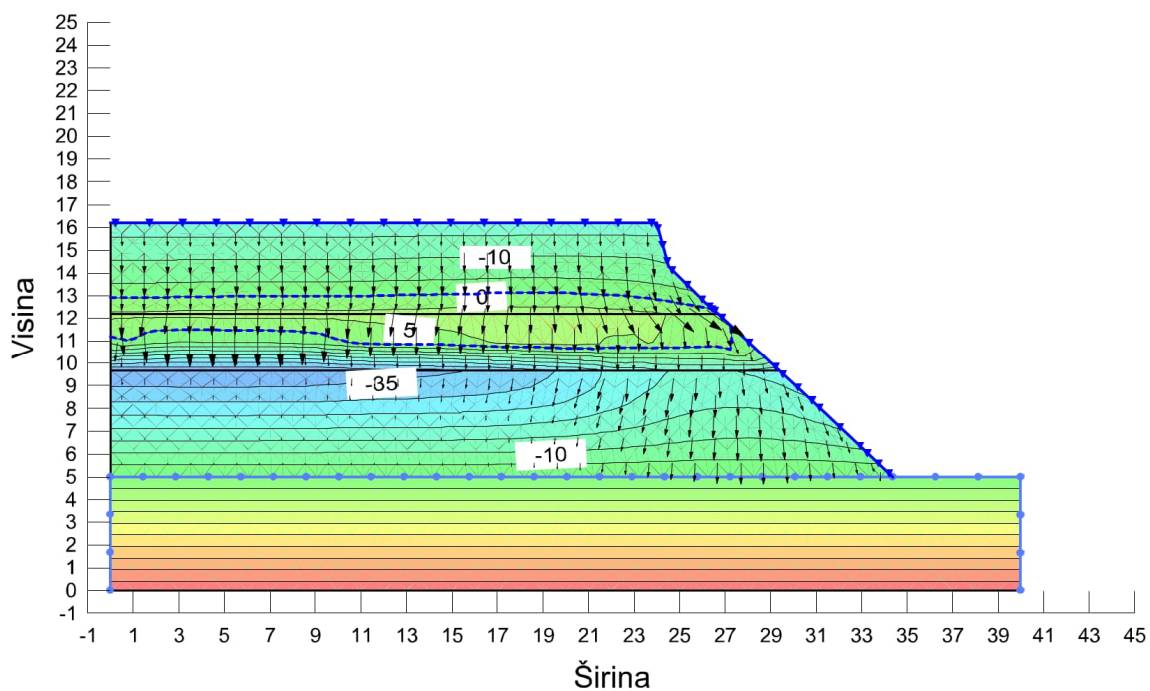
Slika 53 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za kišu 20 mm /dan – proračunska situacija 3a



Slika 54 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za kišu 40 mm/dan – proračunska situacija 3b

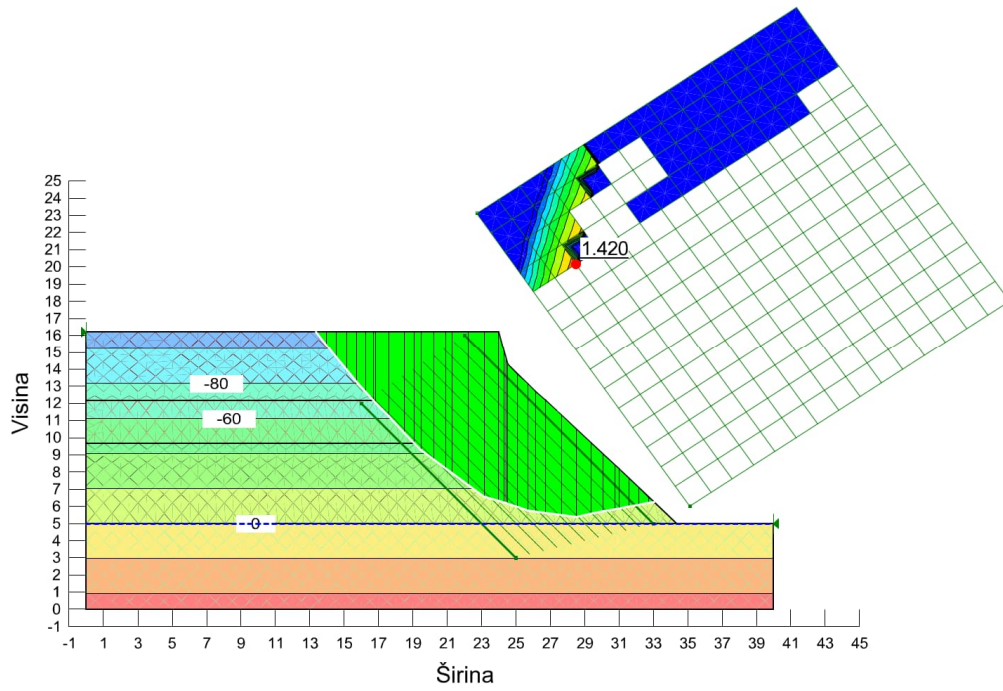


Slika 55 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za kišu 80 mm/dan – proračunska situacija 3c

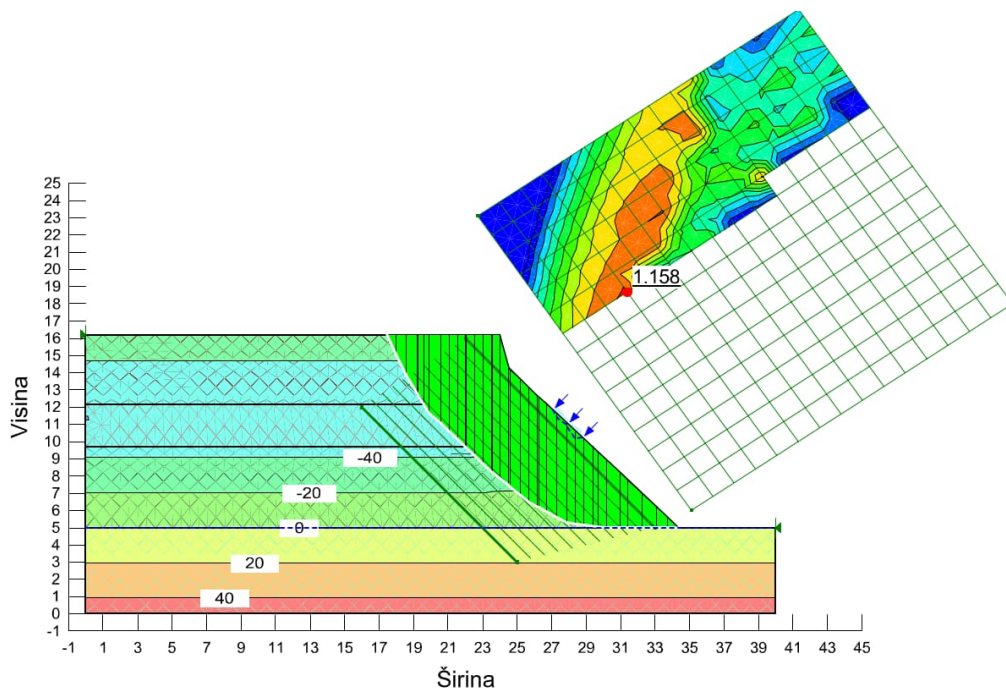


Slika 56 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za desetodnevnu kišu 253.6 mm/10 dana– proračunska situacija 3d

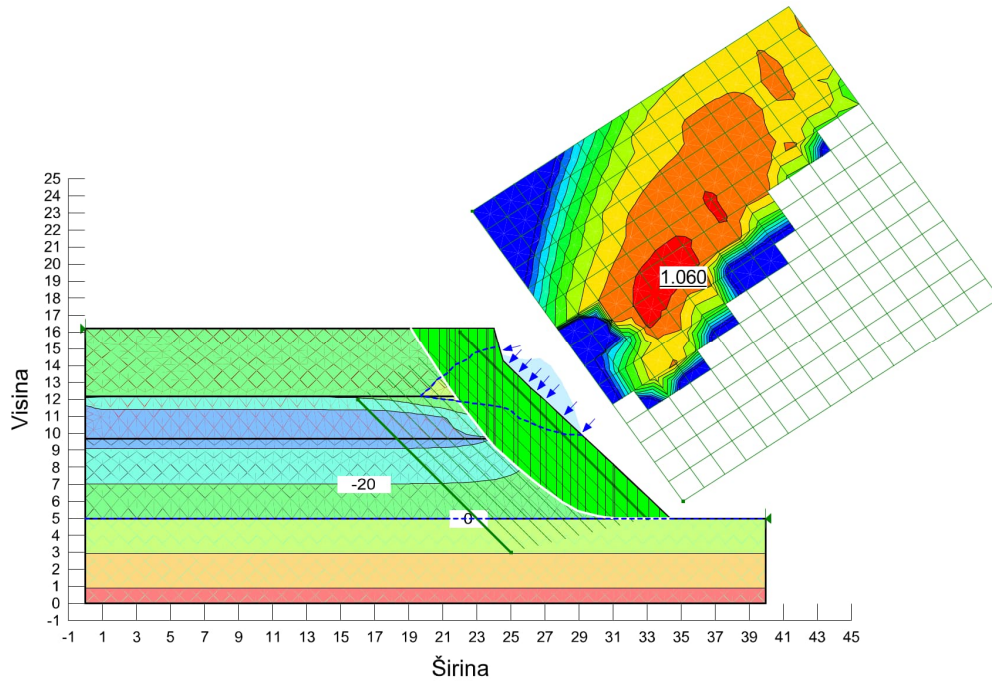
Shodno tome je izvršena analiza stabilnosti pokosa vrtače za sva četiri slučaja, na slici 57. je prikazan izlazni rezultat analize stabilnosti u početnom koraku (prije početka oborina), a na slikama 58, 59, 60, 61 je prikazan izlazni rezultat pri završnom koraku.



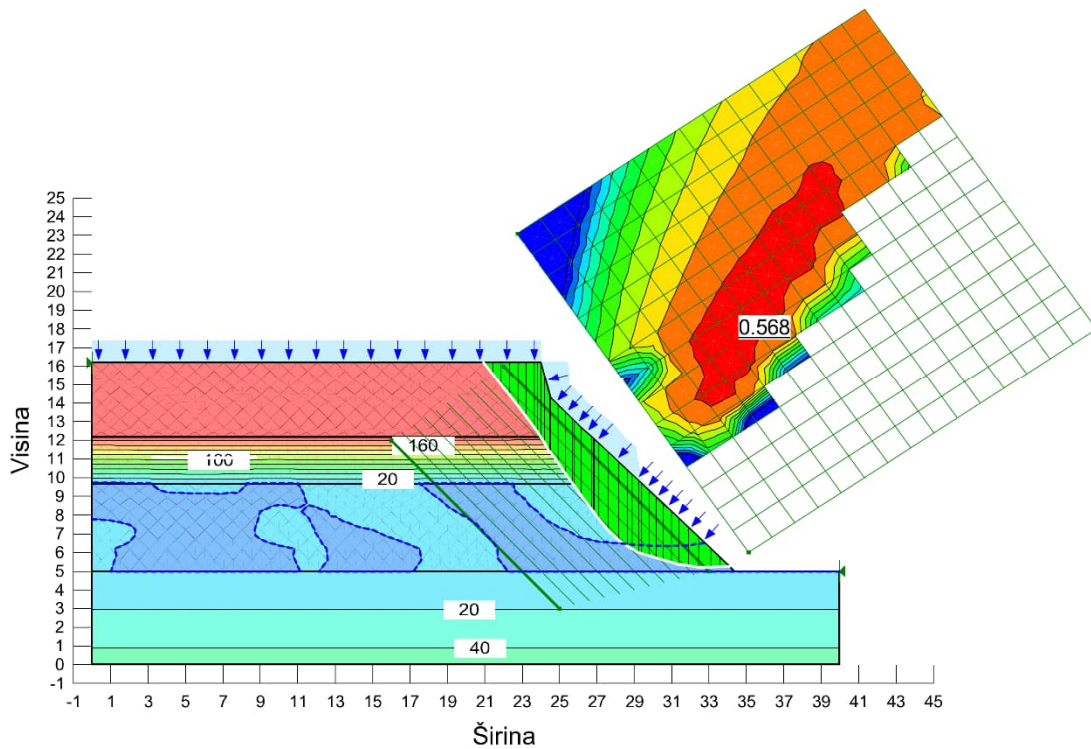
Slika 57 Izlazni rezultat analize stabilnosti u početnom koraku – proračunska situacija 3



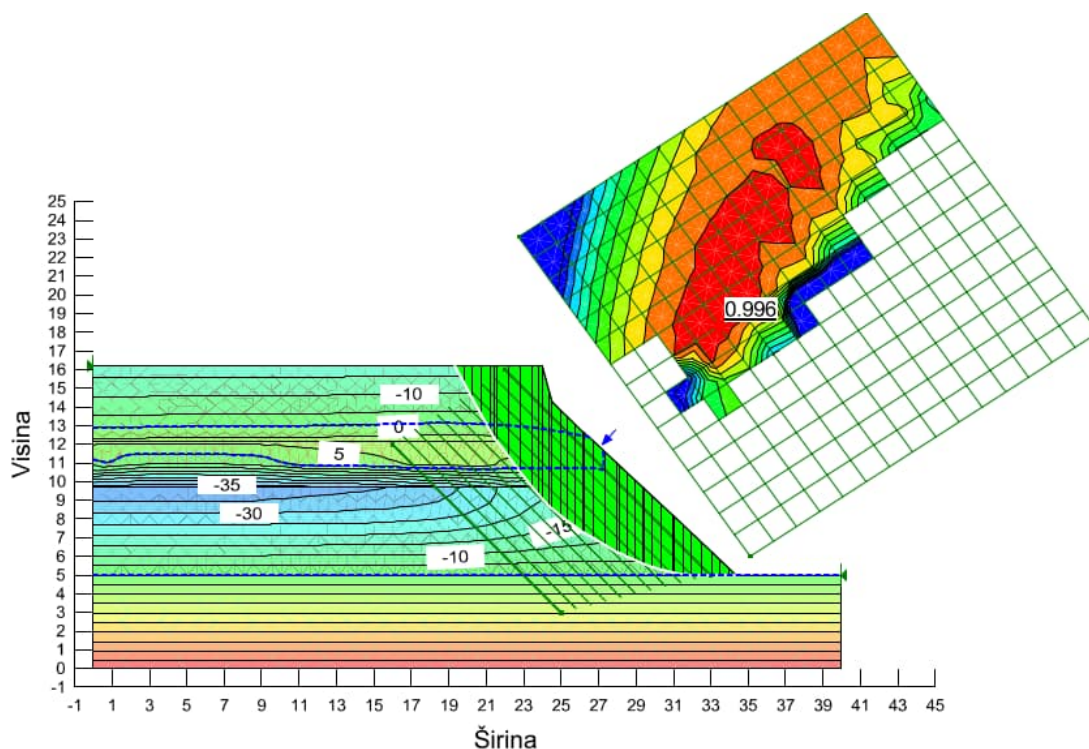
Slika 58 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za kišu 20 mm/dan – proračunska situacija 3a



Slika 59 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za kišu 40 mm/dan – proračunska situacija 3b



Slika 60 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za kišu 80 mm/dan – proračunska situacija 3c



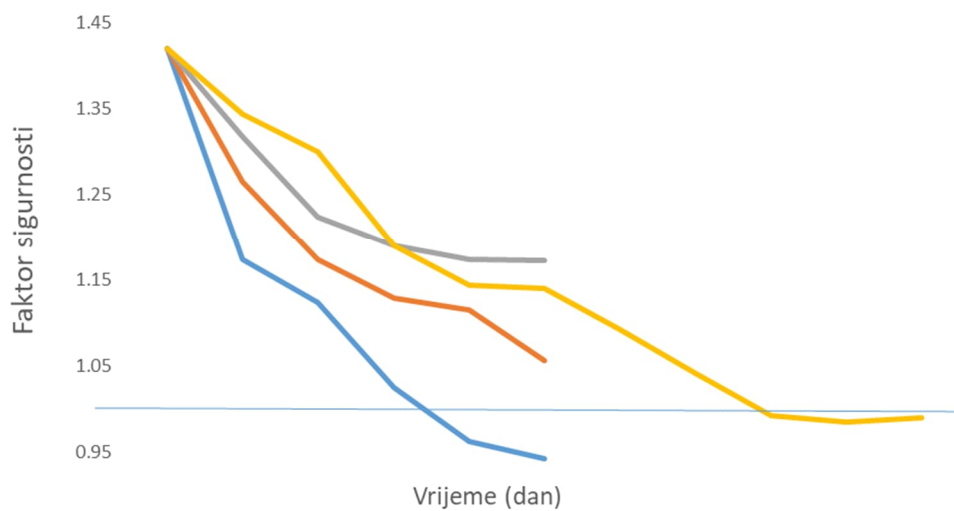
Slika 61 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za desetodnevnu kišu 253.6 mm/ 10 dana – proračunska situacija 3d

Na slici 62 je prikazana usporedba faktora sigurnosti za četiri analizirana slučaja. Vidljivo je da oborine bitno smanjuju faktor sigurnosti kosine, što je i razumljivo, budući da infiltracijom padalina u tlo, raste stupanj saturacije tla, samim tim smanjuje se pozitivan utjecaj negativnog tlaka vode na stabilnost kosine. Dolazi do porasta pornih tlakova (što je jasno vidljivo iz prethodno provedenih analiza procjeđivanja). Porastom pornih tlakova direktno se smanjuju efektivna naprezanja, a efektivna naprezanja smanjuju posmičnu čvrstoću tla koja direktno utječe na stabilnost same kosine.

Sa slike 62, također možemo vidjeti kako je kosina postala nestabilna u uvjetima jake kiše nakon 3 dana (80 mm/dan). Kosina je također postala nestabilna nakon osmog dana pri dugotrajnijoj kiši (10 dana) slabijeg intenziteta (253.6 mm/10 dana).



Usporedba faktora sigurnosti obzirom na količinu kiše



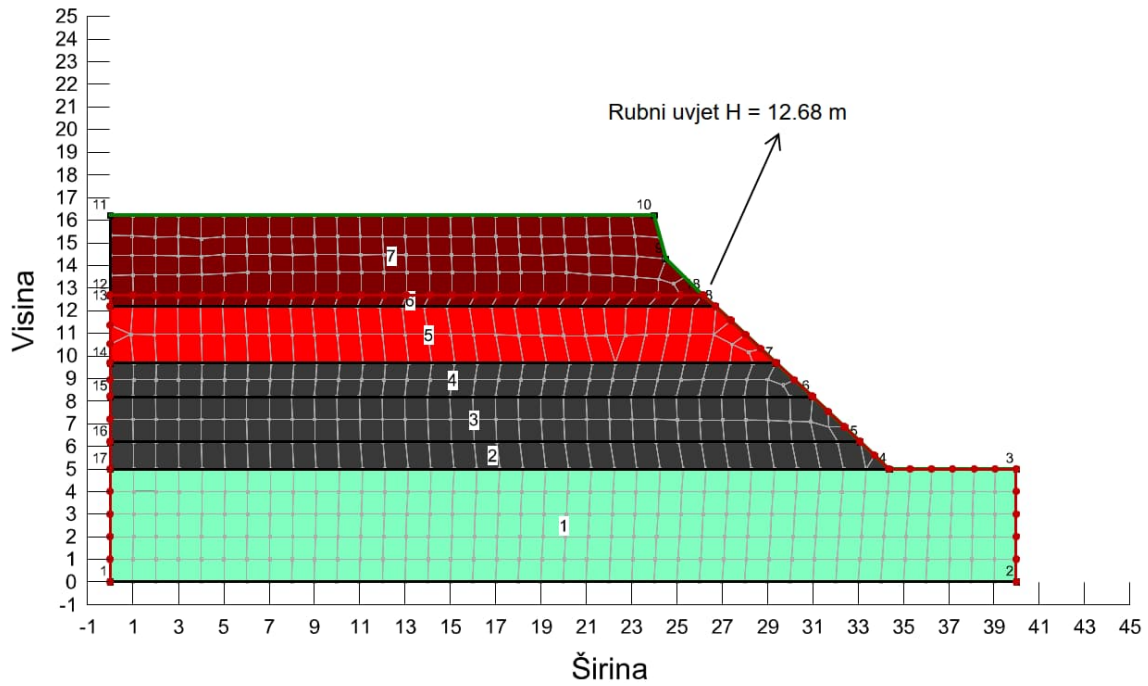
|  | 0    | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6    | 7    | 8    | 9    | 10   |
|--|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| — Faktor sigurnosti (80mm/dan)         | 1.42 | 1.17 | 1.12 | 1.03 | 0.96 | 0.94 |      |      |      |      |      |
| — Faktor sigurnosti (40mm/dan)         | 1.42 | 1.27 | 1.17 | 1.13 | 1.11 | 1.06 |      |      |      |      |      |
| — Faktor sigurnosti (20mm/dan)         | 1.42 | 1.32 | 1.22 | 1.19 | 1.17 | 1.17 |      |      |      |      |      |
| — Faktor sigurnosti (253.6 mm/10 dana) | 1.42 | 1.34 | 1.30 | 1.19 | 1.14 | 1.14 | 1.09 | 1.04 | 0.99 | 0.98 | 0.99 |

— Faktor sigurnosti (80mm/dan)      — Faktor sigurnosti (40mm/dan)  
 — Faktor sigurnosti (20mm/dan)      — Faktor sigurnosti (253.6 mm/10 dana)

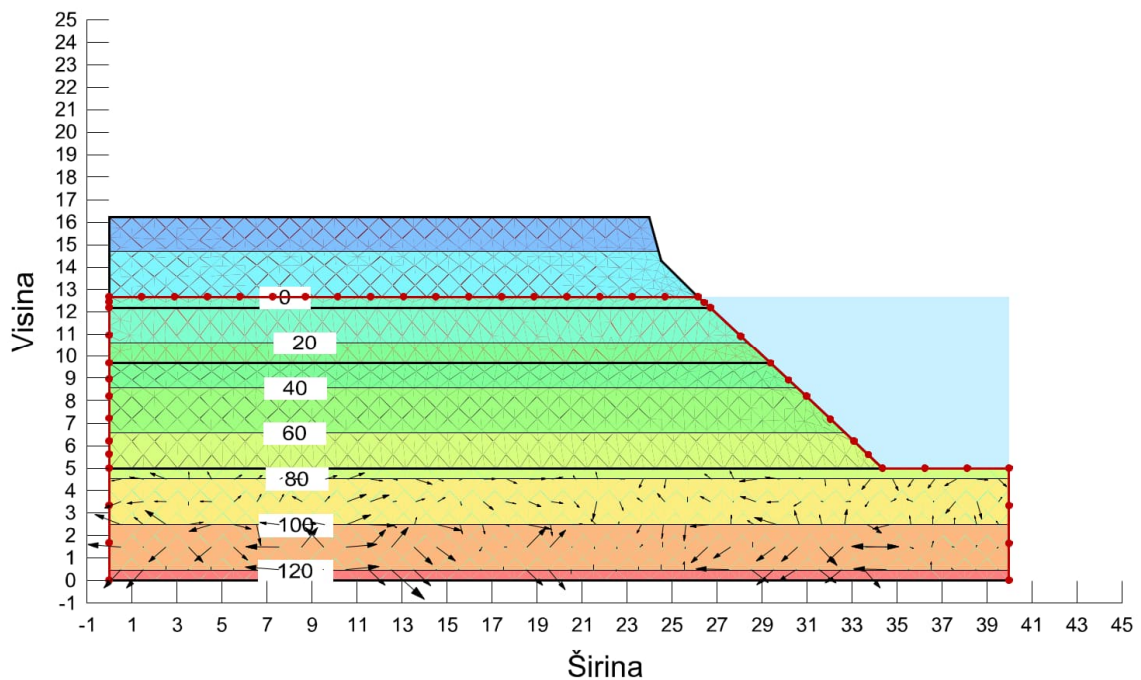
Slika 62 Usporedba faktora sigurnosti svih analiziranih slučajeva – proračunska situacija 3

### 5.3.4 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je razina vode 3.6 m od vrha vrtače – proračunska situacija 4

U analizi procjeđivanja definiran je rubni uvjet koji predstavlja razinu podzemne vode 3.6 m od vrha vrtače (razina vode je 7.68 m od dna vrtače) (slika 63). Na slici 64 je prikazan izlazni rezultat analize procjeđivanja za zadani rubni uvjet.

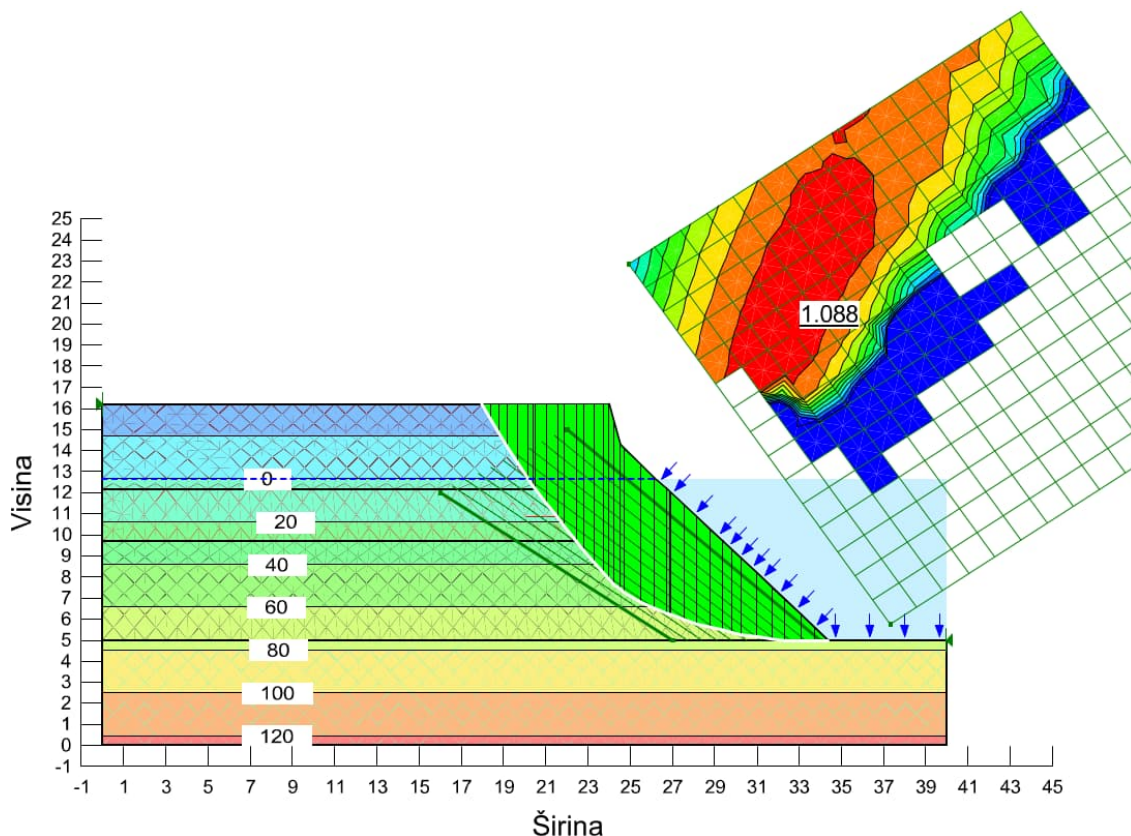


Slika 63 Definiranje modela za analizu procjeđivanja - proračunska situacija 4



Slika 64 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – proračunska situacija 4

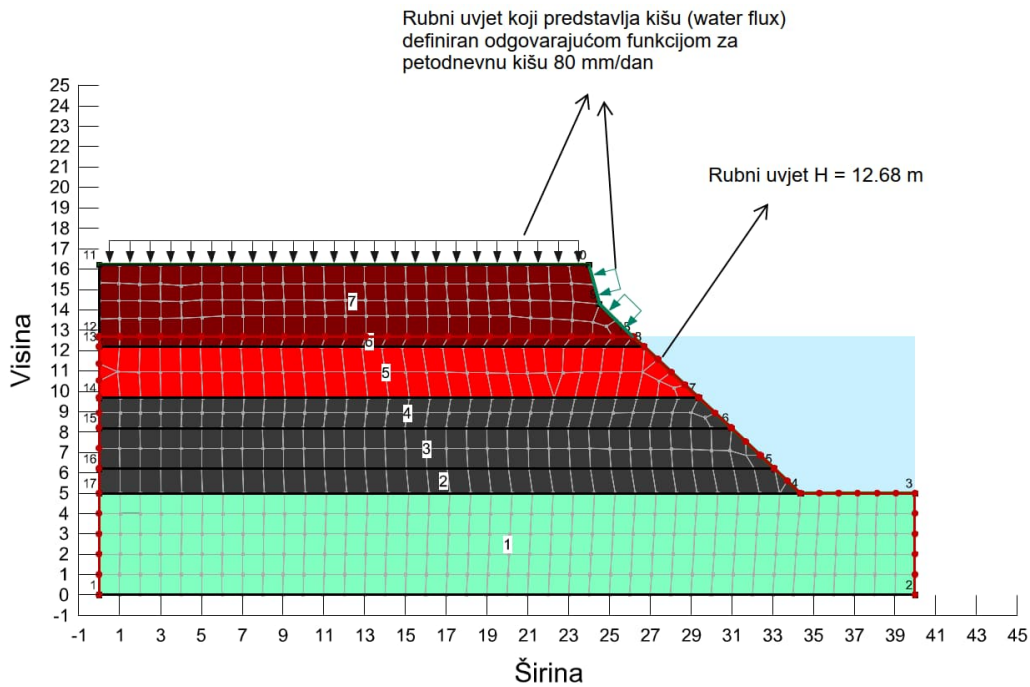
Nakon analize procjeđivanja, pokreće se analiza stabilnosti kosine, pod istim uvjetima kao u prethodnim analizama uz preuzete uvjete pornih pritisaka iz analize procjeđivanja, a izlazni rezultat analize je faktor sigurnosti  $F_s = 1.088$  (slika 65).



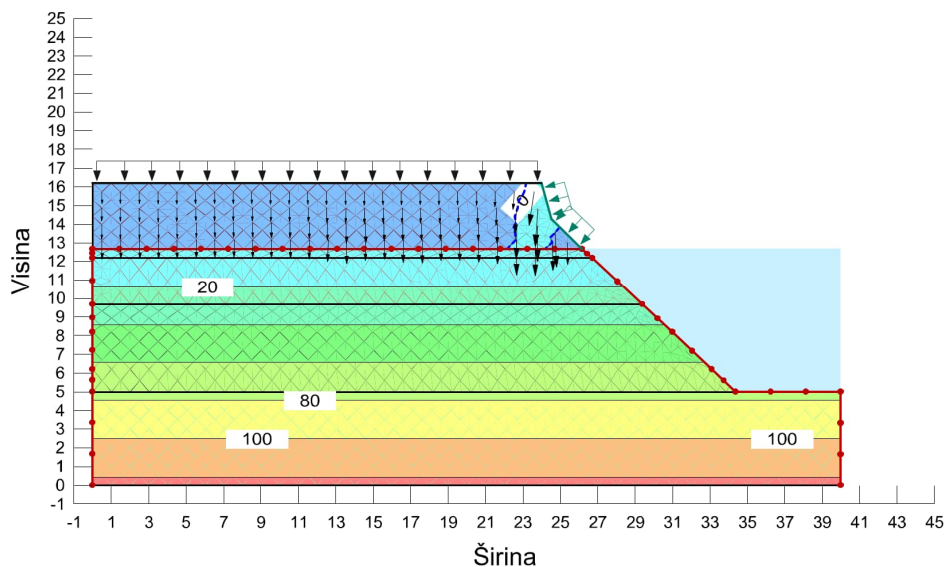
Slika 65 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – proračunska situacija 4

5.3.5 Analiza procjeđivanja i analiza stabilnosti pokosa kada je vrtača ispunjena vodom (razina vode 3.6 m od vrha vrtače) uz utjecaj petodnevne oborine od 80 mm/h – proračunska situacija 5

Uz definirane rubne uvjete kao u proračunskoj situaciji 4, dodan je rubni uvjet koji simulira petodnevnu kišu od 80 mm/dan (funkcija rubnog uvjeta definirana u analizi 3) (slika 66), a izlazni rezultat analize procjeđivanja je prikazan na slici 67.

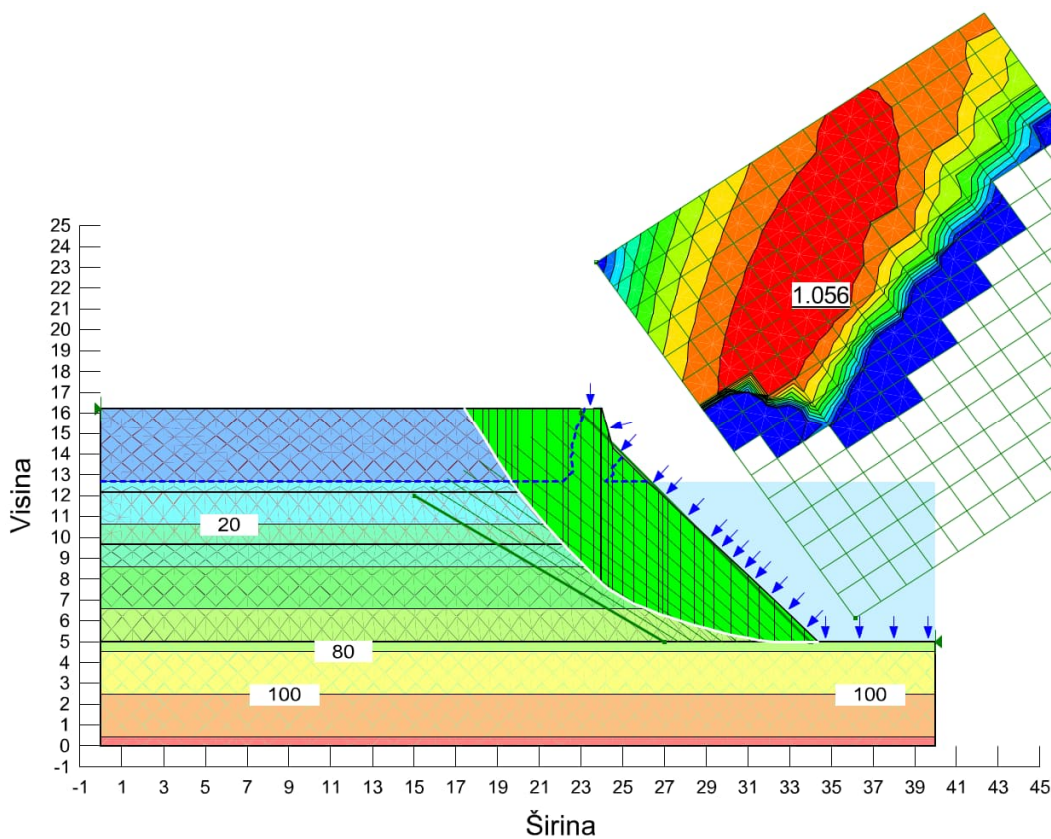


Slika 66 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 5



Slika 67 Izlazni rezultati analize procjeđivanja u završnom koraku – proračunska situacija 5

Analiza stabilnosti pri početnom koraku (prije početka kiše) identična je kao u proračunskoj situaciji 4, a faktor sigurnosti pri završnom koraku iznosi  $F_s=1.056$  (slika 68). Može se zaključiti da nije došlo do bitne promjene faktora sigurnosti, zbog toga što je tlo već potpuno saturirano, te ne dolazi do bitnih promjena pornih tlakova, a posljedično ne dolazi do bitnih promjena efektivnih naprezanja, kao ni posmične čvrstoće tla.



Slika 68 Izlazni rezultat analize stabilnost u završnom koraku – proračunska situacija 5

#### 5.4 Rekapitulacija faktora sigurnosti po svim proračunskim situacijama

U tablici 6 se nalazi rekapitulacija faktora sigurnosti analize stabilnosti pokosa vrtače, po svim proračunskim situacijama, s naglaskom da su uvršteni faktori sigurnosti za završni korak svake analize.

Tablica 6 Rekapitulacija faktora sigurnosti po proračunskim situacijama

| Proračunska situacija | Opis situacije  | Faktor sigurnosti |
|-----------------------|---|-------------------|
| 1                     | Stabilnost pokosa prilikom crpljenja vode do dna vrtače   | 0.9               |
| 2                     | Stabilnost pokosa kada je razina vode na dnu vrtače   | 1.42              |
| 3                     | a<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj petodnevne kiše od 20 mm/dan                                   | 1.16              |
|                       | b<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj petodnevne kiše od 40 mm/dan                                   | 1.06              |
|                       | c<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj petodnevne kiše od 80 mm/dan                                   | 0.57              |
|                       | d<br>Stabilnost pokosa kada je razine vode na dnu vrtače + utjecaj desetodnevne kiše od ukupno 253.6 mm                           | 0.99              |
| 4                     | Stabilnost pokosa kada je vrtača ispunjena vodom (razina vode na 3.6 m ispod površine tla)  | 1.09              |
| 5                     | Stabilnost pokosa kada je vrtača ispunjena vodom (razina vode na 3.6 m ispod površine tla) + utjecaj petodnevne kiše od 80 mm/dan | 1.07              |

## 6. ZAKLJUČAK

Urušne vrtače kao jedan od najrasprostranjenijih i najpoznatijih oblika krša, predstavlja najopasniji geohazard u kršu. Rasprostranjenost krške morfologije uvjetovala je samim tim i rasprostranjenost urušnih vrtača svuda po svijetu, te tako kroz povijest, a i sadašnjost imamo otvaranje velikih broja urušnih vrtača, od kojih su se neke otvorile i ispod zgrada i infrastrukturnih objekata. Pojavnost urušnih vrtača ne treba shvatiti kao proces koji se događa isključivo djelovanjem prirodnih procesa. Čovjek također utječe na pojavnost urušnih vrtača, te može biti okidač za aktiviranje istih, npr. crpljenjem podzemne vode, uklanjanjem vegetacije, podzemnim miniranjima, gradnjom građevina na krovnom luku urušne vrtače, podzemnim iskopima koji uzrokuju dinamičko opterećenje i slično.

Nakon razornog potresa u Petrinji u prosincu 2020. godine, koji je poslužio kao okidač za otvaranje vrtača, zbog same geologije i hidrogeologije područja otvoreno je preko 100 urušnih vrtača na jako malom prostoru, što je prouzrokovalo veliku zainteresiranost, kako javnosti tako i znanstvene zajednice, a neke od njih su bile i prijetnja obiteljskim kućama i stanovnicima direktno. Nakon otvaranja urušnih vrtača, primijećeno je da dolazi do širenja urušnih vrtača, odnosno do urušavanja i klizanja pokosa vrtače. Numeričkim modeliranjem i analizom stabilnosti pokosa vrtače, zaključeno je da je pokos vrtače najstabilniji kada vrtača nije ispunjena vodom, a faktor sigurnosti iznosi  $F_s = 1.42$ . Nešto manji faktor sigurnosti, od  $F_s = 1.06$  javlja se pri uvjetima kada je vrtača ispunjena vodom, ali naglim sniženjem vode u vrtači (crpljenjem) faktor sigurnosti pada ispod 1. Nakon simuliranih šest sati crpljenja do smanjenja razine vode do dna vrtače, proračunati faktor sigurnosti iznosio je  $F_s = 0.9$ . Zaključeno je također da na pokos vrtače, kada je ispunjena vodom, oborine nemaju značajan utjecaj na faktor sigurnosti. Analiziranjem utjecaja oborina na vrtaču kada je razina vode na dnu vrtače, zaključeno je da kratkotrajne ekstremne oborine mogu dovesti pokos u fazu nestabilnosti, gdje je za petodnevnu kišu od 80 mm/dan faktor sigurnosti iznosio  $F_s = 0.57$ . Isto tako, može se vidjeti da i dugotrajne oborine, slabijeg intenziteta mogu dovesti pokos vrtače u fazu nestabilnosti, gdje je za desetodnevnu kišu od ukupno 253.6 mm faktor sigurnosti, nakon desetog dana, iznosio  $F_s = 0.99$ .

## POPIS LITERATURE

- [1] Ford D.; Williams P., *Karst Hydrogeology and Geomorphology*, England: John Wiley & Sons Ltd, 2007.
- [2] Palinkaš D., *Opća geologija*, Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, 2014.
- [3] Bačić M.; Kovačević M.Š.; Librić L.; Žužul P., "Sinkholes induced by the Petrinja M6.2 earthquake and guidelines for their remediation," *Proceedings of 1st Croatian Conference on Earthquake Engineering, 1CroCEE, Zagreb, 2021*. [Online]. Available: [https://crocee.grad.hr/event/1/contributions/193/attachments/72/111/015\\_CroCEE\\_ID\\_237.pdf](https://crocee.grad.hr/event/1/contributions/193/attachments/72/111/015_CroCEE_ID_237.pdf) [Accessed: 08.09.2023].
- [4] U.S. Geological Survey. (n.d.). "How much does sinkhole damage cost each year in the United States?" Retrieved from <https://www.usgs.gov/faqs/how-much-does-sinkhole-damage-cost-each-year-united-states> [Accessed: 09/06/2024].
- [5] Gutiérrez F., "Sinkhole Hazards," Department of Earth Sciences, University of Zaragoza, 2016. [Online]. Available: <https://oxfordre.com/naturalhazardscience/display/10.1093/acrefore/9780199389407.01.0001/acrefore-9780199389407-e-40> [Accessed: 10.09.2023].
- [6] Waltham T.; Bell F.; Culshaw M., *Sinkholes and Subsidence: Karst and Cavernous Rocks in Engineering and Construction*, Berlin: Praxis Publishing Ltd., Chickster, UK, 2005.
- [7] TENSAR International. (n.d.). "What are sinkholes?" Retrieved from <https://www.tensarinternational.com/resources/articles/what-are-sinkholes> [Accessed: 05/07/2024].
- [8] Galloway D.; Jones D.R.; Ingebritsen S.E., *Land Subsidence in the United States*, USGS Science for a Changing World, Circular 1182, 1999.
- [9] Gutiérrez M.; García-Ruiz E.J.; López M.R.L.; López J.J., "Global distribution of karst," in *Geological Society of America Special Papers*, vol. 553, Fig. 8, 2022. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/figure/Global-distribution-of-Karst\\_fig8\\_353519037](https://www.researchgate.net/figure/Global-distribution-of-Karst_fig8_353519037).
- [10] Tomac I.; Zlatović S.; Zekkos A.; Bleiziffer J.; Domitrović D.; Frangen T.; Gjetvaj V.; Govorčin M.; Gukov I.; Herak M.; Hrženjak P.; Kinikles D.; Kovačević Zelić B.; Matoš B.; Matešić D.; Mihaljević I.; Miljić Z.; Miletić M.; Montgomery J.; Žderić P., "Geotechnical reconnaissance and engineering effects of the December 29, 2020, M6.4 Petrinja, Croatia earthquake, and associated seismic sequence," 2021. [Online]. Available: [https://www.researchgate.net/publication/354780866\\_Geotechnical\\_Reconnaissance\\_and\\_Engineering\\_Effects\\_of\\_the\\_December\\_29\\_2020\\_M64\\_Petrinja\\_Croatia\\_Earthquake\\_and\\_Associated\\_Seismic\\_Sequence/citation/download](https://www.researchgate.net/publication/354780866_Geotechnical_Reconnaissance_and_Engineering_Effects_of_the_December_29_2020_M64_Petrinja_Croatia_Earthquake_and_Associated_Seismic_Sequence/citation/download) [Accessed: 08.09.2023].



- [11] Tomac I.; Kovačević Zelić B.; Perić D.; Domitrović D.; Štambuk N.; Cvitanović H.; Vučenović J.; Parlov J.; Stipčević J.; Matešić D.; Matoš B.; Vlahović I., "Geotechnical reconnaissance of cover-collapse sinkhole following Petrinja 2020 earthquake," Proceedings of the 2nd Croatian Conference on Earthquake Engineering, 2CroCEE, Zagreb, 2023.
- [12] Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, Zavod za geotehniku: Ocjena postojećeg stanja i kategorizacija urušnih vrtača u sisačko – moslavačkoj županiji, GIZ-110-024/2022, travanj 2022.
- [13] Craig R.F., Craig's Soil Mechanics (7th ed.), London: Spon Press, 2004.
- [14] Privatna arhiva (Tatjana Dovranić Kardaš, Hrvatske Vode)

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1 Oblici reljefa u kršu (Izvor: [2]).....   | 2  |
| Slika 2 Vrtača Crveno jezero (Izvor: [5]).....  | 5  |
| Slika 3 Shematski prikaz vrtače nastale kemijskim otapanjem (Izvor: [6]).....   | 7  |
| Slika 4 Urušne vrtače nastale urušavanjem krovne stijene, Sjeveroistočna Španjolska<br>(Izvor: [5]).....                          | 8  |
| Slika 5 Shematski prikaz urušne vrtače s urušavanjem vapnenca (Izvor: [6]) .....  | 9  |
| Slika 6 Shematski prikaz urušne vrtače s urušavanjem netopive stijene (Izvor: [6]) .....  | 9  |
| Slika 7 Vrtača nastala urušavanjem koherentnog tla, zapadna Ukrajina (Izvor: [5]) .....   | 9  |
| Slika 8 Shematski prikaz vrtače nastale urušavanjem koherentnog tla (Izvor: [6]).....   | 10 |
| Slika 9 Shematski prikaz vrtače nastale sufozijom (Izvor: [6]).....   | 11 |
| Slika 10 Vrtača nastala sufozijom - Iberijski poluotok, Španjolska (Izvor: [5]).....  | 12 |
| Slika 11 Rasprostranjenost krša u svijetu (Izvor: [7]) .....  | 12 |
| Slika 12 Xiaohzai Tiankeng (Kina) - najveća poznata urušna vrtača na svijetu (Izvor: [8]) ..                                      | 13 |
| Slika 13 Urušna vrtača u Catalayadu, Španjolska (Izvor: [5]).....   | 14 |
| Slika 14 Otvaranje vrtače u tvornici, Zaragoza, Španjolska (Izvor: [5]) .....   | 15 |
| Slika 15 Hidrogeološka svojstva područja Mečenčani – Borojevići (Izvor: [10]) .....   | 19 |
| Slika 16 Pozicije epicentara potresa u okolici Petrinje u razdoblju od 28. prosinca 2020. do<br>siječnja 2021. (Izvor: [10])..... | 20 |
| Slika 17 Pozicije novih urušnih vrtača nakon potresa 2020. (Izvor: [10]) .....  | 21 |
| Slika 18 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače - 1 (Izvor: [10]) .....   | 22 |
| Slika 19 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače – 2 (Izvor: [10]) .....   | 22 |
| Slika 20 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače - 3 (Izvor: [10]) .....   | 22 |
| Slika 21 Nestabilnosti pokosa urušne vrtače -4 (Izvor: [10]) .....  | 22 |
| Slika 22 Urušna vrtača S001 (Izvor: [10]) .....   | 23 |
| Slika 23 LiDAR snimak iz zraka - najveći promjer urušne vrtače S001 (Izvor: [10]).....  | 24 |
| Slika 24 Urušna vrtača S014 (Izvor: [10]) .....   | 25 |
| Slika 25 Lidarski snimak urušne vrtače S015 (Izvor: [10]) .....   | 26 |
| Slika 26 Shematski prikaz nastanka urušnih vrtača (Izvor: [3]) .....  | 27 |
| Slika 27 Urušna vrtača S001 i poprečni presjek P2-P2' .....   | 30 |
| Slika 28 Geodetski profil vrtače S001, mjereno 2. ožujka 2022. godine .....   | 30 |
| Slika 29 Pojednostavljeni profil vrtače za potrebe analize.....   | 31 |
| Slika 30 Geotehnički profil tla (Izvor: [11]).....  | 32 |
| Slika 31 Profil izrađen na osnovu ispitivanja električnom tomografijom (Izvor: [12]) .....  | 32 |

---

|  |    |
|--|----|
| Slika 32 Izlazni rezultati pokusa higrometrom (Izvor: [11]) .....  | 34 |
| Slika 33 Odnos obujamske vlažnosti s porastom negativnog pornog tlaka.....   | 35 |
| Slika 34 Odnos koeficijenta propusnosti i usisa za CL-CH (1. sloj) .....   | 36 |
| Slika 35 Odnos koeficijenta propusnosti i usisa za sloj CL 1 (2. sloj) .....   | 36 |
| Slika 36 Odnos koeficijenta propusnosti i usisa za sloj CL 2 (3. sloj) .....   | 37 |
| Slika 37 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 1 .....   | 38 |
| Slika 38 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – prije početka crpljenja – proračunska situacija 1.....                                 | 38 |
| Slika 39 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – završetak crpljenja – proračunska situacija 1 .....                                    | 39 |
| Slika 40 Izlazni rezultat analize stabilnosti- faktor sigurnosti nakon završetka crpljenja – proračunska situacija 1 .....               | 40 |
| Slika 41 Promjena faktora sigurnosti prilikom crpljenja – proračunska situacija 1.....   | 40 |
| Slika 42 Crpljenje vode iz urušne vrtače S001 - 27.10.2022 (Izvor: [14]).....  | 41 |
| Slika 43 Urušavanje pokosa vrtače S001 - 23.11.2022 (Izvor: [14]).....   | 41 |
| Slika 44 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 2.....  | 42 |
| Slika 45 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – proračunska situacija 2.....   | 43 |
| Slika 46 Izlazni rezultat analize stabilnosti kosine – proračunska situacija 2.....  | 43 |
| Slika 47 Definiranje rubnog uvjeta petodnevnju kišu od 20 mm/dan.....  | 45 |
| Slika 48 Definiranje rubnog uvjeta petodnevnju kišu od 40 mm/dan.....  | 45 |
| Slika 49 Definiranje rubnog uvjeta za petodnevnju kišu od 80 mm/dan.....   | 46 |
| Slika 50 Definiranje rubnog uvjeta za desetodnevnju kišu .....   | 46 |
| Slika 51 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 3.....  | 47 |
| Slika 52 Izlazni rezultat analize procjeđivanja u početnom trenutku – proračunska situacija 3 .....                                      | 48 |
| Slika 53 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za kišu 20 mm /dan – proračunska situacija 3a.....                    | 48 |
| Slika 54 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za kišu 40 mm/dan – proračunska situacija 3b.....                     | 49 |
| Slika 55 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za kišu 80 mm/dan – proračunska situacija 3c.....                     | 49 |
| Slika 56 Izlazni rezultat posljednjeg koraka analize procjeđivanja za desetodnevnju kišu 253.6 mm/10 dana– proračunska situacija 3d..... | 50 |
| Slika 57 Izlazni rezultat analize stabilnosti u početnom koraku – proračunska situacija 3 51   |    |
| Slika 58 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za kišu 20 mm/dan – proračunska situacija 3a.....                      | 51 |

---

|  |    |
|--|----|
| Slika 59 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za kišu 40 mm/dan – proračunska situacija 3b.....                      | 52 |
| Slika 60 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za kišu 80 mm/dan – proračunska situacija 3c.....                      | 52 |
| Slika 61 Izlazni rezultat analize stabilnosti pri završnom koraku za desetodnevnu kišu 253.6 mm/ 10 dana – proračunska situacija 3d..... | 53 |
| Slika 62 Usporedba faktora sigurnosti svih analiziranih slučajeva – proračunska situacija 3 .....  | 54 |
| Slika 63 Definiranje modela za analizu procjeđivanja - proračunska situacija 4 .....   | 55 |
| Slika 64 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – proračunska situacija 4.....   | 55 |
| Slika 65 Izlazni rezultat analize procjeđivanja – proračunska situacija 4.....   | 56 |
| Slika 66 Definiranje modela za analizu procjeđivanja – proračunska situacija 5 .....   | 57 |
| Slika 67 Izlazni rezultati analize procjeđivanja u završnom koraku – proračunska situacija 5 .....                                       | 57 |
| Slika 68 Izlazni rezultat analize stabilnost u završnom koraku – proračunska situacija 5..   | 58 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1 Otvaranje urušnih vrtača i prouzročene štete (Izvor: [5]).....      | 16 |
| Tablica 2 Prikaz 5 proračunskih situacija koje su analizirane .....           | 28 |
| Tablica 3 Parametri materijala potrebnih za provedbu analize.....             | 33 |
| Tablica 4 Parametri za Van Genuchtenov model (Izvor: [11]).....               | 34 |
| Tablica 5 Pretvorba iz mm/dan u $m^3/s/m^2$ .....                             | 44 |
| Tablica 6 Rekapitulacija faktora sigurnosti po proračunskim situacijama ..... | 59 |