

# Karakterizacija tla za modeliranje kolapsa pokrovnih naslaga na okršenoj vapnenačkoj podlozi

---

Rudec, Ena

Master's thesis / Diplomski rad

2021

*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:169:370227>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-05**



*Repository / Repozitorij:*

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



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

**KARAKTERIZACIJA TLA ZA MODELIRANJE KOLAPSA POKROVNIH  
NASLAGA NA OKRŠENOJ VAPNENAČKOJ PODLOZI**

Diplomski rad

Ena Rudec

R 283

Zagreb, 2021.

KARAKTERIZACIJA TLA ZA MODELIRANJE KOLAPSA POKROVNIH NASLAGA NA OKRŠENOJ  
VAPNENAČKOJ PODLOZI

Ena Rudec

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

Sažetak

Tijekom i nakon potresa 29. prosinca 2020.godine u Petrinji, osim uobičajenih pojava zapažen je veliki broj urušnih vrtača. Urušne vrtače nastaju ispiranjem materijala iz pokrova pri čemu on gubi čvrstoću i dolazi do urušavanja. Pregledom terena zabilježeno je 45 postojećih, 91 novonastalih i 3 potencijalne vrtače. S obzirom da je ta pojava rijetka i u svijetu, provedena su brojna geološka, hidrogeološka, geofizička i geotehnička ispitivanja, te su uzeti uzorci tla za laboratorijsko ispitivanje. Uzorci su dobiveni rotacijskom ručnom bušilicom te uzorkovanjem pomoću cilindra. Za ispitivanja prikazana u ovom radu odabrani su uzorci tla izvađeni iz bušotina izvedenih pored dvije karakteristične vrtače u naselju Borojevići. Na odabranim uzorcima provedena je terenska identifikacija i klasifikacija koja je naknadno nadopunjena laboratorijskim pokusima. Osim toga, provedeno je ispitivanje mehaničkih i hidrauličkih značajki pokrovnih naslaga. U ovom radu detaljno je opisan postupak određivanja posmične čvrstoće pokusom izravnog smicanja te su analizirani rezultati ispitivanja.

Ključne riječi: krš, potres, urušne vrtače, izravni posmik, posmična čvrstoća  
Završni rad sadrži: 47 stranice, 6 tablica, 41 slika, i 21 reference.  
Jezik izvornika: Hrvatski  
Pohrana rada: Knjižnica Rudarsko-geološko-naftnog fakulteta, Pierottijeva 6, Zagreb  
Mentori: Dr.sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof. RGNF  
Dr. sc. Ime Prezime, izvanredni profesor RGNF  
Pomagao pri izradi: Dipl. ing. Evelina Oršulić, RGNF  
Ime Prezime, asistent RGNF  
Ocjenjivači: Dr. sc. Biljana Kovačević Zelić, red. prof. RGNF  
Dr. sc. Dubravko Domitrović, docent RGNF  
Dr. sc. Petar Hrženjak, izv.prof.

SOIL CHARACTERIZATION FOR MODELING OF COVER COLLAPSE SINKHOLES IN  
KARSTIFIED LIMESTONE AREA

Ena Rudec

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

Abstract

During and after the earthquake that occurred on 29th December 2020 in Petrinja, apart from the usual occurrences, a large number of cover-collapse sinkholes have appeared. Cover-collapse sinkholes appear due to washing out materials from the cover in a way that it loses strength and collapses. During the inspection of the area, 45 existing, 91 newly-formed and 3 potential sinkholes have been recorded. Considering that this phenomenon is very rare worldwide, numerous geological, hydrogeological, geophysical and geotechnical investigations have been conducted, and soil samples for laboratory tests have been taken. The samples were obtained with a portable rotary power auger and by using a sampling cylinder. For the research presented in this paper, representative soil samples were obtained from the boreholes drilled next to two typical sinkholes in the village of Borojevići. Field identification and classification have been done on the chosen samples, and this has been complemented with laboratory tests. In addition, testing of the mechanical and hydraulic characteristics of the cover deposits has been conducted. This paper brings a detailed procedure of determining the shear strength with the direct shear test, as well as the analysis of the test research results.

Keywords: karst, earthquake, cover-collapse sinkholes, direct shear, shear strength

Thesis contains: 47 pages, 6 tables, 41 figures, i 21 references.

Original in: Croatian

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

Supervisors: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor  
Associate Professor Name Surname, PhD

Tech. assistance: Mag. ing. Evelina Oršulić  
Assistant Name Surname

Reviewers: PhD Biljana Kovačević Zelić, Full Professor  
PhD Dubravko Domitrović, Assistant Professor  
PhD Petar Hrženjak, Associate Professor

Defence date: September 17, 2021., Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, University of Zagreb

## SADRŽAJ

1. UVOD .....	1
2. KRŠKI RELJEF .....	3
2.1. Proces stvaranja krškog reljefa .....	3
2.2. Faze razvoja krša .....	5
2.3. Krški oblici .....	6
2.4. Krš u Hrvatskoj.....	7
3. VRTAČE NASTALE NAKON POTRESA U PETRINJI.....	11
3.1. Osnovni podaci o potresu .....	11
3.1.1. Seizmički inducirani efekti potresa.....	11
3.1.2. Urušne vrtache .....	14
3.2. Geološki uvjeti.....	17
3.3. Hidrogeološke karakteristike područja sela Mečenčani i Borojevići .....	19
3.4. Vrtache nastale na području sela Borojevići .....	20
4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA U POKROVNIM NASLAGAMA URUŠNIH VRTAČA .....	23
4.1. Pokus izravnog smicanja .....	23
4.2. Opis uzoraka tla .....	25
4.3. Postupak ispitivanja .....	29
5. REZULTATI ISPITIVANJA .....	35
5.1. Obrada podataka .....	35
5.2. Rezultati ispitivanja uzorka 1 .....	36
5.3. Rezultati ispitivanja uzorka 2 .....	38
5.4. Usporedba rezultata .....	40
5.5. Statistička obrada rezultata .....	43
6. ZAKLJUČAK .....	45
LITERATURA .....	47

## POPIS SLIKA

Slika 2-1 Faze razvoja krša (prema Goodman, 1993) .....	6
Slika 2-2 Značajniji krški oblici (Matas, 2009).....	7
Slika 2-3 Tipovi krša u Hrvatskoj (Matas, 2009) .....	10
Slika 3-1 Područje na kojem se osjetilo potrtavanje tla (Tomac i dr., 2021) .....	11
Slika 3-2 Inteferogramski prikaz proučavanog područja oko rasjeda (Mihalić Arbanas i dr., 2021).....	12
Slika 3-3 Izbacivanje pijeska (Mihalić Arbanas i dr., 2021).....	13
Slika 3-4 Pukotina nastala bočnim razmicanjem (Mihalić Arbanas i dr., 2021).....	13
Slika 3-5 Urušna vrtača nastala potresom u Petrinji (Mihalić Arbanas i dr., 2021).....	14
Slika 3-6 Vrtače prema postanku (prema Waltham i Fookes, 2003).....	15
Slika 3-7 Faze nastanka urušne vrtače (Salvati i Sasowsky, 2002).....	16
Slika 3-8 Nastanak vrtače na koherentnom i nekoherentnom tlu (prema Mihalić, 2007)...	16
Slika 3-9 Osnovna geološka karta Hrvatske s prikazanim vrtačama (Tomac i dr., 2021) ..	18
Slika 3-10 Topografska karta s prikazom vrtača prema vremenu pojavljivanja i veličini (Tomac i dr., 2021) .....	19
Slika 3-11 Hidrogeološki uvjeti vodonosnog sistema tijekom potresa (prema Tomac i dr., 2021).....	20
Slika 3-12 Prosječne debljine krša na području između Mečenčana i Borojevića .....	21
Slika 3-13 Vrtača za uzorke iz bušotine B-3 (Tomac i dr., 2021).....	22
Slika 3-14 Vrtača za uzorke iz bušotine B-4 (Tomac i dr., 2021).....	22
Slika 4-1 Shematski prikaz uređaja za izravni posmik (Kvasnička i Domitrović, 2007)....	23
Slika 4-2 Pokus izravnog smicanja (Kvasnička i Domitrović, 2007).....	24
Slika 4-3 Lokacija bušotine B-3 (Tomac i dr., 2021) .....	25
Slika 4-4 Lokacija bušotine B-4 (Tomac i dr., 2021).....	25
Slika 4-5 Prvi uzorak (B-3) .....	26
Slika 4-6 Drugi uzorak (B-4).....	27
Slika 4-7 Bušotinski profil B-3 (prema Tomac i dr., 2021) .....	28
Slika 4-8 Bušotinski profil B-4 (prema Tomac i dr., 2021) .....	29
Slika 4-9 Dijelovi uređaja za smicanje .....	30
Slika 4-10 Mjerenje visine $h_1$ .....	31
Slika 4-11 Utiskivanje uzorka u kalup .....	31
Slika 4-12 Ugrađena kutija s uzorkom .....	32

Slika 4-13 Dijelovi uređaja za izravni posmik .....	33
Slika 4-14 Uzorak nakon ispitivanja .....	34
Slika 5-1 Konsolidacija uzorka 1.....	36
Slika 5-2 Posmik uzorka 1.....	37
Slika 5-3 Odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka prvog uzorka.....	37
Slika 5-4 Parametri čvrstoće uzorka 1 .....	38
Slika 5-5 Konsolidacija uzorka 2.....	39
Slika 5-6 Posmik uzorka 2.....	39
Slika 5-7 Odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka drugog uzorka.....	40
Slika 5-8 Parametri čvrstoće uzorka 2 .....	40
Slika 5-9 Parametri čvrstoće uzoraka 1 i 2 .....	42
Slika 5-10 Jednadžba pravca i koeficijent determinacije .....	43

## POPIS TABLICA

Tablica 2-1 Hrvatske županije prema ukupnoj i okršenoj površini (Matas,2009) .....	8
Tablica 4-1 Rezultati ispitivanja granica plastičnih stanja uzoraka 1 i 2 .....	27
Tablica 5-1 Parametri čvrstoće uzoraka 1 i 2 .....	41
Tablica 5-2 Normalna naprezanja i posmična čvrstoća uzoraka 1 i 2 .....	41
Tablica 5-3 Ocjena povoljnosti terena (Kovačević-Zelić, 2020) .....	42
Tablica 5-4 Raspon vrijednosti $R^2$ i $r$ uz tumačenje (Radman-Funarić,2018).....	44



## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I JEDINICA

Oznaka	Jedinica	Opis
$L_1$	cm	unutrašnja dimenzija kutije
$L_2$	cm	unutrašnja dimenzija kutije
$h_1$	cm	visina od donje porozne pločice do vrha kutije
$h_2$	cm	visina od gornje porozne pločice do vrha kutije
$t_p$	cm	debljina porozne pločice
$\sigma_n$	$\text{kN/m}^2$	normalno naprezanje
$N$	N	normalna sila
$A$	$\text{m}^2$	površina poprečnog presjeka uzorka
$m_{ut}$	kg	masa utega
$g$	$\text{m/s}^2$	ubrzanje sile teže
$\tau$	$\text{kN/m}^2$	posmično naprezanje
$T$	N	posmična sila
$c'$	$\text{kN/m}^2$	kohezija
$\varphi$	°	kut unutarnjeg trenja
$\tau_{max}$	$\text{kN/m}^2$	najveća posmična naprezanja
$R^2$		koeficijent determinacije
$r$		koeficijent linearne korelacije

## 1. UVOD

Krš podrazumijeva niz specifičnih morfoloških i hidrografskih pojava u reljefu vapnenačkih terena koje se javljaju kao posljedica djelovanja krške erozije. Osnovne odlike krša su reljef i posebne hidrografske i hidrogeološke pojave koje ga razlikuju od onih koji nastaju od netopivih stijena (Petrović, 2003).

Prema Matas (2009) čak 50,5 % državnog teritorija Republike Hrvatske zauzima krš. Krš u Hrvatskoj karakteriziraju brojni površinski i podzemni krški oblici poput kaverna, škrapa, polja, uvala, zaravni, vrtača i drugih. Velika rasprostranjenost krša u Hrvatskoj razlog je veće zainteresiranosti za njegovo proučavanje. Mihalić Arbanas i Bernat (2013) navode da je specifičnost krša u brznoj infiltraciji oborina, stvaranju podzemnih akumulacija i velikoj propusnosti. Zbog toga, proučavanje krškog područja i samih procesa koji se javljaju u njemu, dovest će do bolje interpretacije i razumijevanja potencijalnih problema koji se mogu dogoditi.

Potres u Petrinji, koji se dogodio 29. prosinca 2021. godine, rezultirao je stvaranjem brojnih hazarda. Jedan od najznačajnijih su urušne vrtače. Pretpostavlja se da su se vrtače, na tom području, pojavile zbog specifične geološke građe terena. Na površini i plitko ispod nje nalaze se deluvijalno-proluvijalne naslage koje se uglavnom sastoje od šljunka, pijeska i gline. Navedene naslage nalazile su se iznad okršene vapnenačke podloge u koju se pokrovni sediment ispirao. Ispiranjem materijala dio pokrovnih naslaga ostaje bez svoje podloge i dolazi do slijeganja na površini ili naglog sloma i urušavanja (Tomljenović i dr., 2021).

Zeng i Zhou (2019) navode da su krška područja sklona stvaranju vrtača zbog svojih karakteristika uključujući nepravilnu površinu temeljne stijene, šupljine u podzemlju te erodirano i oslabljeno tlo. Pri klasifikaciji vrtače bitna su dva kriterija. Prvi se odnosi na vrstu materijala koji se premješta prema unutrašnjosti, a drugi kriterij se odnosi na način kretanja materijala (kolaps ili sporo slijeganje). Postoji nekoliko hipoteza o mehanizmu kolapsa pokrovnih naslaga. Često se, kao najvažniji čimbenik u razvoju vrtača, izdvaja voda. Ona rastvara vapnence, transportira materijal i ubrzava eroziju tla. Općenito, postoje tri načina na koji voda ubrzava eroziju: procjeđivanjem površinske vode u nezasićenoj zoni, procjeđivanjem oborinske vode u nezasićenoj zoni i promjenom razine podzemne vode (pad, porast ili fluktuacija) u zasićenoj zoni. Porast razine podzemne vode povećava stupanj zasićenja tla i dovodi do smanjenja čvrstoće tla. No, vrtače mogu nastati kao posljedica snažnih seizmičkih aktivnosti koji dovode do gubitka čvrstoće materijala.

Kako bi se mogle provjeriti hipoteze o mehanizmu kolapsa pokrovnih naslaga, potrebno je provesti ispitivanja mehaničkih i hidrauličkih svojstava. Za dobivanje uvida o posmičnoj čvrstoći naslaga proveden je pokus izravnog posmika. Izravni posmik u praksi je jedan od najčešćih laboratorijskih ispitivanja. Relativno brzo i jednostavno dobiju se parametri čvrstoće tj. kohezija i kut unutarnjeg trenja. Ispitni uzorci za ovo istraživanje dobiveni su ručnim bušenjem s uzimanjem neporemećenih uzoraka, koji su izvađeni u neposrednoj blizini dviju karakterističnih vrtača nastalih u naselju Borojevići.

## 2. KRŠKI RELJEF

Krš je specifičan reljef koji nastaje na terenima izgrađenim od topivih stijena. Iako je vezan i za druge stijene poput gipsa i halita, sam pojam krša najviše se veže uz karbonatne naslage (vapnenac i dolomit) zbog njihove najveće rasprostranjenosti. Krš nastaje djelovanjem brojnih procesa. Najvažniju ulogu u njegovu nastajanju imaju korozivno i erozijsko djelovanje vode, kako na površini tako i u podzemlju. Sam proces djelovanja naziva se krški proces ili okršavanje (Kuhta, 2000).

Kao jednu od najvažnijih karakteristika krša, Kuhta (2000), navodi slabo razvijene hidrološke pojave na površini, gdje se rijetko pojavljuju stalne tekućice. To je posljedica okršenosti i raspucalosti karbonatnih naslaga što ih čini vrlo propusnima i omogućava brzo otjecanje vode u podzemlje. S druge strane, brojne šupljine u podzemlju omogućavaju skupljanje vode. Upravo ta cirkulacija atmosferske vode obogaćene ugljičnim dioksidom dovodi do okršavanja tj. rastvaranja čvrstih karbonatnih stijena.

### 2.1. Proces stvaranja krškog reljefa

Prema Petrović (2003) za razumijevanje i pojašnjenje procesa stvaranja krša, moraju se poznavati uvjeti pod kojima se on pojavljuje i razvija. Za krški proces najznačajnija je sredina u kojoj dolazi do krške erozije. Iako se krški procesi javljaju i u drugim stijenama, u vapnencima su oni najizraženiji i najrazvijeniji. Također navodi kako vapnenac čini gotovo dvije petine Zemljine površine, te da niti jedna druga stijena nema toliku ulogu u stvaranju vlastite morfologije i hidrografije kao vapnenac.

Vapnenac je karbonatna stijena organskog ili anorganskog porijekla u kojoj je volumni udio kalcita veći od 50%. Vapnenci u kojima je sadržaj kalcita veći od 90% nazivaju se čisti vapnenci. Ukoliko je sadržaj kalcita smanjen, a povećan sadržaj dolomita, minerala glina ili klasta, vapnenci se dijele na dolomitične, glinovite, pjeskovite i slično (Vrkljan, 2001).

Vapnenac je najčešće biološka sedimentacijska stijena koja nastaje taloženjem ljuštura, koralja, algi i drugih organskih ostataka. Također, vapnenac može nastati kemijskim sedimentacijskim procesom kao što je taloženje kalcijeva karbonata iz jezerske ili morske vode (King, 2018).

Vrkljan (2001) navodi da prema mjestu nastanka vapnenice dijelimo na marinske, slatkovodne i terestičke. Marinski vapnenci nastaju u morskoj vodi i predstavljaju najrašireniji tip vapnenaca. Najčešće se klasificiraju prema Dunhamovoj klasifikaciji gdje se gleda prisutnost karbonatnog mulja, odnos udjela zrna i mulja, organogeno vezivanje skeleta i slično. Prema Dunhamovoj klasifikaciji vapnenci se dijele na: madeton, vekston,

pekston, grejnston i baundston vapnenac. Ranije se primjenjivala podjela vapnenaca na klastične, kemijske i organogene, no navedena klasifikacija primjenjuje se pri terenskim istraživanjima jer se značajke koje su bitne za klasifikaciju mogu uočiti okom ili povećalom. Slatkovodni vapnenci nastaju u jezerima (jezerski vapnenci) i rijekama (riječni vapnenci). Do izlučivanja vapnenca najčešće dolazi zbog promjene tlaka ili temperature, evaporacijom vode, miješanjem voda različite pH vrijednosti i izdvajanjem ugljikovog dioksida iz vode. Terestički vapnenci nastaju na kopnu i dijele se na vapnenačku sedru, travertin i špiljski vapnenac (speleotemi).

Vapnenci su najčešće bijele do sive boje, a boja im se mijenja ovisno o vrsti primjesa. Željezovi minerali uzrokuju žutu, crvenu i smeđu boju, a organske tvari tamnosivu do crnu boju vapnenca. Tvrdi vapnenaci su gustoće od 2,68 do 2,72 g/cm<sup>3</sup>, prostorne mase između 2,60 i 2,71 g/cm<sup>3</sup> i tlačne čvrstoće od 120 do 200 MPa. Poroznost im je između 0,4 i 1,0% (volumenski udio), a upijanje vode između 0,1 i 0,4% (maseni udio) (Vrkljan, 2001).

Prema Petrović (2003), za krški geomorfološki proces najvažnija karakteristika vapnenca je njegova topivost tj. rastvaranje u vodi.

Vapnenci i karbonatne stijene jako su podložni kemijskom otapanju. Otapanje je izraženije ukoliko voda sadrži ugljični dioksid (CO<sub>2</sub>). Ugljični dioksid jedan je od najtopivijih plinova u atmosferi. Topivost mu je razmjerna parcijalnom tlaku što znači da povećanje parcijalnog tlaka dovodi do povećanja topivosti CO<sub>2</sub>. Količina CO<sub>2</sub> ovisi o sastavu stijena, značajkama tla, klimi, vegetaciji i drugim faktorima. Voda otapa CO<sub>2</sub> prolazeći kroz atmosferu, no otapanje je najizraženije u tlu. Različitim biokemijskim procesima u tlu dolazi do stvaranja CO<sub>2</sub> pa je na dodiru tla i stijene korozija najizraženija (Matas, 2009). Ugljični dioksid, koji se topi u vodi dovodi do nastanka ugljične kiseline. Jednadžba 2.1 prikazuje reakciju nastanka ugljične kiseline.



Do rastvaranja kalcijeva karbonata može doći i u čistoj vodi, ali izraženije je ako voda sadrži ugljičnu kiselinu (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>). Uz pomoć nastale ugljične kiseline dolazi do otapanja kalcijeva karbonata (CaCO<sub>3</sub>) i tako nastaju krški oblici (Petrović, 2003). Jednadžba 2.2 prikazuje reakciju otapanja.



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).

Prema Petrović (2003) količina ugljičnog dioksida u atmosferskim vodama ovisi o nekoliko faktora. Među najznačajnijim su parcijalni pritisak CO<sub>2</sub> u atmosferi i temperatura vode. Parcijalni pritisak ugljičnog dioksida u atmosferi je malen, ali ipak dovodi do čak četiri puta većeg rastvaranja vapnenca nego u čistoj vodi. Temperatura vode također izravno utječe na sadržaj ugljičnog dioksida u vodi. Hladna voda sadrži veću količinu ugljičnog dioksida pa dolazi i do većeg rastvaranja vapnenca.

Petrović (2003) navodi kako voda u dodiru s korijenjem biljaka apsorbira znatnu količinu CO<sub>2</sub>. No, količina ugljičnog dioksida ovisi o temperaturi tla pa se veće količine stvaraju pri manjim temperaturama tla. Važnu ulogu imaju i druge kiseline biljnog ili organskog porijekla. Bujna vegetacija i debeli pokrivač bogat humusom sadrži brojne organske kiseline. Atmosferska voda, prolaskom kroz takav pokrivač, obogaćuje se kiselinama i dolazi do rastvaranja vapnenca biokemijskim procesima.

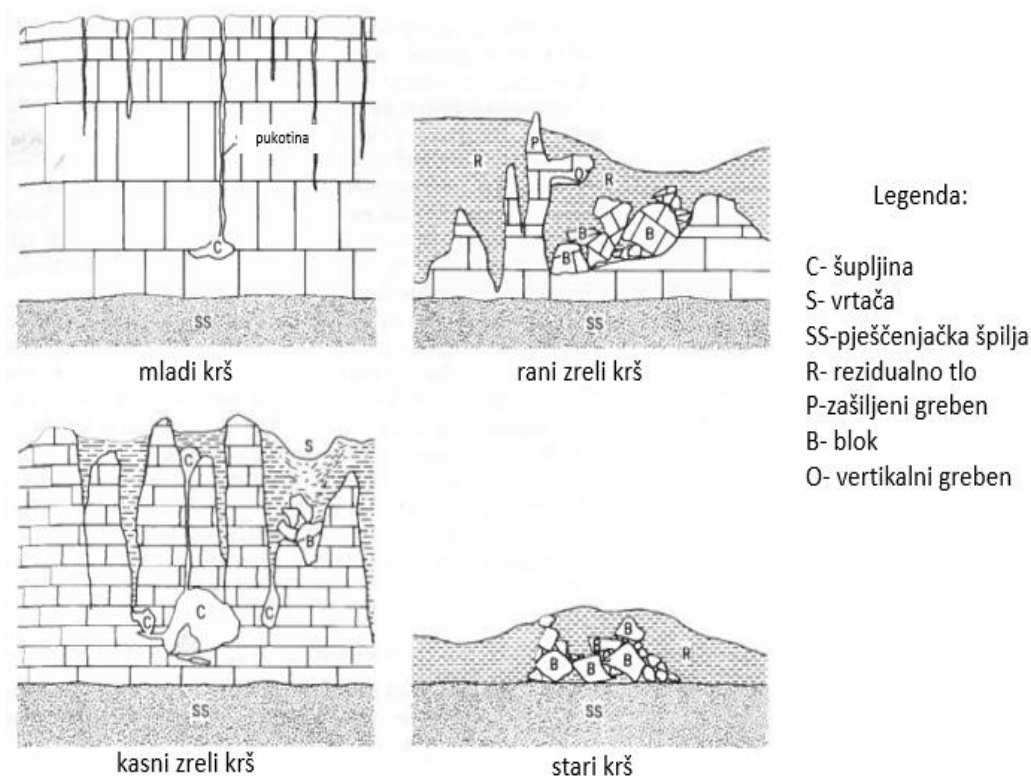
## 2.2. Faze razvoja krša

Otapanje vapnenca, s vremenom, stvara stijensku masu s mnoštvom špilja i pukotina. Na površini često dominiraju male ili velike zatvorene depresije. U procesu razvoja krša razlikuju se tri faze: mladi, zreli i stari krš (slika 2-1).

U početnoj fazi mladog krša površina terena još nije znatno spuštena. Normalna površinska drenaža je zadržana, osim ponekih tokova koji prolaze kroz manje pukotine u podzemlje (Goodman, 1993).

Goodman (1993) navodi da u ranoj zreloj fazi dolazi do stvaranja vertikalnih pukotina. Kroz pukotine prolazi voda koja otapa vapnenac. Pukotine se šire i stvaraju se plitke kaverne. Pokrov kaverni se nakon nekog vremena urušava i nastaju vrtače. Kasnu zrelu fazu karakterizira dobro razvijen i integrirani sustav podzemne odvodnje. Često je slučaj da brojne doline potpuno presuše. Površina terena je nepravilnog oblika i na njoj se nalazi mnoštvo vrtača koje su smještene na malim udaljenostima i različite su dubine. Površinu terena prekriva sloj crvenice različite debljine koji propušta oborinsku vodu kroz sustav pukotina.

U staroj fazi, vapnenac je gotovo potpuno uklonjen. Umjesto njega, površinu prekrivaju debele naslage gline koje sadrže netopive čestice zaostale nakon otapanja kalcita (Goodman, 1993).



**Slika 2-1** Faze razvoja krša (prema Goodman, 1993)

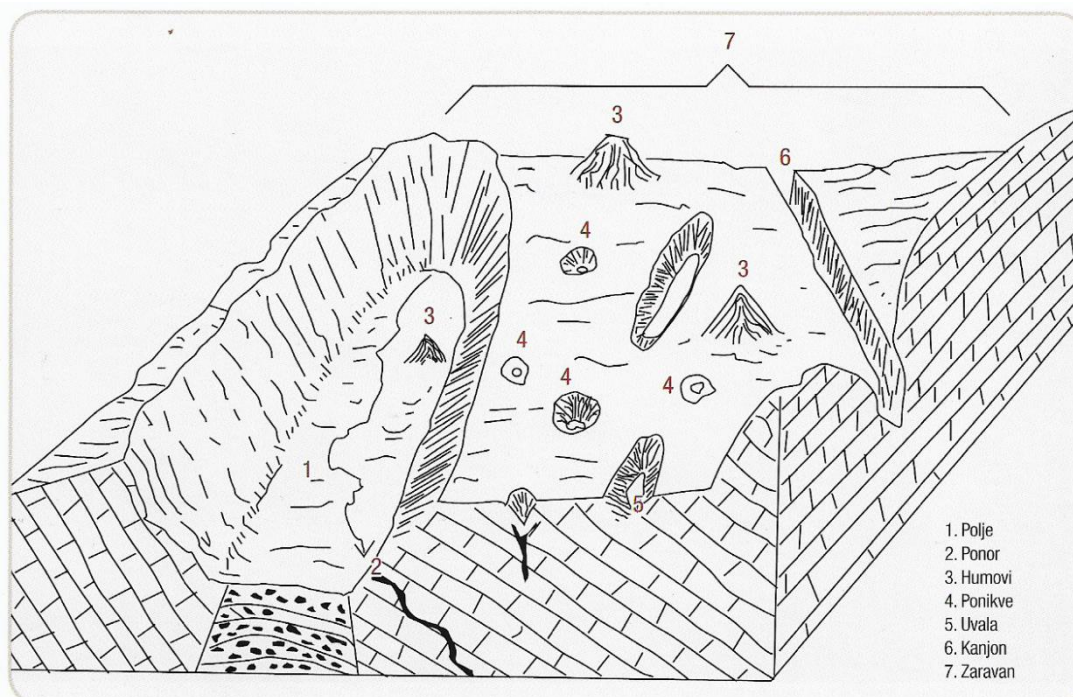
### 2.3. Krški oblici

Kao posljedica procesa okršavanja nastaje podzemni i površinski krški reljef. Atmosferska voda prodire s površine i silazi duž pukotina u unutrašnjost vapnenačke stijene. Ispod površine dolazi do kemijskog rastvaranja uslijed čega se pukotine šire i nastaje podzemni krški reljef. Opći izgled krškog reljefa razlikuje se od područja do područja, a najviše ovisi o fizičko - geografskim uvjetima prirodne sredine u kojoj nastaje (Petrović, 2003).

Prema Matas (2009) utjecajem raznih čimbenika u karbonatnim stijenama nastaju i brojni površinski i podzemni oblici. Oni se međusobno razlikuju po veličini i značenju i često se svrstavaju u različite skupine. Po veličini i obliku ih dijelimo na: polja, vrtače, zaravni, kanjone, dolove i slično. Značajniji krški oblici prikazani su na slici 2-2.

Polja u kršu predstavljaju udubljena različitih dimenzija i jedan su od najpoznatijih oblika hrvatskog krškog područja. Nastaju kao rezultat tektonskih pokreta, fluvijalne i

jezerske akumulacije, te korozije karbonatnih stijena. Vrtače (ponikve) predstavljaju ljevkasta udubljenja u kršu, čiji se detaljni opis nalazi u poglavlju 3. Humovi su osamljena čunjasta uzvišenja i predstavljaju ostatke čvršćih ili slabije topivih stijena na zaravni ili ravnici iz koje se izdižu. Uvale su duguljasti krški oblici s podzemnom odvodnjom, a nastaju korozijskim oblikovanjem u tektonski razlomljenim stijenama. Zaravni se razvijaju na karbonatnoj podlozi, posebice čistim vapnencima. Šire se horizontalno i karakteristične su po brojnim krškim oblicima, koji se razvijaju na zaravnjenoj površini. Kanjoni su uske i duboke doline strmih padina nastale snažnom erozijom tekućica ili procesima korozije u propusnoj krškoj podlozi. Otvori u pukotinama kroz koje ponire voda čine ponor.



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

#### 2.4. Krš u Hrvatskoj

Hrvatska krška područja pripadaju tipu krša koji se ističe debelim karbonatnim mezozojskim i paleogenskim sedimentima. Sedimenti, zajedno s naglašenom tektonskom razlomljenošću, utječu na podjednaku zastupljenost i horizontalnih i vertikalnih oblika. Hrvatsko krško područje čini trokut Savudrija (sjeverozapadni vrh) – Prevlaka (jugoistočni vrh) – Samoborsko gorje (sjeverni vrh). U tablici 2-1 prikazane su hrvatske županije prema ukupnim i okršenim površinama. Prema podacima u tablici, krš zauzima 28.571 km<sup>2</sup> odnosno 50,5% ukupnog državnog teritorija. Osim kontinuiranog krškog područja, tablica prikazuje i područja osamljenog krša. Prema tablici 1, osamljeni krš zahvaća područje od



636 km<sup>2</sup> odnosno 1,1% ukupne površine državnog teritorija i 2,2% ukupne krške površine (Matas, 2009).

**Tablica 2-1** Hrvatske županije prema ukupnoj i okršenoj površini (Matas,2009)

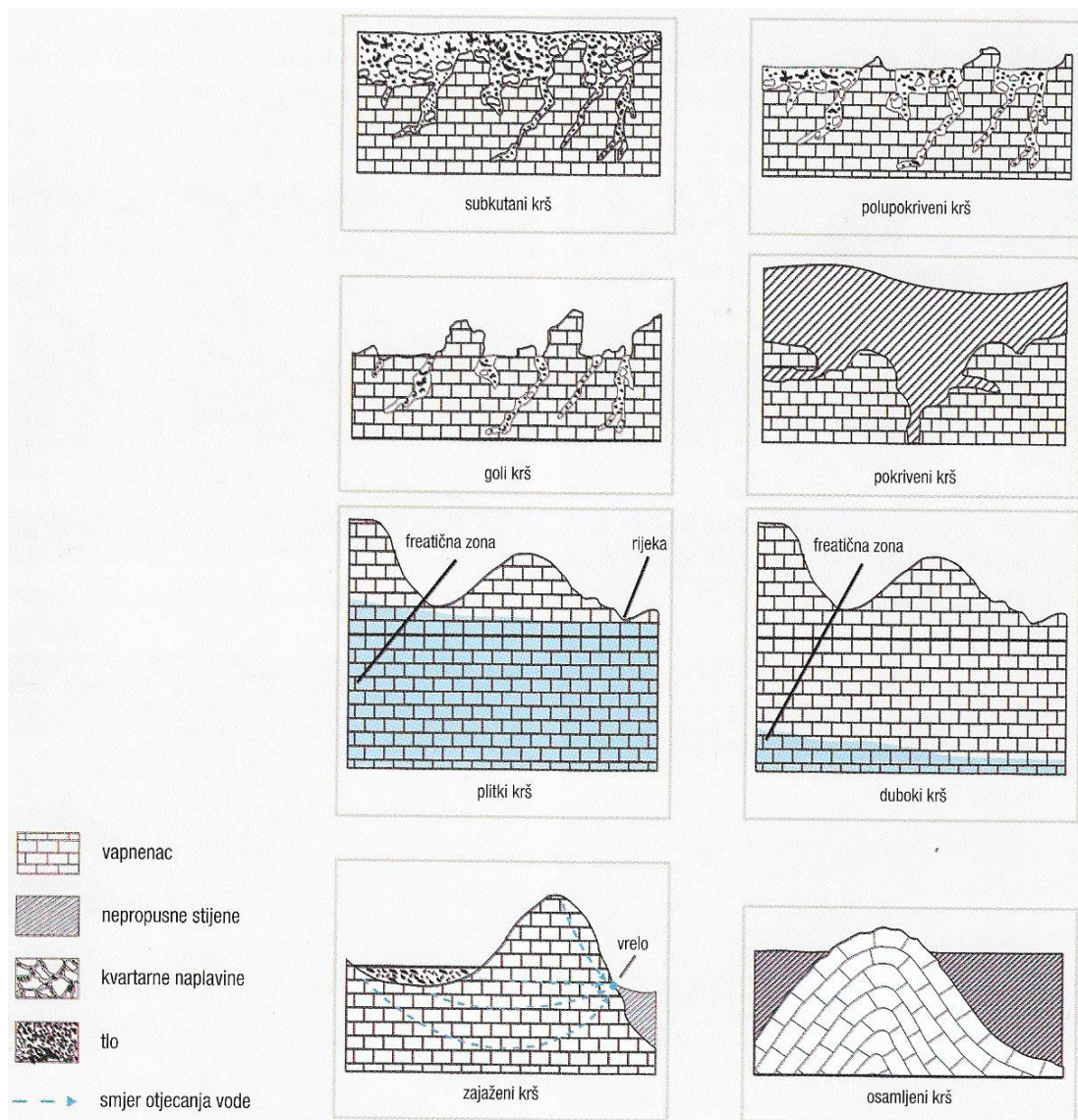
<b>Županija</b>	<b>Ukupna površina županije (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Kompaktni krški prostor (km<sup>2</sup>)</b>	<b>Osamljeni krški prostor (km<sup>2</sup>)</b>
Zagrebačka	3060	319	
Krapinsko-zagorska	1229		45
Sisačko-moslavačka	4468		369
Karlovačka	3626	2911	
Varaždinska	1262		14
Koprivničko-križevačka	1748		65
Bjelovarsko-bilogorska	2640		8
Primorsko-goranska	3588	3588	
Ličko-senjska	5353	5353	
Virovitičko-podravska	2024		12
Požeško-slavonska	1823		85
Brodsko-posavska	2030		0
Zadarska	3646	3646	
Osječko-baranjska	4155		0
Šibensko-kninska	2984	2984	
Vukovarsko-srijemska	2454		0
Splitsko-dalmatinska	4540	4540	
Istarska	2813	2813	
Dubrovačko-neretvanska	1781	1781	
Međimurska	729		0
Grad Zagreb	641		38
<b>Ukupno u km2</b>	<b>56 594</b>	<b>27935</b>	<b>636</b>
<b>%</b>	<b>100</b>	<b>49,4</b>	<b>1,1 %</b>
<b>Ukupno krš</b>		<b>28 571</b> <b>(50,5 %)</b>	

U hrvatskom krškom području dominiraju vapnenci i dolomiti jurske i kredne starosti. Djelovanje brojnih čimbenika na različitom području dovodi do stvaranja različitih oblika krša (Matas, 2009).

Prema Matas (2009) tipovi krša koji se javljaju u Hrvatskoj su:

1. Duboki krš – razvijen u debelim karbonatnim stijenama, karakteriziraju ga duboke jame i visoke stijene,
2. Plitki krš – razvijen u tanjim karbonatnim stijenama, karakteriziraju ga špilje nad kojima dolazi do urušavanja pokrova,
3. Subkutani krš – razvijen pod pokrovom tla, karakterizira ga glatkoća ploha nastalih oblika,
4. Ponikvasti krš – razvija se pod pokrovom nanosa i tla, karakterizira ga brojne i plitke ponikve,
5. Ogoljeni krš – naslijeđeni oblici ukazuju na nekadašnje postojanje pokrovnog tla
6. Krš s ogradama – karakterizira ga suhozidinama obzidane ograde s regeneriranom vegetacijom u ogoljenom krškom području,
7. Osamljeni krš – razvija se u karbonatnim stijenama koje su izolirane u nepropusnoj okolini,
8. Pokriveni krš – pokrivaju ga alogeni nanosi.

Grafički prikaz navedenih tipova krških oblika u Hrvatskoj nalazi se na slici 2-3.



Slika 2-3 Tipovi krša u Hrvatskoj (Matas, 2009)

### 3. VRTAČE NASTALE NAKON POTRESA U PETRINJI

#### 3.1. Osnovni podaci o potresu

U prosincu 2020. godine, na području Sisačko-moslavačke županije zabilježena je serija potresa. Podrhtavanje tla započelo je 28. prosinca 2020. potresom magnitude 5,0 po Richterovoj ljestvici, nakon kojeg su slijedila još dva potresa magnitude 4,7 i 4,1. Sljedeći dan, 29. prosinca 2020., područje je pogodio potres magnitude 6,2 prema Richterovoj ljestvici i smatra se jednim od težih potresa u bližoj hrvatskoj povijesti (Tomac i dr., 2021). Epicentar potresa bio je 9 km od Siska, a hipocentar u dubini od 10 kilometara. Podrhtavanje tla osjetilo se u cijeloj Hrvatskoj i susjednim zemljama (slika 3-1). Potresi su uzrokovali brojne materijalne štete, površinske deformacije i, nažalost, ljudske žrtve.



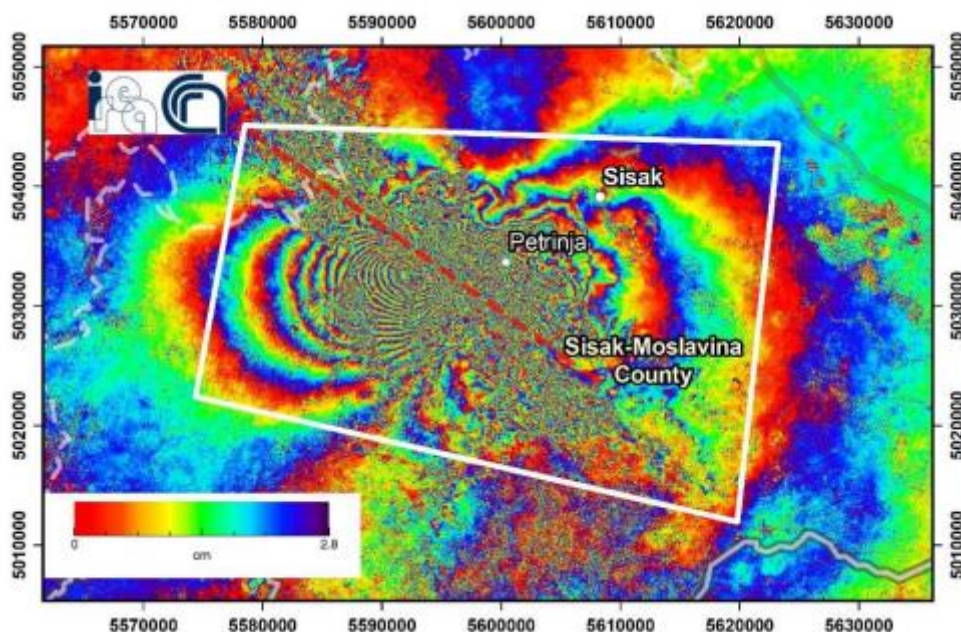
**Slika 3-1** Područje na kojem se osjetilo podrhtavanje tla (Tomac i dr., 2021)

##### 3.1.1. Seizmički inducirani efekti potresa

Na visinu i rasprostranjenost šteta tijekom potresa znatno utječu lokalni uvjeti tla. Kod jakih potresa, magnitude veće od 6 prema Richterovoj ljestvici, valovima velikih amplituda nastaju hazardni procesi. Procese je nužno evidentirati kako bi se mogla procijeniti šteta koju su uzrokovali te definirati mjere zaštite ljudi, oporavka i sanacije. Proučavanjem područja



veličine 1250 km<sup>2</sup> oko rasjeda, prikazano bijelom linijom (slika 3-2), pronašle su se nekoliko vrsta seizmički induciranih efekata potresa: likvefakcija, klizišta i urušne vrtače (Mihalić Arbanas i dr., 2021).



**Slika 3-2** Inteferogramski prikaz proučavanog područja oko rasjeda (Mihalić Arbanas i dr., 2021)

Potres je bio dovoljno snažan da bi mogao uzrokovati likvefakciju. Likvefakcija je pojava gubitka čvrstoće i nosivosti tla uslijed potresa. Tlo ispod površinskog sloja čine naslage pijeska koje su, zbog visoke razine podzemne vode, zasićene vodom. Potresanjem, sloj pijeska ispod površine tla i ispod razine podzemne vode pretvara se u tekućinu. Gornji slojevi tla izazivaju pritisak u nastalom tekućem sloju pri čemu dolazi do izbijanja tekućine i pijeska na površinu (slika 3-3). Izbacivanje traje dok se ne uspostavi ravnoteža pritiska. Čvršći slojevi tla „plivaju“ na tekućem sloju što dovodi do bočnog širenja uslijed potresanja. Posljedice likvefakcije dovode do naginjanja i tonjenja građevina, pojave pukotina na površini tla, pojave klizišta, rušenja konstrukcija, izbacivanja ukopanih instalacija i drugo. Štete su nastupile uglavnom za vrijeme i neposredno nakon potresa (Mihalić Arbanas i dr., 2021).



**Slika 3-3** Izbacivanje pijeska (Mihalić Arbanas i dr., 2021)

Na terenu su zamijećene i pojave klizišta koji nastaju mehanizmima bočnog razmicanja (slika 3-4), klizanja i odronjavanja.



**Slika 3-4** Pukotina nastala bočnim razmicanjem (Mihalić Arbanas i dr., 2021)



Jedna od najopasnijih posljedica potresa su urušne vrtače (slika 3-5).



**Slika 3-5** Urušna vrtača nastala potresom u Petrinji (Mihalić Arbanas i dr., 2021)

### 3.1.2. Urušne vrtače

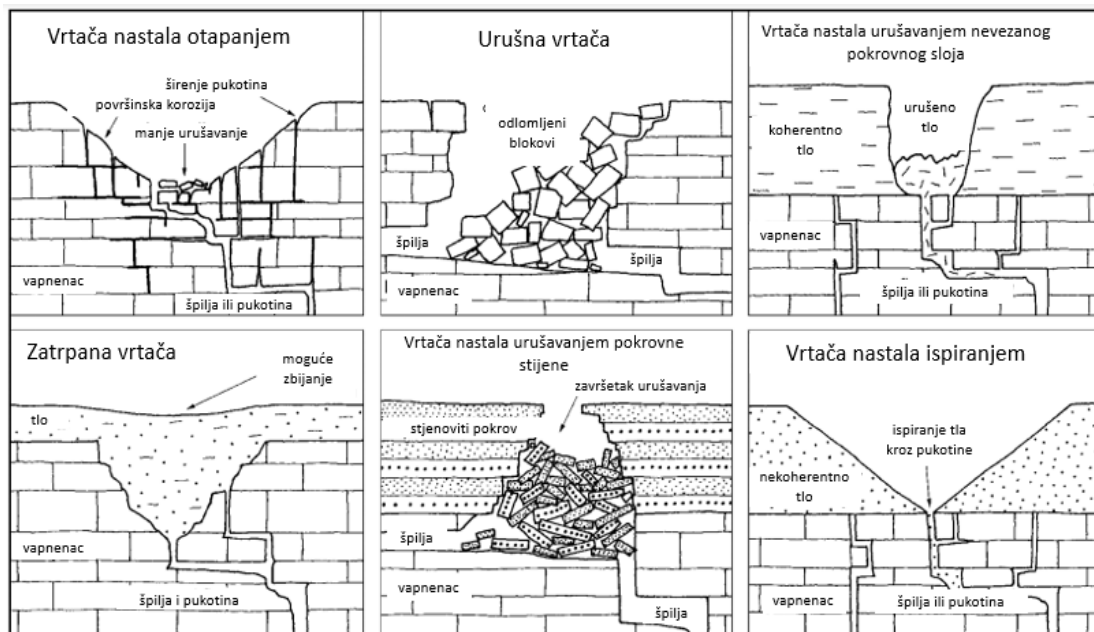
Vrtače su još poznate pod nazivima ponikve, vrtline ili dolci. Nastaju korozijskim procesima i mehaničkim djelovanjem površinske i podzemne vode. Djelovanje vode najizraženije je na sjecištima više vrsta pukotina i mjestima gdje je otapanje vapnenca najintenzivnije. Na stvaranje vrtača istodobno utječu i lokalni i globalni utjecaji. Globalni utjecaji traju tijekom duljeg vremenskog razdoblja, odnose se na veća prostranstva i utječu na područje rasprostiranja i brojnost vrtača. S druge strane, lokalni procesi traju kraće, a najčešće obuhvaćaju samo prostor jedne vrtače ili skupine bliskih vrtača.

Vrtače predstavljaju udubljenja na površini krškog terena, a mogu biti oblika lijevka, tanjura ili bunara. Promjer na vrhu može varirati od 10 do 500 metara, a dubina je najčešće do 20-ak metara (rijetko preko 100 metara). Prema tome, to su udubljenja čija je širina veća u odnosu na dubinu (Matas, 2009).

Prema Bonacci i Roje-Bonacci (2006) i Waltham i Fookes (2003), razlikujemo šest vrsta vrtača prema postanku (slika 3-6). To su:

1. vrtače nastale otapanjem (*eng. dissolution sinkholes*)

2. urušne vrtače (*eng. collapse sinkholes*)
3. vrtače nastale urušavanjem nevezanog pokrovnog sloja (*eng. dropout sinkholes*)
4. zatrpane vrtače (*eng. buried sinkholes*).
5. vrtače nastale urušavanjem pokrovnih stijena koje nisu podložne karstifikaciji, a leže iznad okršenih stijena (*eng. caprock sinkholes*)
6. vrtače nastale ispiranjem (*eng. suffosion sinkholes*)



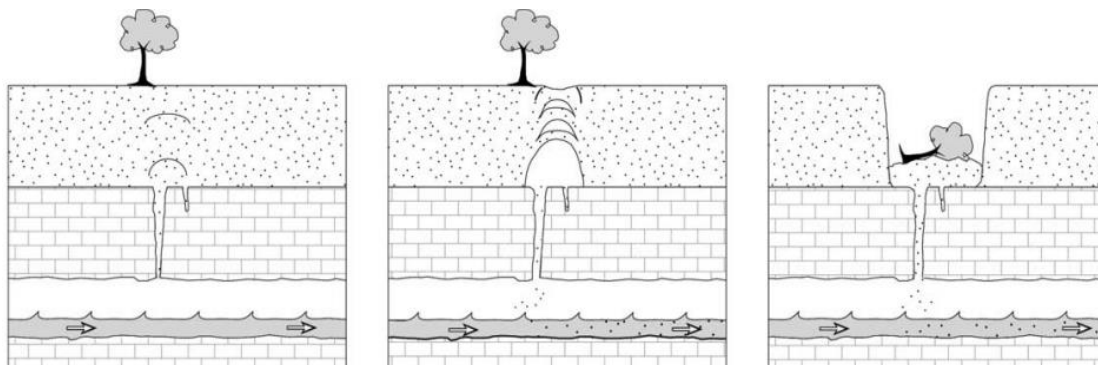
**Slika 3-6** Vrtače prema postanku (prema Waltham i Fookes, 2003)

Urušne vrtače nalaze se u zonama punjenja podzemnih voda i svake godine uzrokuju značajan gubitak imovine, a ponekad i ljudske žrtave. Obično služe za punjenje karbonatnih vodonosnika pa su najviše razvijene na uzvisinama unutar zone punjenja (Salvati i Sasowsky, 2002). Mehanizam nastajanja i razvoja vrtača započinje u malim pukotinama koje izlaze na površinu terena. Te pukotine su prve izložene kemijskom i mehaničkom djelovanju vode. Prema Bonacci i Roje-Bonacci (2006) na stvaranje udubina u kršu djeluju primarni i sekundarni čimbenici. Primarni čimbenici su propusnost topivih stijena, hidraulički gradijent i položaj prihranjivanja podzemne vode. U sekundarne čimbenike ubrajaju se geološka struktura topivih stijena, čistoća sastava, postojanje međuslojeva ili nanosa različitih svojstava propusnosti, njihova debljina i slično.

Za stvaranje urušne vrtače potrebna je šupljina u temeljnoj stijeni i dovoljan parcijalni tlak ili gravitacijska sila. Urušne vrtače većinom nastaju u nekoliko koraka (slika 3-7). U početnoj fazi pokrov se nalazi iznad karbonatne podloge s kojom je hidraulički povezan. Normalni procesi ili antropogeni utjecaji dovode do transporta materijala iz pokrova u

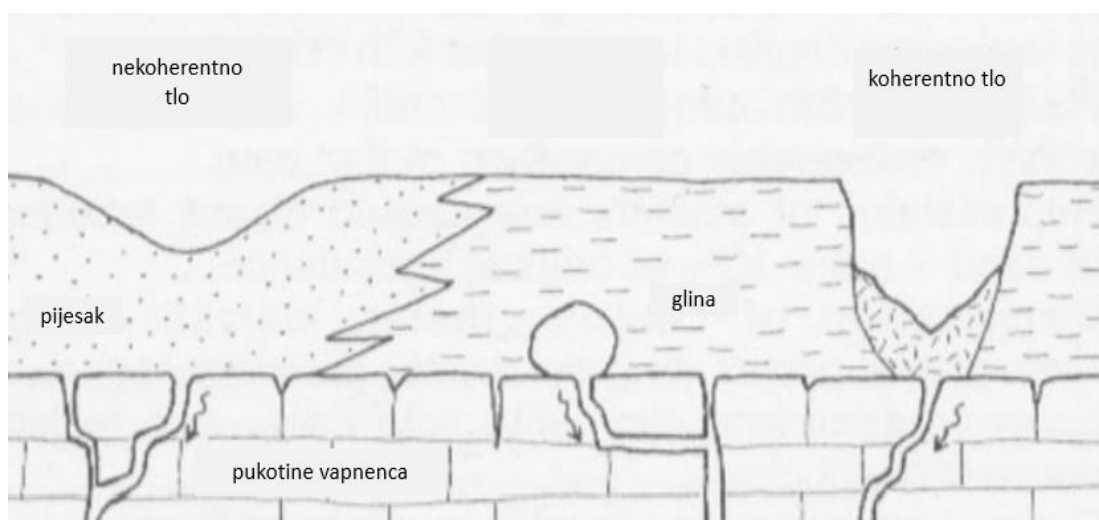


podlogu. Materijal se transportira gravitacijskom silom i protjecanjem vode kroz pukotine. Čestice se uklanjaju od donjeg dijela pokrova prema površini što dovodi do stvaranja šupljine. Daljnjim ispiranjem pokrov postaje pretanak, smanjuje mu se nosivost i čvrstoća, dolazi do urušavanja odnosno naglog spuštavanja površine terena (Salvati i Sasowsky, 2002).



**Slika 3-7** Faze nastanka urušne vrtače (Salvati i Sasowsky, 2002)

Topografske posljedice ovise o vrsti materijala iz kojeg se čestice ispiru. Na slici 3-8 prikazan je proces nastanka vrtača na koherentnom i nekoherentnom tlu. U koherentnom tlu odnošenje čestica traje određeno vrijeme bez pojave udubljenja na površini terena. Širenjem pukotina, nastaje kaverna u osnovnoj stijeni, koja se širi sve dok ne dođe do sloma koherentnog tla i iznenadnog i naglog propadanja površine. U nekoherentnim tlima usijedanje površine je spor i dugotrajan proces (Mihalić, 2007).



**Slika 3-8** Nastanak vrtače na koherentnom i nekoherentnom tlu (prema Mihalić, 2007)

Iako je urušavanje vezano isključivo za prirodne procese, Bonacci i Roje-Bonacci (2006) navode da u posljednje vrijeme antropogeni utjecaju često imaju dominantnu ulogu u urušavanju. Jedan od najvažnijih antropogenih uzoraka je crpljenje vode iz krških

vodonosnika. Crpljenjem dolazi do naglog i velikog spuštanja razine podzemne vode, a same posljedice su često katastrofalne. Osim toga, znatan utjecaj mogu imati i veliki građevinski, nadzemni i podzemni radovi.

Često je slučaj da u vremenu nastanka vrtača djeluje više procesa, što dodatno komplicira objašnjenje njihova nastanka. Za utvrđivanje i opis načina njihova postanka potrebno je poznavati geološke i morfološke podatke, tektonske deformacije i ostale podatke vezane za područje njihova nastanka (Bonacci i Roje-Bonacci, 2006).

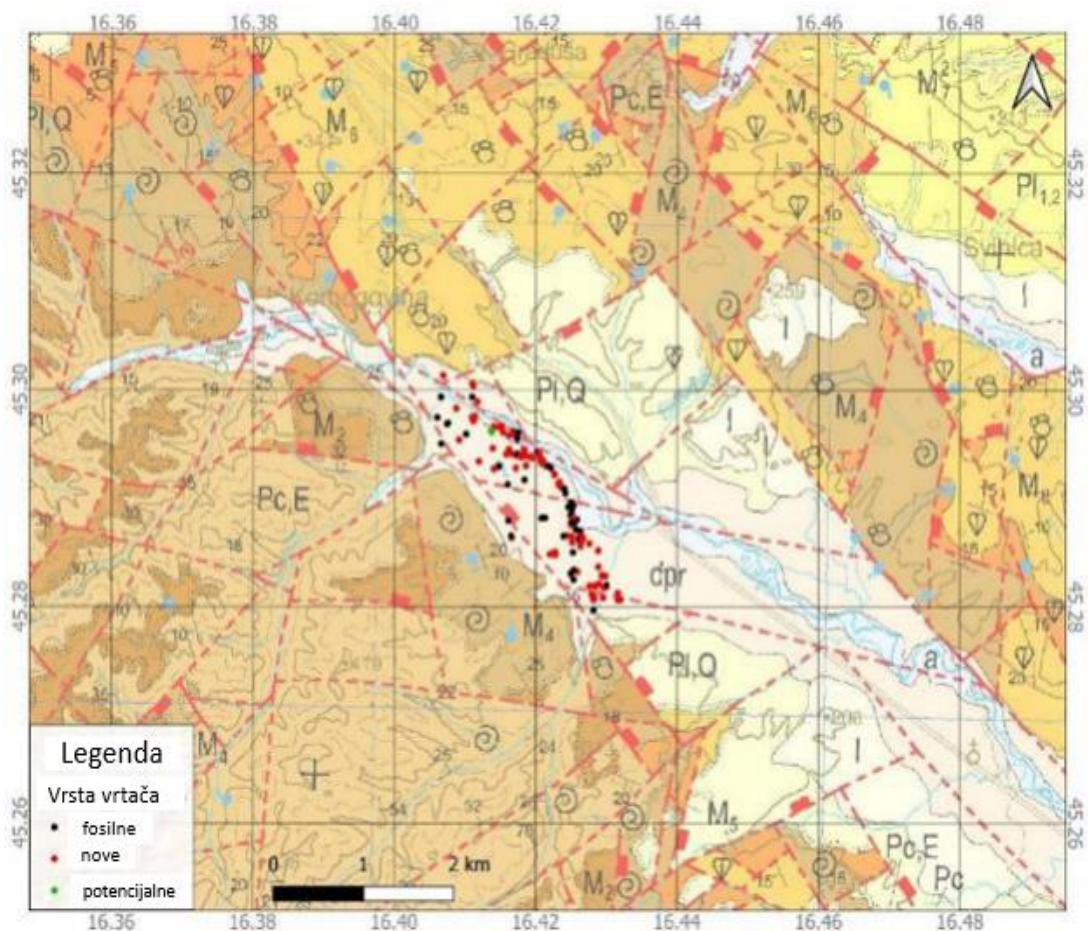
### 3.2. Geološki uvjeti

Iako je petrinjski potres zahvatio područje od 1000 km<sup>2</sup>, najviše vrtača pojavilo se na uskom području, veličine 4 km<sup>2</sup>, u selima Mečenčani i Borojevići. Na tom području vrtače su nastale zbog posebne kombinacije jako okršenog vapnenca i debelog glinenog pokrova (Tomic i dr., 2021).

Subhorizontalne badenske naslage sastoje se od naizmjenično vrlo poroznih litotamijskih vapnenaca i kalkarenita koji su jako osjetljivi na karstifikaciju. Jako karstificiranu karbonatnu podlogu prekriva niz holocenskih deluvijalno - proluvijalnih naslaga. Naslage su izgrađene od glina s međuslojevima leća šljunka i pijeska. Tijekom vlažnih razdoblja, visoki pritisak vode iz temeljnog visoko propusnog krškog vodonosnika izazvao je postupnu podzemnu eroziju nekohezivnog sitnozrnog pokrovnog tla (sufozija). Uklanjanje erodiranog materijala odvija se protokom podzemne vode kroz okršene sustave u podzemlju, pri čemu se pukotine šire i stvaraju kavernozi prostor. Za razliku od slijeganja koje se odvija polako, urušavanje pokrova kohezivnih naslaga tla je brzo, a obično se javlja unutar nekoliko minuta ili sati. Urušavanje pokrova je najznačajnije tijekom razdoblja obilnih kiša, jer voda značajno povećava ukupnu težinu tla, a istovremeno smanjuje čvrstoću tla i stabilnost luka (Tomic i dr., 2021).

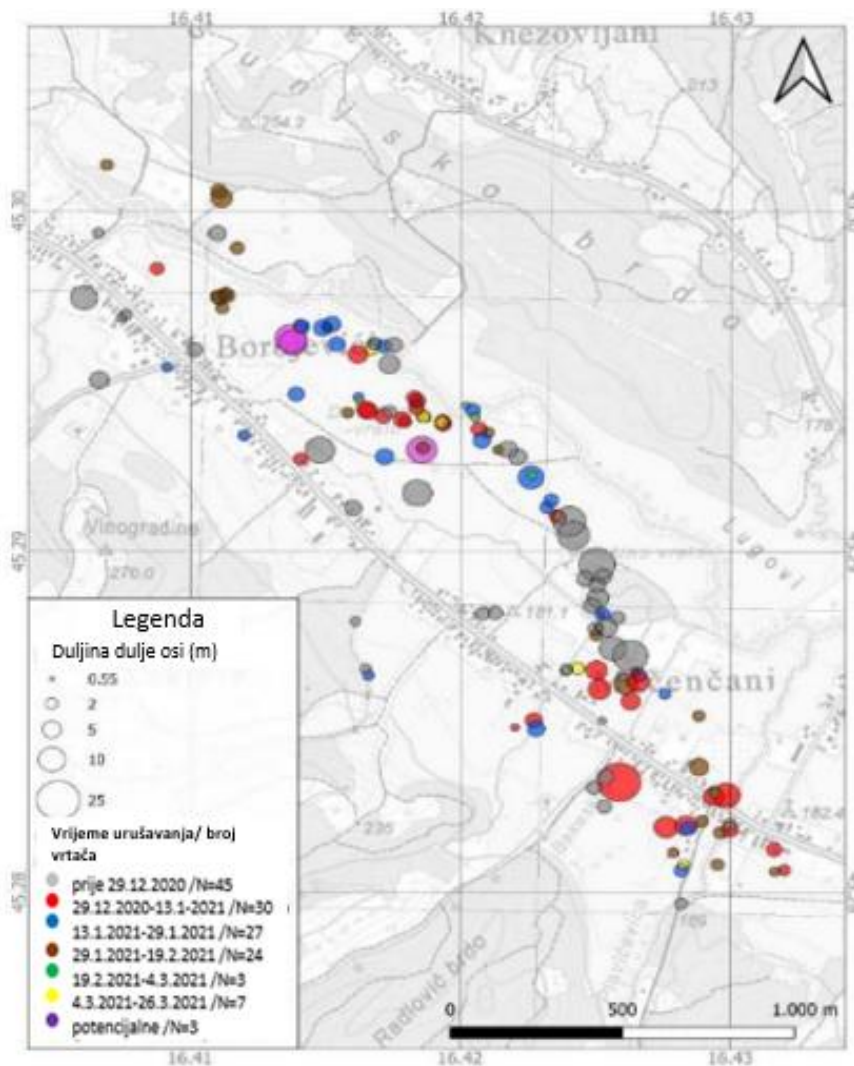
U području naselja Mečenčani i Borojevići prirodna geološka sredina upravo je takva da pogoduje urušavanju pokrovnih (pripovršinskih) naslaga iznad okršene podloge i stvaranju vrtača. Prema iskazima lokalnog stanovništva utvrđeno je da se na tom području kontinuirano, ali rijetko stvaraju nove vrtače. Naknadnim opažanjima, utvrđeno je na istraživanom području postojanje 45 vrtača s fosilnim pokrovom, čiji promjer varira, a najveće su bile promjera od 10 i 18 metara. No, glavni potres te serija naknadnih manjih potresa ubrzali su prirodne procese, što je rezultiralo stvaranjem 91 nove vrtače u roku od samo tri mjeseca. Slika 3-10 prikazuje osnovnu geološku kartu (M 1:100 000) s prikazanim položajem vrtača. Crnom bojom označene su postojeće, fosilne vrtače, a crvenom bojom

označene su vrtače nastale nakon potresa. Na ponekim mjestima otvorile su se u blizini vrtača s fosilnim pokrovom. Takva varijabilnost ukazuje na heterogenost i nepredvidljivost krških formacija na tom području. Također, pretpostavlja se da je visoka razina podzemne voda prisutna prije nastanka potresa dodatno potaknula intenzivno urušavanje (Tomac i dr., 2021).



**Slika 3-9** Osnovna geološka karta Hrvatske s prikazanim vrtačama (Tomac i dr., 2021)

Na slici 3-11 prikazane su lokacije vrtača koje su podijeljene prema vremenu pojavljivanja i veličini. Sivim kružićima prikazane su vrtače s fosilnim pokrovom, odnosno vrtače koje su postojale prije potresa. Najveći broj vrtača formiran je upravo na području između naselja Borojevići i Mečenčani, uključujući Pašino vrelo. Crvena i plava boja prikazuje vrtače nastale unutar mjesec dana nakon potresa. Smeđa i zelena boja prikazuju vrtače nastale otprilike dva mjeseca od potresa, dok žuta boja prikazuje vrtače nastale skoro tri mjeseca nakon potresa. Najveća vrtača, nastala u Mečančima, je promjera 25x23 m i dubine 11,7 m. Osim navedenih 136 vrtača (45 fosilnih i 91 novih), još su uočene i tri potencijalne koje su prikazane ljubičastom bojom (Tomac i dr., 2021).



Slika 3-10 Topografska karta s prikazom vrtača prema vremenu pojavljivanja i veličini (Tomac i dr., 2021)

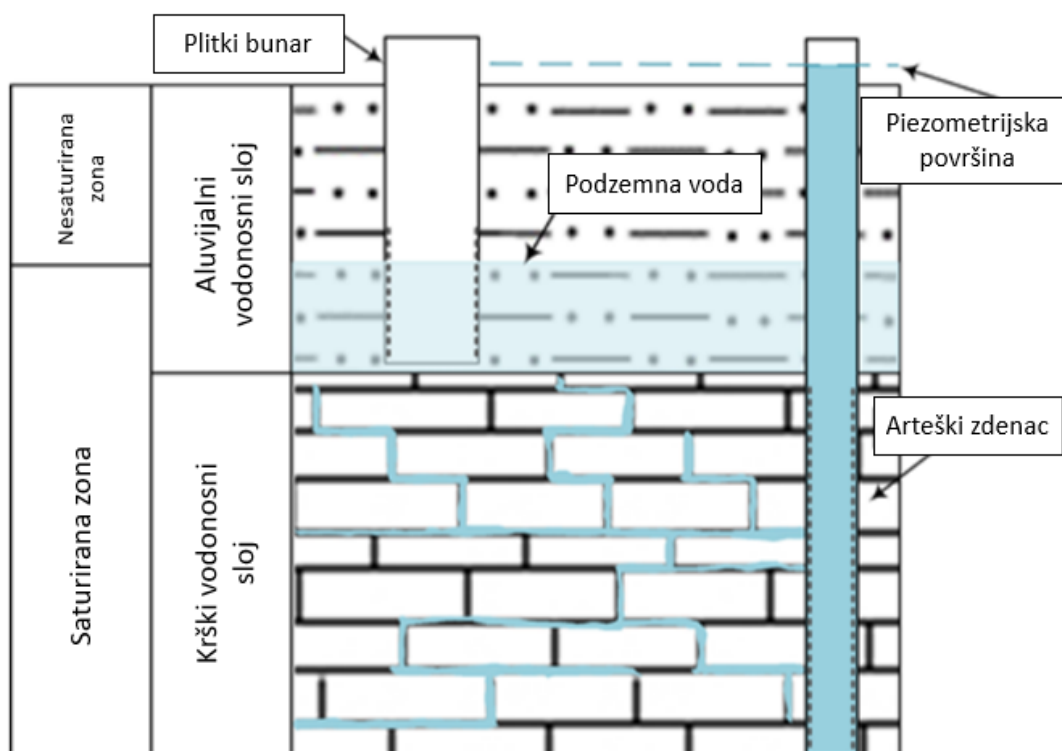
### 3.3. Hidrogeološke karakteristike područja sela Mečenčani i Borojevići

Prema Tomac i dr. (2021), dolina rijeke Sunje u Mečenčanima i Borojevićima predstavlja ravno područje pokriveno kvartarnim naslagama pijeska, praha i gline. Naslage su prosječne debljine oko 10 metara. Materijal karakterizira mala propusnost koja sadrži određenu količinu vode. On stvara neograničeni vodonosni sloj iz kojeg je moguće iskorištavati manju količinu vode. Zbog toga većina stanovništva koristi vodu iz plitko iskopanih bunara (dubine od oko 8 metara).

Promjena razine podzemne vode u aluvijalnom vodonosnom sloju iznosi oko 2 m. Taj aluvijalni vodonosnik podložen je dobro propusnim krškim vodonosnikom u kojem, tijekom vlažnih razdoblja, pritisak vode postaje subarteški do arteški. Promjena razine podzemne vode u krškom vodonosniku manja je nego u aluvijalnom, osim u blizini crpne stanice Pašino

vrelo. Tamo su oba vodonosna sloja pod utjecajem režima rada bušotine tj. količine crpljenja koja iznosi 38 l/s (Tomac i dr., 2021).

Tomac i dr.(2021), navode da su aluvijalni i krški vodonosni slojevi hidraulički povezani i čine jedinstveni sustav. Promjena tlaka u jednom vodonosnom sloju uzrokuje promjenu hidrauličkih uvjeta u drugom sloju. Dopunjavanje krškog vodonosnika isključivo se vrši padalinama u okolnim brdima građenim od litotamijskih vapnenaca i kalkarenita. Potres se dogodio u razdoblju visokih voda. Tada je razina vode u aluvijalnom vodonosniku bila blizu površine, dok su u krškom vodonosniku prevladavali arteški uvjeti. Piezometarska razina bila je desetak centimetara iznad površine. Navedeni uvjeti prikazani su na slici 3-12.

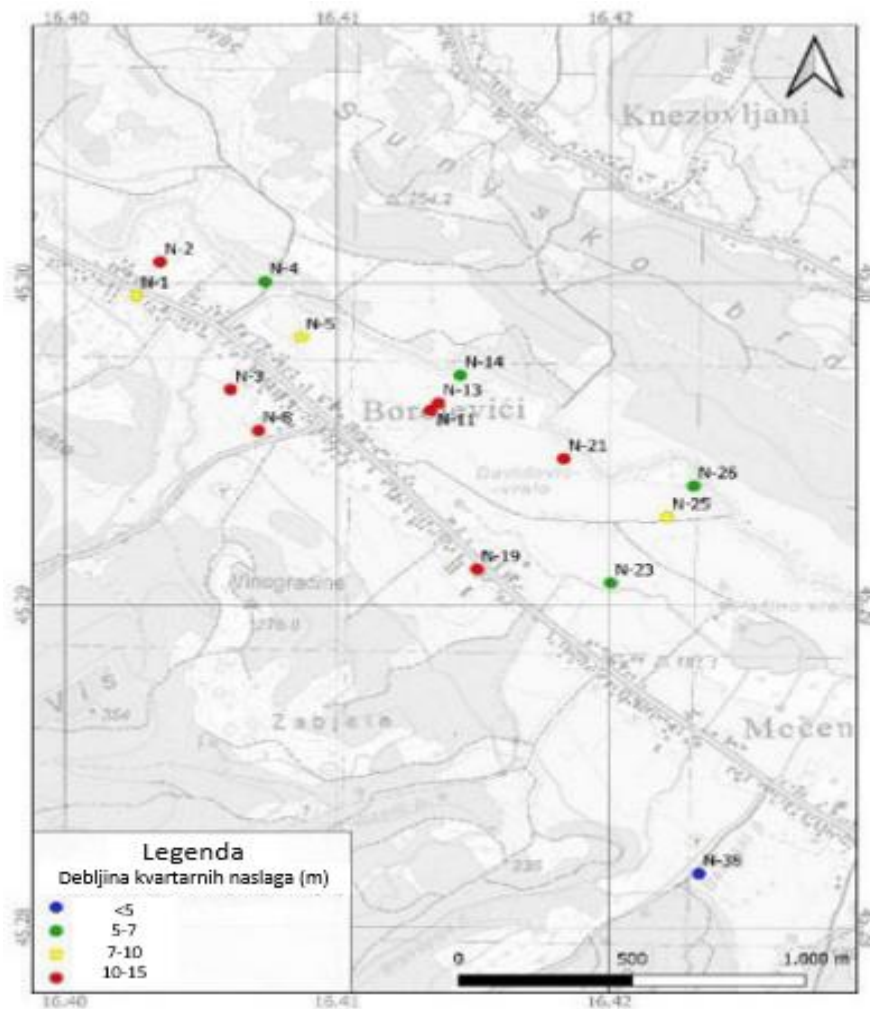


**Slika 3-11** Hidrogeološki uvjeti vodonosnog sistema tijekom potresa (prema Tomac i dr., 2021)

#### 3.4. Vrtače nastale na području sela Borojevići

Brojne vrtače u području sela Borojevići, nastale su u blizini rijeke Sunje. Slika 3-13 prikazuje nastale vrtače u naselju Borojevići. Na slici je vidljivo da je na tom području, u kojem su debljine kvartarnih naslaga od 5 do 15 m, stvoreno nekoliko vrtača (Tomac i dr., 2021).





Slika 3-12 Prosječne debljine krša na području između Mečenčana i Borojevića

Vrtače nastale u selu Borojevići imaju relativno manji promjer i dubinu, a karakterizira ih nekoliko specifičnih značajki. Tomac i dr. (2021) navode da su većinom okomite, a urušeni materijal čine glina i glinoviti šljunci. Upravo na uzorcima tla oko vrtača nastalih u Borojevićima provedeno je ispitivanje posmične čvrstoće. Ispitivanje se provodilo na uzorcima iz bušotina B-3 i B-4 oko dvije karakteristične vrtače (slike 3-14 i 3-15).



**Slika 3-13** Vrtača za uzorke iz bušotine B-3 (Tomac i dr., 2021)



**Slika 3-14** Vrtača za uzorke iz bušotine B-4 (Tomac i dr., 2021)

#### 4. LABORATORIJSKA ISPITIVANJA POSMIČNE ČVRSTOĆE TLA U POKROVNIM NASLAGAMA URUŠNIH VRTAČA

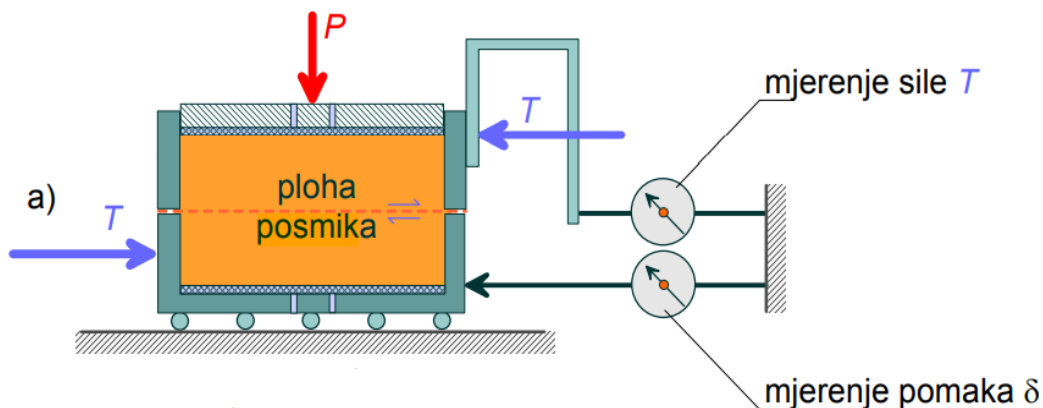
Urušne vrtače rijetko se događaju u Hrvatskoj. Ta pojava, nakon serije potresa, dovela je do velike zainteresiranosti inženjera i znanstvenika. Na terenu su provedena brojna geofizička i geotehnička istraživanja s uzimanjem uzoraka tla. Za daljnje ispitivanje odabrani su neporemećeni uzorci tla oko dvije karakteristične vrtače. Najprije je provedena terenska identifikacija i klasifikacija tla, koja je kasnije nadopunjena laboratorijskim pokusima. Na odabranim uzorcima iz pokrovnih naslaga ispitivana je posmična čvrstoća tla, što će u nastavku biti detaljno opisano.

##### 4.1. Pokus izravnog smicanja

Izravni posmik jedan je od najjednostavnijih i najčešćih pokusa određivanja čvrstoće tla. Cilj pokusa je određivanje parametara čvrstoće tla u dreniranim uvjetima. Ispitivanje se provodi u dvije faze na dva ili više ispitnih uzoraka.

U prvoj fazi ispitni uzorci se konsolidiraju na različitim vertikalnim naprezanjima. Prati se vremenski tijek slijeganja i određuje vrijeme za 50 % ( $t_{50}$ ) i 100 % ( $t_{100}$ ) primarne konsolidacije. Dobiveni podaci koriste se za određivanje brzine posmika. S obzirom da se u pokusu ne mjere porni tlakovi, smicanje mora biti relativno sporo. Takvim načinom će se postići potpuna disipacija (raspršenje) pornih tlakova u uzorku. (Mulabdić,2018).

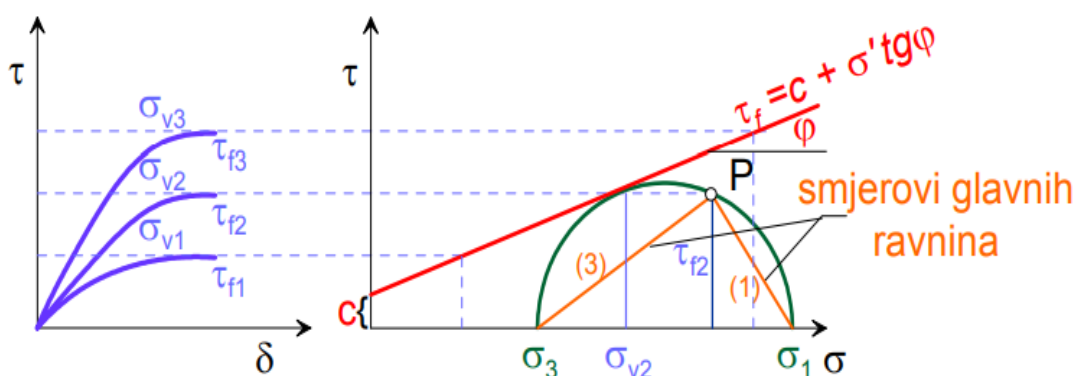
Nakon što se postigne potpuna konsolidacija uzorka, započinje druga faza - smicanje. Cilj pokusa je izazivanje sloma tla po unaprijed definiranoj, horizontalnoj, plohi sloma. Smicanje se postiže razdvojenom metalnom kutijom. Jedan dio metalne kutije je nepokretan, a drugi dio se posmiče, djelovanjem sile klipa, u odnosu na prvi dio (Mulabdić,2018). Shematski prikaz uređaja prikazan je na slici 3-1.



Slika 4-1 Shematski prikaz uređaja za izravni posmik (Kvasnička i Domitrović, 2007)



Prema Mulabdić (2018) rezultati ispitivanja prikazuju se u obliku tri dijagrama. Prvi dijagram prikazuje odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka. Drugi dijagram prikazuje odnos posmičnih naprezanja i horizontalnih pomaka. Čvrstoća tla definira se kao najveće posmično naprezanje koje uzorak, pri zadanom normalnom napreznju, može podnijeti. Iz drugog dijagrama očitavaju se vršne vrijednosti posmičnih naprezanja koje su važne za konstruiranje trećeg dijagrama ( slika 3-2 ). Pomoću očitanih vrijednosti vršnih posmičnih naprezanja i izračunatih normalnih naprezanja dobije se zadnji dijagram. Aproksimacijom Mohr - Coulombovog pravca čvrstoće kroz točke dobiju se parametri čvrstoće tla: kohezija ( $c$ ) i kut unutarnjeg trenja ( $\varphi$ ). Kohezija je odsječak pravca na osi posmičnog naprezanja (  $y$ -osi ), a nagib pravca predstavlja kut unutarnjeg trenja.



**Slika 4-2** Pokus izravnog smicanja (Kvasnička i Domitrović, 2007)

Iako je pokus izravnog smicanja relativno jednostavan i daje podatke o čvrstoći tla, ima nekoliko nedostataka. Prema Kvasnička i Domitrović (2007) nedostaci uređaja za izravni posmik su:

- ne mjeri porni tlak pa je ukupna i efektivna naprezanja, kao i drenirano i nedrenirano stanje teško razlikovati,
- tijekom pokusa dolazi do smanjenja površine poprečnog presjeka što otežava proračun stanja naprezanja na ravnini sloma,
- između okvira kutije koja se smiče javlja se trenje koje se ne može izmjeriti,
- bočno širenje je spriječeno pa se prije ispitivanja, na uzorak, mogu postaviti samo stanja naprezanja koja odgovaraju stanju mirovanja ( $K_0$ ); stvarna naprezanja se u tlu pojavljuju u raznim drugim varijantama.

#### 4.2. Opis uzoraka tla

Pokus smicanja proveden je na neporemećenim uzorcima dobivenim rotacijskom ručnom bušilicom, te uzorkovanjem pomoću cilindra. Bušotine su izvedene na relativno malim dubinama, jer je oprema za ručno bušenje imala poteškoća s prodorom kroz aluvijalne naslage (Tomac i dr., 2021). Bušenje se provodilo na dvije lokacije u naselju Borojevići. Slika 4-3 prikazuje lokaciju bušotine B-3 (S009), a slika 4-4 lokaciju bušotine B-4 (S040). Obje bušotine nalaze se sjeverno od naselja Borojevići.



Slika 4-3 Lokacija bušotine B-3 (Tomac i dr., 2021)



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

Prije smicanja, određen je granulometrijski sastav uzoraka kombiniranom analizom. Također, provedeni su laboratorijski pokusi određivanja granica plastičnih stanja. Na slici 4-5 nalazi se prvi uzorak koji je, na temelju rezultata ispitivanja, klasificiran kao glina srednje plastičnosti (CI).



**Slika 4-5** Prvi uzorak (B-3)

Drugi uzorak (slika 4-6) klasificiran je kao mješavina glina i praha srednje plastičnosti (CI/MI).



Slika 4-6 Drugi uzorak (B-4)

Rezultati ispitivanja granica plastičnih stanja nalaze se u tablici 4-1.

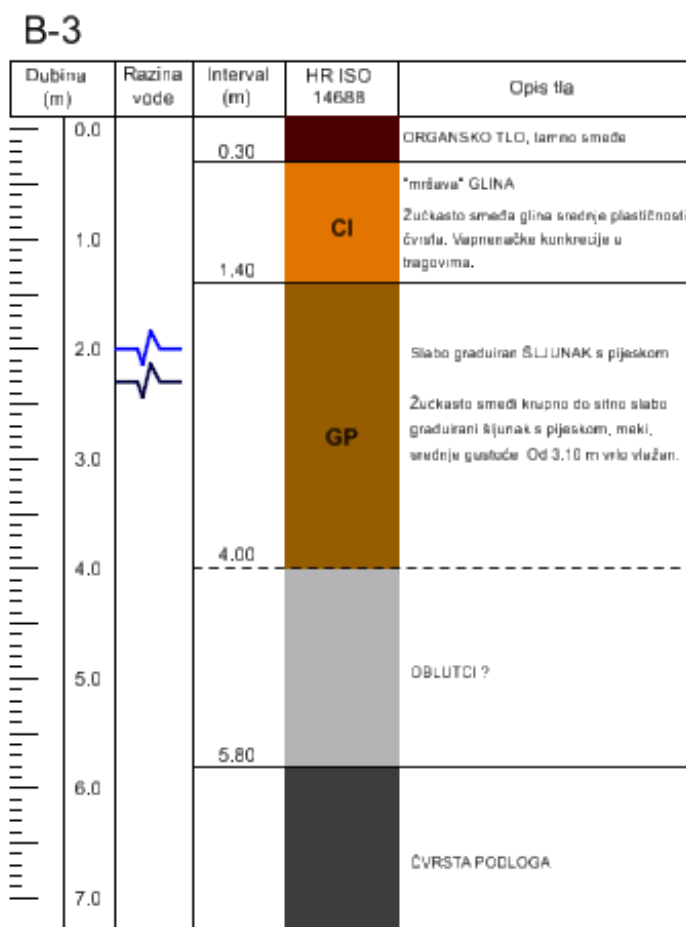
Tablica 4-1 Rezultati ispitivanja granica plastičnih stanja uzoraka 1 i 2

	uzorak 1 ( B-3)	uzorak 2 (B-4)
prirodna vlažnost, $w$ (%)	28,7	25,9
granica tečenja, $w_L$ (%)	46,4	43,1
granica plastičnosti, $w_P$ (%)	24,3	26,2
indeks plastičnosti, $I_P$	22,1	16,9
indeks konzistencije, $I_c$	0,80	1,02
indeks tečenja, $I_L$	0,20	-0,02
klasifikacija tla	<b>CI</b>	<b>CI/MI</b>

Osim uzorkovanja i određivanja razine podzemne vode, na terenu je još proveden standardni penetracijski pokus (SPT) i dinamički penetracijski test (DPL) (Tomic i dr., 2021). Na temelju rezultata ispitivanja napravljeni su bušotinski profili.

Na slici 3-6 prikazan je bušotinski profil B-3. Plitko do dubine od 0,3 m nalazi se organsko tlo. Ispod njega, do dubine od 1,40 metara, nalazi se „mršava“ glina žuto-smeđe

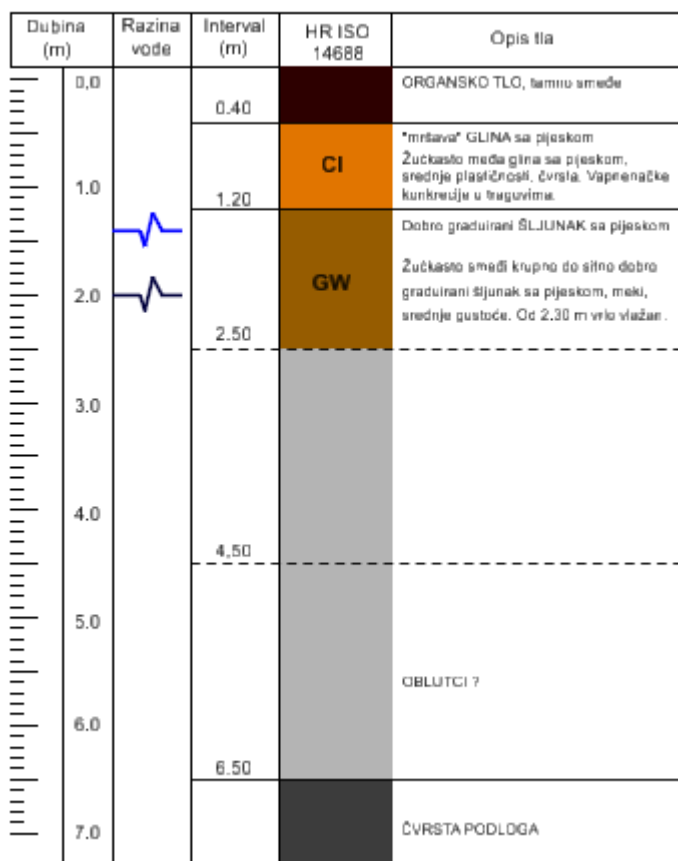
boje i srednje plastičnosti. Slijedi sloj slabo graduiranog šljunka s pijeskom ispod kojeg se, pretpostavlja, da se nalaze oblutci.



**Slika 4-7** Bušotinski profil B-3 (prema Tomac i dr., 2021)

Na slici 3-7 nalazi se bušotinski profil B-4. Ispod organskog tla, na dubini od 0,4 do 1,20 m nalazi se sloj gline. Sloj je opisan kao „mršava“ glina srednje plastičnosti s pijeskom. Slijedi ga sloj dobro graduiranog šljunka s pijeskom ispod kojeg se pretpostavlja da se nalaze oblutci.

## B-4



Slika 4-8 Bušotinski profil B-4 (prema Tomac i dr., 2021)

Uzorci na kojima su provedena laboratorijska ispitivanja izvađeni su iz obje bušotine na dubinama od 1,0 do 1,3 m. Iako se nalaze na različitim lokacijama, prema profilu i granicama plastičnosti, uzorci pripadaju istoj geotehničkoj sredini.

### 4.3. Postupak ispitivanja

Ispitivanje čvrstoće tla izravnim posmikom provedeno je u uređaju Digishear, proizvođača Wykeham Farrance. Digishear nudi mogućnost provedbe pokusa izravnog i reversnog smicanja.

Postupak ispitivanja u uređaju definiran je normom ASTM D3080/D3080M-11. Prema normi, tijekom ispitivanja sastoji se od nekoliko faza.

Prvi korak je sastavljanje kutije. Uređaj se sastoji od dvodjelne čelične kutije u koju se ugrađuje uzorak. Prije sklapanja, kontakt između gornjeg i donjeg dijela kutije premaže se vazelinom. Tako se smanjuje trenje na kontaktu i olakšava smicanje. Kutije se zatim



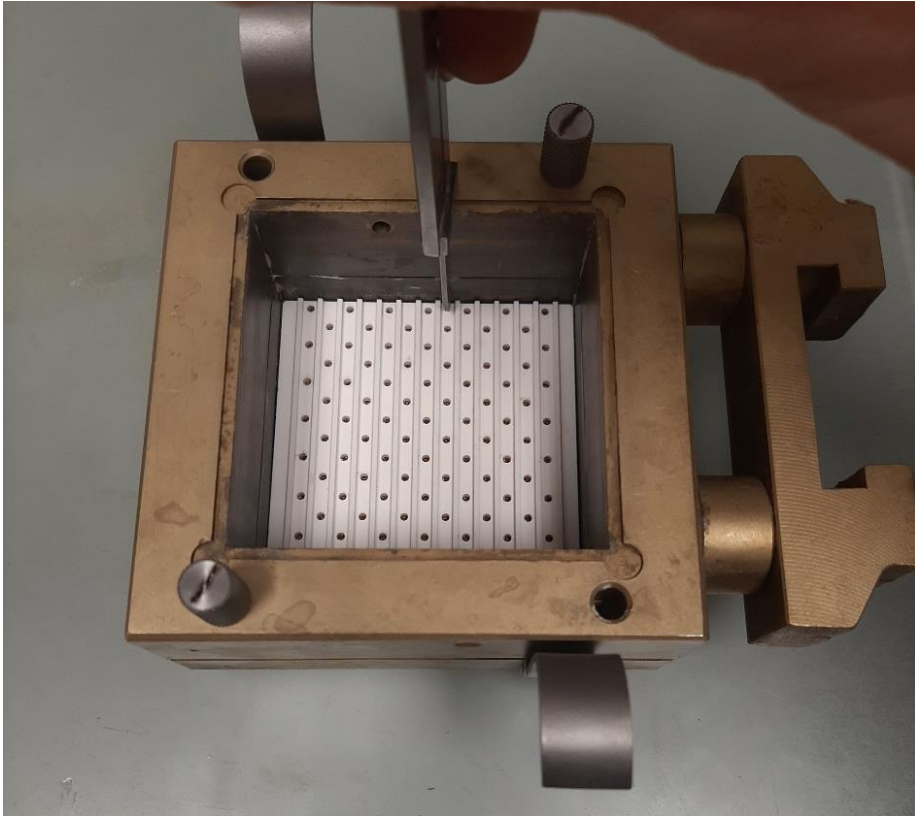
pričvrste vijcima. Dijelovi čelične kutije, pločice i oprema za ugradnju uzorka prikazani su na slici 4-9.



**Slika 4-9** Dijelovi uređaja za smicanje

Potrebno je izmjeriti unutrašnje dimenzije kutije  $L_1$  i  $L_2$  te izračunati površinu uzorka  $A_0$ . U donji dio kutije postavi se dno čiji su žlijebovi pozicionirani u smjeru smicanja. Na dno se postavljaju perforirana i porozna pločica, koje su prethodno bile natopljene u destiliranoj vodi. Kako bi se s obje strane postiglo dreniranje, porozne se pločice postavljaju i na donju i gornju površinu uzorka.

Zatim se četiri puta mjeri visina od donje porozne pločice do vrha kutije, računa se srednja vrijednost i dobije prosječna visina,  $h_1$  (slika 4-10).



**Slika 4-10** Mjerenje visine  $h_1$

Nakon postavljanja kutije slijedi priprema uzorka. U uzorak se utiskuje metalni kvadratni kalup dok uzorak ne zapuni cijeli prostor kalupa (slika 4-11). Višak uzorka se ukloni, a površine zaglade.



**Slika 4-11** Utiskivanje uzorka u kalup



Početna masa ugrađenog uzorka dobije se oduzimanjem mase uzorka s kalupom i mase samog kalupa. Potrebno je odrediti i početnu vlažnost uzorka koji se ugrađuje. Višak uzorka stavlja se u staklenu posudu, mjeri se masa vlažnog uzorka s posudom, i stavlja u sušionik na 24 sata. Iz mase vlažnog i suhog uzorka, izračunava se prirodna vlažnost.

Uzorak se pomoću bata utiskuje u kutiju. Slika 4-12 prikazuje ugrađenu kutiju s uzorkom u uređaju. Odredi se debljina perforirane i porozne pločice,  $t_p$ , pa se zatim postave na površinu uzorka. Četiri se puta mjeri udaljenost od gornje porozne pločice do vrha kutije. Srednja vrijednost predstavlja  $h_2$  – visinu od gornje porozne pločice do vrha kutije.



**Slika 4-12** Ugrađena kutija s uzorkom

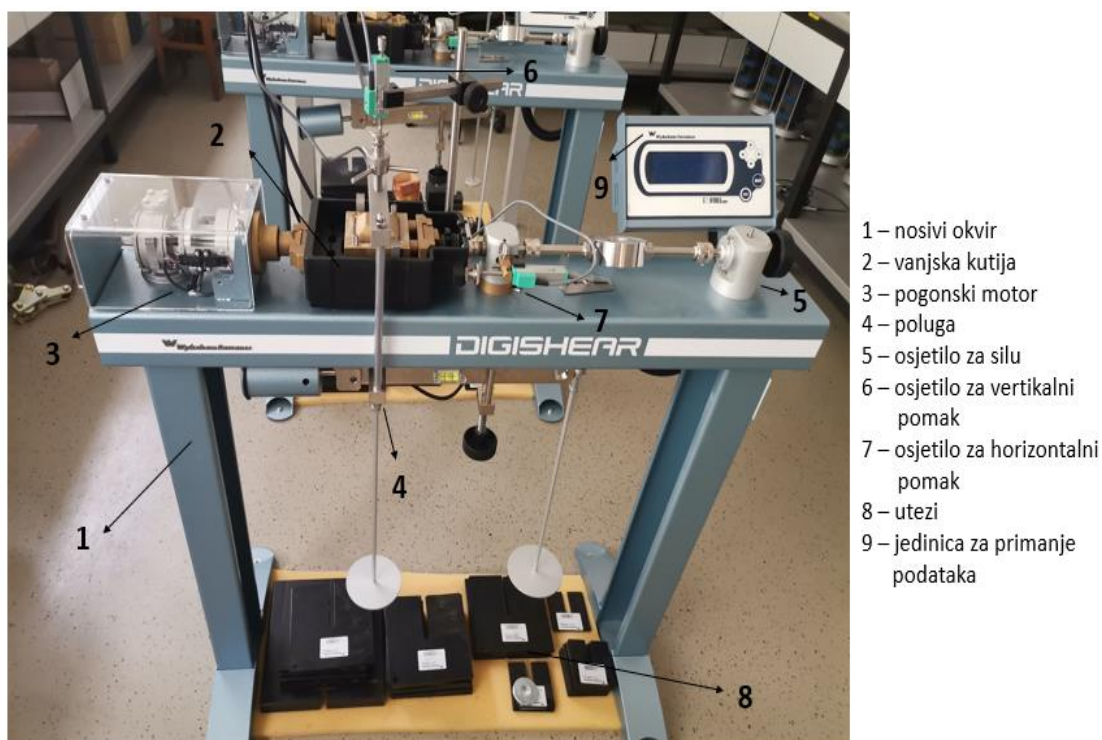
Na gornju površinu uzorka postavlja se kapa čiji se žljebovi također pozicioniraju u smjeru smicanja.

Uređaj za izravni posmik sastoji se od nosivog okvira, pogonskog motora, poluge koja služi za nanošenje vertikalnog opterećenja, vanjske posude u koju se stavlja kutija za smicanje i tri mjerna instrumenta (osjetila). To su osjetilo za silu, osjetilo za vertikalni pomak i osjetilo za horizontalni pomak. Osjetilo za vertikalni pomak mjeri vertikalnu deformaciju

– slijeganje, a osjetilo za horizontalni pomak mjeri horizontalnu deformaciju – pomak. Osjetila i osnovni dijelovi uređaja prikazani su na slici 4-13.

Kutija s ugrađenim uzorkom postavlja se u uređaj i učvršćuje vijcima. Polugu treba namjestiti tako da bude horizontalna. Pozicioniraju se osjetilo sile te osjetila za vertikalni i horizontalni pomak. Sva osjetila spojena su na jedinicu za primanje podataka koja je povezana s računalom. To omogućuje konstantno praćenje deformacija i naprezanja u uzorku.

Prije pokretanja uređaja potrebno je pripremiti mase utega. Mase ovise o željenom vertikalnom opterećenju. Ispitivanje se provodilo s opterećenjima od 25, 50, 100, 200 i 400 kPa pa su se mase utega kretale od 0,85 do 14,50 kg. Na računalu se pokreće pokus smicanja. Utezi se stavljaju na polugu, kutija s uzorkom se zalije vodom i započinje faza konsolidacije koja traje otprilike 24 sata.

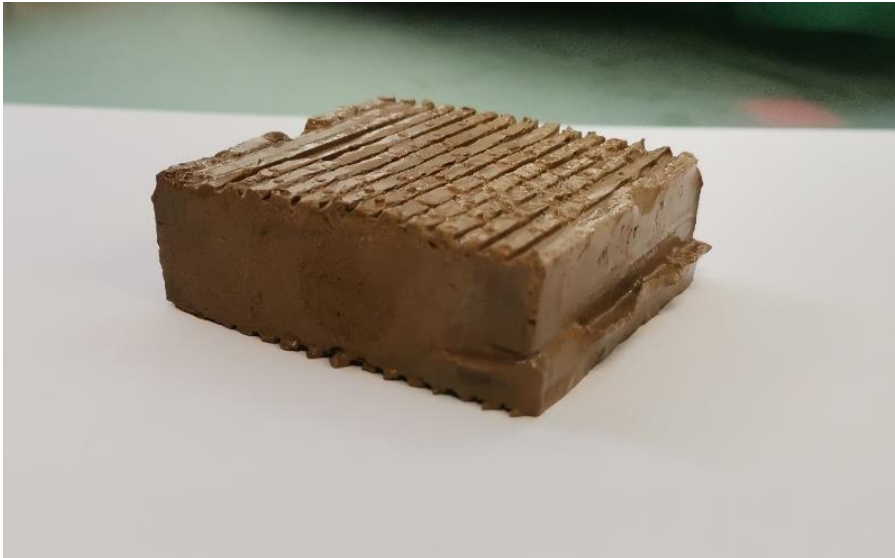


**Slika 4-13** Dijelovi uređaja za izravni posmik

Nakon konsolidacije uzorka, pokus se kratko zaustavlja radi podešavanja za drugu fazu. Za sprječavanje stvaranja kontakta vijaka s donjom kutijom prilikom smicanja, oni se uklanjaju. Okretajem posebnih vijaka, za dva okreta, podiže se gornji dio kutije. U računalu se unosi brzina posmika izračunata na temelju konsolidacijskih svojstava tla (u našem slučaju korištena je brzina 0,01 mm/min) i započinje postupak smicanja. Gornji dio kutije pomiče se u horizontalnom smjeru u odnosu na donji i izaziva se posmik. Nakon što se

ostvari maksimalna 20% horizontalna deformacija smicanje se završava. Uzorak se zatim podvrgava reversnom pa opet direktnom smicanju.

Završetkom smicanja, uzorak se izgrađuje, stavlja u posudu i određuje se masa vlažnog uzorka nakon ispitivanja. Izgrađeni uzorak prikazan je na slici 4-14. Slijedi 24 sata sušenja uzorka na temperaturu od 110 °C. Nakon ispitivanja određuje se vlažnost uzorka.



**Slika 4-14** Uzorak nakon ispitivanja

## 5. REZULTATI ISPITIVANJA

Na prvom uzorku, iz bušotine B-3, ispitivanje se provodilo na dva ispitna uzorka, a na uzorku iz bušotine B-4 ispitivanje se provodilo na pet ispitnih uzoraka s različitim opterećenjem. Rezultati ispitivanja dobiveni su u tekstualnom formatu. Potom su uneseni u računalni program MS Excel radi obrađivanja i interpretacije, a za crtanje grafova korišten je Microstation OpenRoads Designer.

### 5.1. Obrada podataka

Prije crtanja samih grafova potrebno je odrediti normalno naprezanje i posmična naprezanja. Normalno naprezanje (jednadžba 5.1.) predstavlja omjer normalne sile i površine poprečnog presjeka uzorka.

$$\sigma_n = \frac{N}{A \cdot 1000} \left( \frac{kN}{m^2} \right) \quad (5.1.)$$

gdje je:

$\sigma_n$  – normalno naprezanje (kN/m<sup>2</sup>)

N – normalna sila (N)

A – površina poprečnog presjeka uzorka (m<sup>2</sup>)

Normalna sila dobije se umnoškom mase utega na poluzi (ovisno o korištenom opterećenju), gravitacije i omjera poluge. Jednadžba za dobivanje vrijednosti normalne sile prikazana je jednadžbom 5.2.

$$N = m_{ut} * g * 10 \text{ (N)} \quad (5.2.)$$

gdje je:

N – normalna sila (N)

$m_{ut}$  – masa utega na poluzi (kg)

g – ubrzanje sile teže (9,81 m/s<sup>2</sup>)

10 – omjer poluge

Površina poprečnog presjeka uzorka izračunava se prema jednadžbi 5.3., a definira se kao umnožak dimenzija kutija.

$$A = L_1 \times L_2 \text{ (mm}^2\text{)} \quad (5.3.)$$

gdje je:

$L_1$  – unutrašnja dimenzija kutije (mm)

$L_2$  – unutrašnja dimenzija kutije (mm)

Posmična naprezanja izračunavaju se za svako očitavanje prema formuli 5.4., pri kojoj je posmično naprezanje omjer posmične sile i površine poprečnog presjeka uzorka.

$$\tau = \frac{T}{A \cdot 1000} \left( \frac{kN}{m^2} \right) \quad (5.4.)$$

gdje je:

$\tau$  – posmično naprezanje ( $kN/m^2$ )

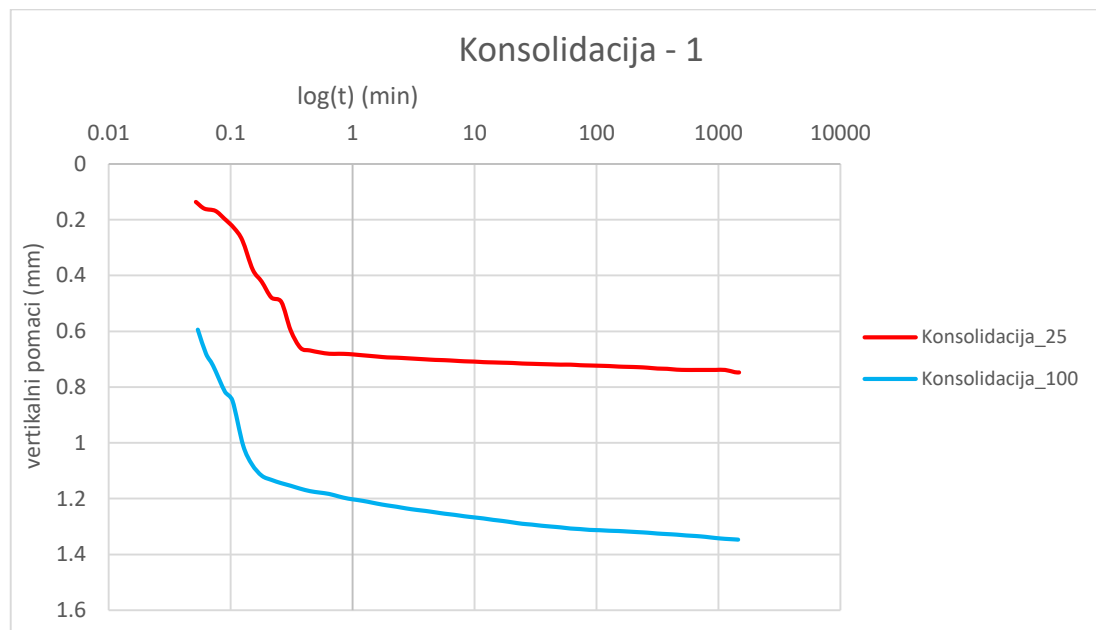
T – očitana posmična sila (N)

A – površina poprečnog presjeka uzorka ( $m^2$ )

Nakon što se odrede normalna i posmična naprezanja pristupa se crtanju grafova.

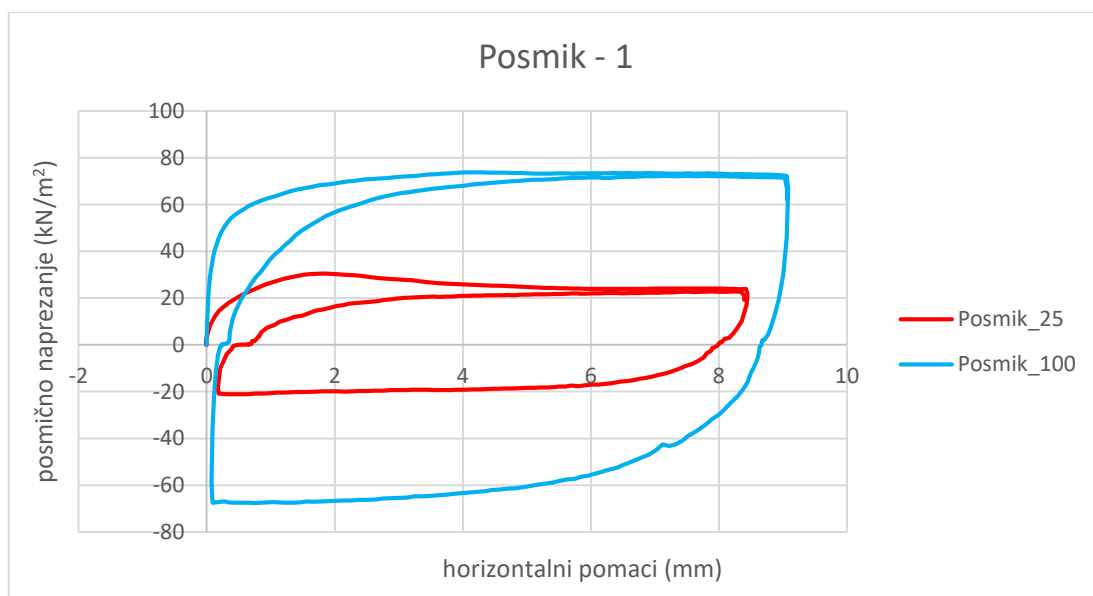
## 5.2. Rezultati ispitivanja uzorka 1

Na uzorku 1, ispitivanje se provodilo na dva ispitna uzorka s opterećenjima od 25 i 100 kPa. Slika 5-1 prikazuje odnos vertikalnih pomaka u vremenu - slijeganje. Iz slike je vidljivo da je slijeganje veće u uzorku koji je ispitivan pri većem opterećenju, te za isto vremensko razdoblje vertikalni pomak iznosi 1,35 mm. To je gotovo dvostruko veće u odnosu na uzorak s manjim opterećenjem, gdje je maksimalni vertikalni pomak iznosio 0,75 mm.



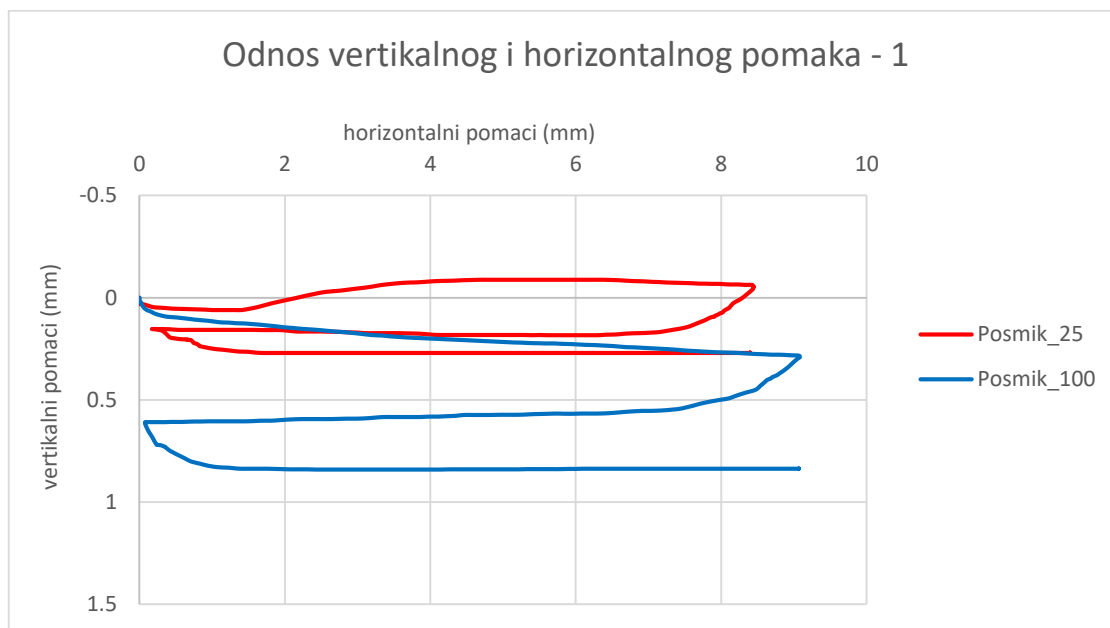
Slika 5-1 Konsolidacija uzorka 1

Slika 5-2 prikazuje odnos horizontalnih pomaka i posmičnog naprezanja – posmik. Iz slike je uočljivo da su porastom horizontalnih pomaka rasla i posmična naprezanja sve dok se nije postiglo najveće posmično naprezanje tj. vršna čvrstoća. Reversnim, pa ponovno direktnim smicanjem dolazi do rasta posmičnih naprezanja, ali ona više ne dosežu vršnu čvrstoću.



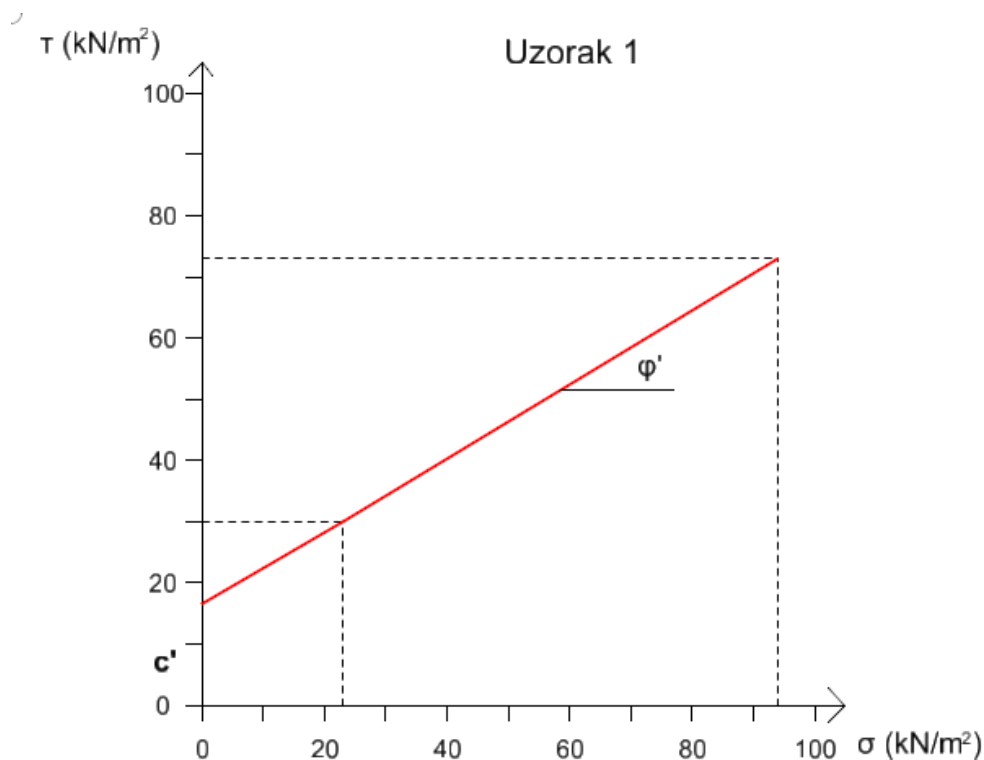
Slika 5-2 Posmik uzorka 1

Odnos vertikalnih i horizontalnih pomaka u fazi smicanja prvog uzorka prikazan je na slici 5-3. U uzorku s većim opterećenjem postignuti su veći horizontalni i dvostruko veći vertikalni pomaci u odnosu na uzorak s manjim opterećenjem.



Slika 5-3 Odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka prvog uzorka

Iz slike 5-2 očitana su najveća posmična naprezanja koja tlo može podnijeti prije sloma. Prethodnim izračunavanjem normalnog naprezanja i očitavanjem posmičnih naprezanja, konstruiran je graf ovisnosti normalnog naprezanja i posmične čvrstoće (slika 4-4). Aproksimacijom Mohr–Coulombovog pravca kroz točke dobiveni su vršni parametri čvrstoće tla. Vrijednost kohezije iznosi  $16,56 \text{ kN/m}^2$ , a kuta unutarnjeg trenja  $31,2^\circ$ .

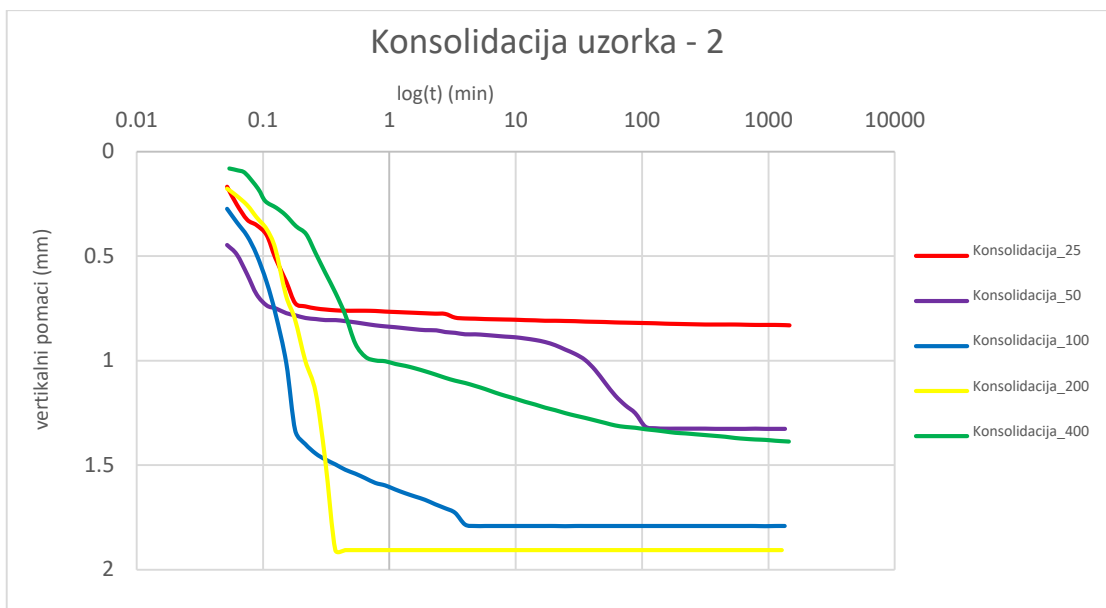


**Slika 5-4** Parametri čvrstoće uzorka 1

### 5.3. Rezultati ispitivanja uzorka 2

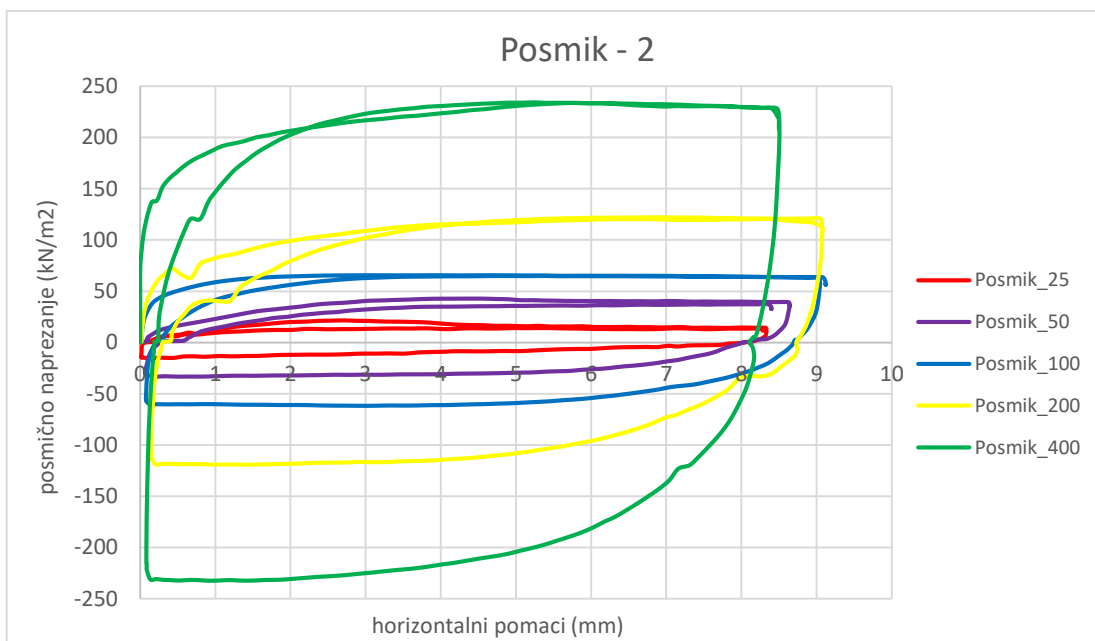
Ispitivanje drugog uzorka provedeno je s pet različitih opterećenja. Opterećenja su iznosila 25, 50, 100, 200 i 400 kPa. Ovisnost vertikalnih pomaka o vremenu u fazi konsolidacije prikazan je na slici 5-5. Iz slike je vidljivo da su najmanji vertikalni pomaci ostvareni na uzorcima sa normalnim naprežanjem od 25 i 50 kPa, a najveći na uzorcima opterećenima sa 100 i 200 kPa. U istom vremenu, u uzorku opterećenim s 200 kPa maksimalni vertikalni pomak iznosio je 1,91 mm, dok su za uzorak koji je opterećen s 25 kPa vertikalni pomaci bili dvostruko manji (0,83 mm).





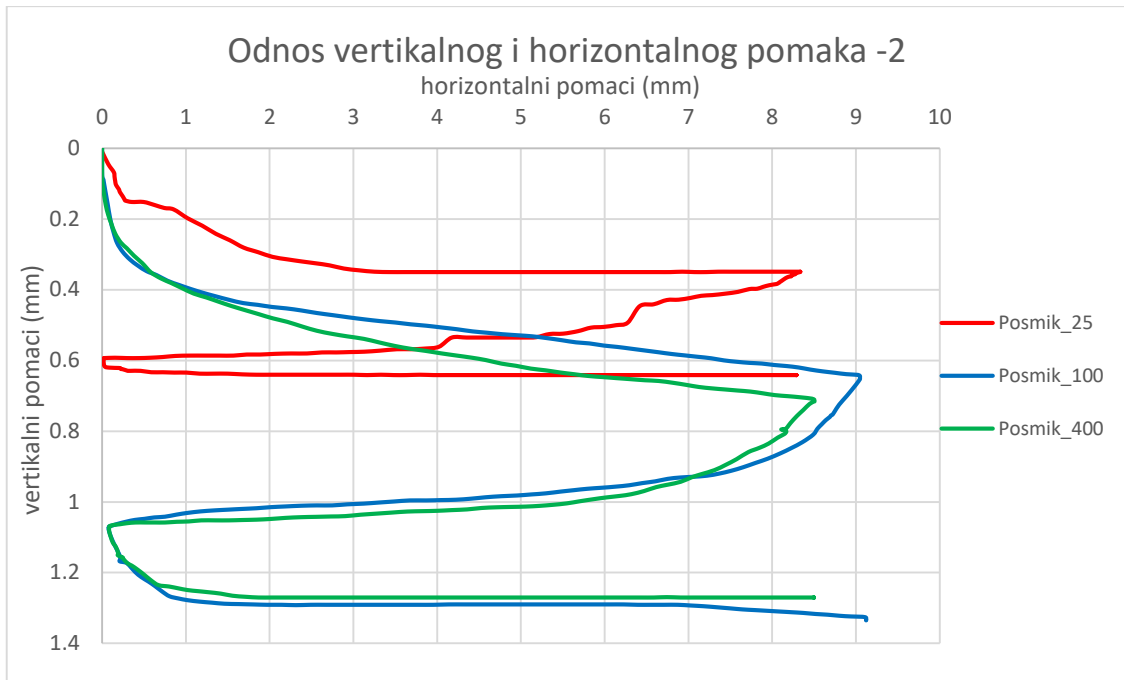
**Slika 5-5** Konsolidacija uzorka 2

Odnos horizontalnih pomaka i posmičnog naprezanja prikazan je na slici 5-6. Najmanje posmično naprezanje tj. vršna čvrstoća postignuta je u prvom ispitnom uzorku koji je opterećen s 25 kPa. Daljnjim povećanjem normalnog naprezanja rasle su i vršne čvrstoće uzoraka. Tako je najveće postignuto posmično naprezanje u uzorku opterećenim s 400 kPa, dok srednju vrijednost postiže uzorak opterećen sa 100 kPa.



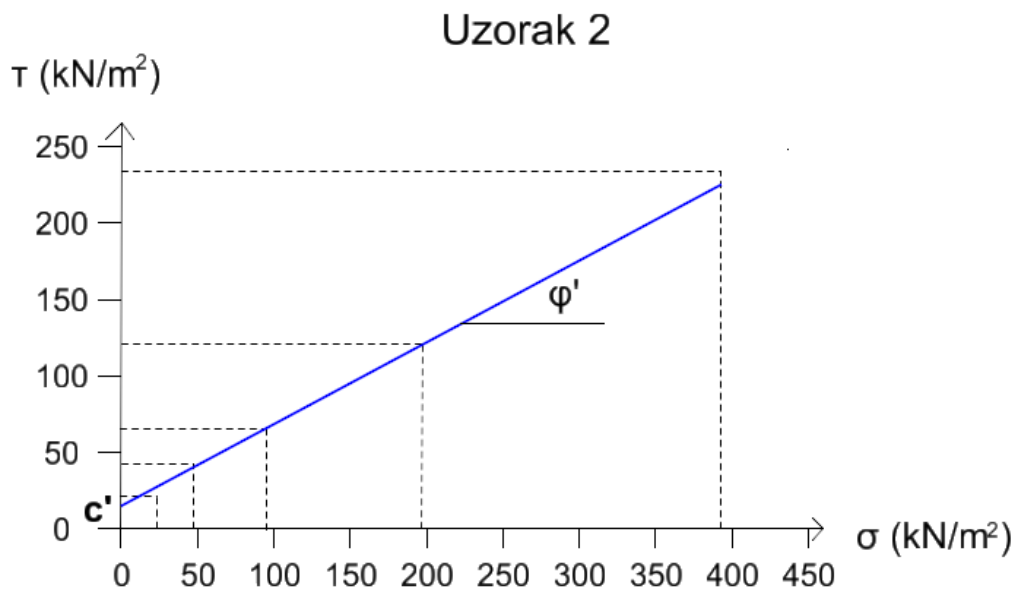
**Slika 5-6** Posmik uzorka 2

Na slici 5-7 prikazan je odnos horizontalnih i vertikalnih pomaka u fazi smicanja uzoraka opterećenih s 25, 100 i 400 kPa. U najmanje opterećenom ispitnom uzorku (25 kPa) ostvareni su dvostruko manji vertikalni pomaci u odnosu na uzorke s većim opterećenjem.



Slika 5-7 Odnos vertikalnog i horizontalnog pomaka drugog uzorka

Odnos najvećih posmičnih naprezanja i izračunatih normalnih naprezanja svakog ispitnog uzorka prikazan je Mohr–Coulombovim pravcem (slika 5-8), te su očitani parametri čvrstoće uzorka 2. Vrijednost kohezije iznosi  $15 \text{ kN/m}^2$ , a kut unutarnjeg trenja je  $26,8^\circ$ .



Slika 5-8 Parametri čvrstoće uzorka 2

#### 5.4. Usporedba rezultata

S obzirom da su uzorci uzeti s bliskih lokacija, i da su ispitivanja granica plastičnosti i bušotinski profili pokazali da pripadaju istoj geotekničkoj sredini, napravljena je njihova usporedba. Parametri čvrstoće uzorka 1 i 2 prikazani su u tablici 5-1. Iz tablice 5-1 vidljivo je da se parametri čvrstoće za uzorke 1 i 2 vrlo malo razlikuju.

**Tablica 5-1** Parametri čvrstoće uzoraka 1 i 2

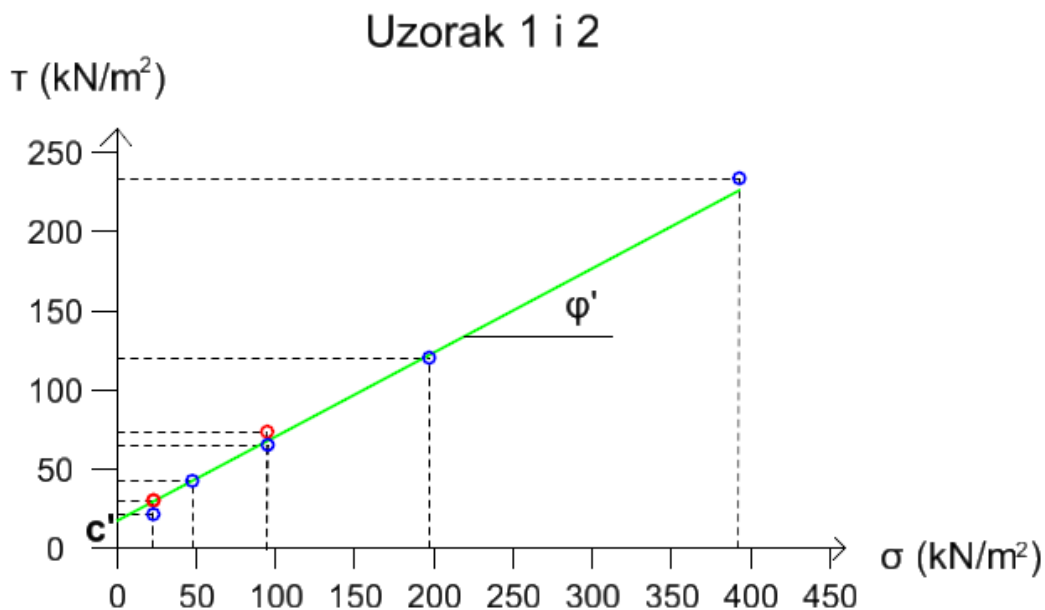
	Uzorak 1	Uzorak 2
$c'$ (kN/m <sup>2</sup> )	16,6	15,0
$\phi'$ (°)	31,2	26,8

Očitana najveća posmična naprezanja svih ispitnih uzoraka (sa slika 5-2 i 5-6) i izračunate vrijednosti normalnih naprezanja prikazane su u tablici 5-2.

**Tablica 5-2** Normalna naprezanja i posmična čvrstoća uzoraka 1 i 2

Opterećenje (kPa)	Uzorak 1		Uzorak 2	
	$\tau_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\tau_{\max}$ (kN/m <sup>2</sup> )	$\sigma_n$ (kN/m <sup>2</sup> )
25	30,49	23,05	21,72	23,01
50	-	-	42,08	47,53
100	73,81	94,74	65,50	95,06
200	-	-	120,29	196,91
400	-	-	233,74	392,5

Navedene vrijednosti iz tablice korištene su za konstruiranje grafa normalnog naprezanja i posmične čvrstoće reprezentativnih za jedinstvenu geotekničku sredinu (slika 5-9). Konstruiranjem Mohr–Columbovog pravca kroz sve točke prikazane u tablici 5-2 dobiveni su sljedeći parametri čvrstoće tla: kohezija 17,0 kN/m<sup>2</sup> i kut unutarnjeg trenja 27,3°.



Slika 5-9 Parametri čvrstoće uzoraka 1 i 2

Kao što je prethodno navedeno, faza smicanja provedena je u tri ciklusa: opterećenje, rasterećenje i ponovno opterećenje. Analiza odnosa naprezanja i deformacija ukazuje da pri većim deformacijama nije došlo do značajnog smanjenja čvrstoće pa se može zaključiti da se radi o normalno konsolidiranom tlu.

Osim poznavanja posmične čvrstoće naslaga, za ocjenu podobnosti terena za potrebe izgradnje različitih objekata, treba još uzeti u obzir mogućnost plavljenja i seizmičku aktivnost proučavanog područja. Prema Kovačević-Zelić (2020) stupanj povoljnosti terena određuje se prema pojavi nestabilnosti, pojavi plavljenja i seizmičnosti. Na temelju učestalosti navedenih pojava, teren se dijeli na četiri kategorije prikazane u tablici 5-3. Korištenjem ove podjele, prema seizmičnosti područja, te uočenim pojavama nestabilnosti i mogućnosti plavljenja, proučavano područje pripada uvjetno povoljnom terenu.

Tablica 5-3 Ocjena povoljnosti terena (Kovačević-Zelić, 2020)

Stupanj povoljnosti	Pojave nestabilnosti	Pojave plavljenja	Seizmičnost (MCS ljestvica)
optimalan teren	bez pojave klizišta i odrona	bez pojave plavljenja	< 5
povoljan teren	vrlo rijetke i male pojave	vrlo rijetke pojave	5-6

<b>uvjetno povoljan teren</b>	rijetke veće i brojne manje pojave	rijetke pojave	<b>6-9</b>
nepovoljan teren	učestale i velike pojave	učestale pojave	> 9

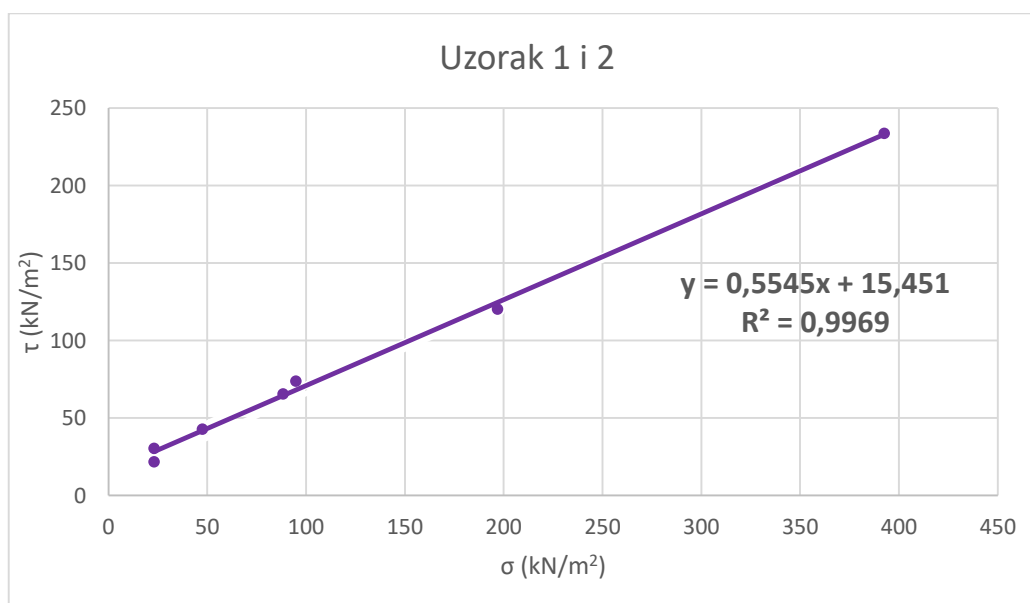
### 5.5. Statistička obrada rezultata

Za određivanje veze između uzoraka, rezultati ispitivanja statistički su obrađeni u programu Microsoft Excel. Izračunata normalna naprežanja iz tablice predstavljaju X-varijablu, a očitana posmična naprežanja Y-varijablu. Parovi vrijednosti varijabla X i Y uneseni se u koordinatni sustav kao točke  $(x_i, y_i)$  i dobiven je dijagram rasipanja.

Prema Radman-Funarić (2018) jednostavna linearna regresija koristi se za opisivanje odnosa među pojavama. Karakterizira ju činjenica da porast vrijednosti jedne varijable odgovara linearnoj promjeni druge varijable.

Parametar b je regresijski koeficijent koji pokazuje za koliko se, prosječno, mijenja vrijednost varijable Y kada dođe do promjene varijable X (Radman-Funarić, 2018). Jednadžba pravca ispitanog uzorka prikazana je na slici 5-10. Iz slike 5-10 je vidljivo da regresijski koeficijent iznosi 0,5545 tj. da se povećanjem normalnih naprežanja za 1 kN/m<sup>2</sup>, posmična čvrstoća poveća za 0,5545 kN/m<sup>2</sup>.

Specifičan pokazatelj reprezentativnosti uzorka regresije je koeficijent determinacije, R<sup>2</sup>. Koeficijent determinacije poprima vrijednosti od 0 do 1. Što je njegova vrijednost bliža 1, model je reprezentativniji (Radman-Funarić, 2018). Na slici 5-10 vidljiv je iznos koeficijenta determinacije ispitanog uzorka.



Slika 5-10 Jednadžba pravca i koeficijent determinacije

S obzirom da je poznata vrijednost  $R^2$ , možemo izračunati vrijednost koeficijenta linearne korelacije,  $r$ . Koeficijent linearne korelacije predstavlja drugi korijen koeficijenta determinacije.  $R^2$  iznosi 0,9969, pri čemu je vrijednost koeficijenta  $r$  0,9938. Tablica 5-4 prikazuje raspon i tumačenje vrijednosti  $R^2$  i  $r$ . Prema tablici zaključujemo da između ispitnih uzoraka postoji snažna pozitivna korelacija.

**Tablica 5-4** Raspon vrijednosti  $R^2$  i  $r$  uz tumačenje (Radman-Funarić,2018)

$R^2$	$r$	Tumačenje
1	-1	potpuna negativna korelacija
1 – 0,49	-1 - -0,7	snažna negativna korelacija
0,49 – 0,09	-0,7 - -0,3	umjerena negativna korelacija
0,09 – 0	-0,3 – 0	slaba negativna korelacija
0	0	odsutnost korelacije
0,00 – 0,09	0 – 0,3	slaba pozitivna korelacija
0,09 – 0,49	0,3 – 0,7	umjerena pozitivna korelacija
<b>0,49 – 1</b>	<b>0,7 – 1</b>	<b>snažna pozitivna korelacija</b>
1	1	potpuna pozitivna korelacija



## 6. ZAKLJUČAK

Tijekom i nakon potresa 29. prosinca 2020. godine u Petrinji, pored uobičajenih pojava (klizišta, likvefakcija i slijeganje tla) zapažena je i pojava velikog broja urušnih vrtača. Urušne vrtače nastaju transportom materijala pokrova gravitacijskom silom i protjecanjem vode kroz pukotine. Ispiranje materijala smanjuje debljinu pokrova i njegovu čvrstoću što dovodi do naglog urušavanja. Na potresom pogođenom području zabilježeno je 45 postojećih (fosilnih), 91 novonastalih i 3 potencijalne vrtače. S obzirom da je ova pojava rijetka kako kod nas tako i u svijetu, na što ukazuje i mali broj literaturnih podataka, tako veliki broj vrtača nastalih u relativno kratkom vremenu nakon petrinjskog potresa izazvao je značajan interes znanstvenika. Pokrenuta su brojna geološka, hidrogeološka, geofizička i geotehnička istraživanja.

Ovaj rad opisuje laboratorijska ispitivanja provedena na uzorcima tla prikupljenih tijekom terenskih istraživanja oko dvije karakteristične vrtače u naselju Borojevići. Provedena terenska i laboratorijska identifikacija i klasifikacija uzoraka nadopunjena je laboratorijskim ispitivanjem mehaničkih i hidrauličnih značajki. Te značajke su bitne za numeričko modeliranje navedenih pojava kako bi se pokušao razjasniti mehanizam nastanka urušnih vrtača. U ovom radu detaljnije je opisano određivanje posmične čvrstoće pokusom izravnog smicanja.

Prije samog ispitivanja, utvrđene su granice plastičnih stanja i granulometrijski sastav tla u svrhu njegove klasifikacije. Jedan je uzorak klasificiran kao glina srednje plastičnosti, a drugi uzorak kao mješavina gline i praha srednje plastičnosti.

Rezultati ispitivanja izravnog posmika korišteni su za konstruiranje Mohr-Coulombovog pravca posmične čvrstoće za svaki pojedini uzorak. Kohezija prvog uzorka iznosi 16,6 kN/m<sup>2</sup>, a kut unutarnjeg trenja 31,2°. Na drugom uzorku dobivena vrijednost kohezije iznosi 15,0 kN/m<sup>2</sup>, a kuta unutarnjeg trenja 26,8°. Osim pojedinačnih, konstruiran je i zajednički dijagram koji predstavlja parametre jedinstvene geotehničke sredine. U tom slučaju, kohezija iznosi 17,0 kN/m<sup>2</sup>, a kut unutarnjeg trenja 27,3°. Analiza odnosa naprezanja i deformacija, osim parametara čvrstoće, dala je uvid u geotehnička svojstva tla. U fazi smicanja, tijekom ciklusa opterećenje-rasterećenje-ponovno opterećenje, pri većim deformacijama nije došlo do smanjenja posmične čvrstoće. Zbog toga, može se zaključiti kako je riječ o normalno konsolidiranom tlu.

Uvid u mehaničke i hidrauličke značajke pokrovnih naslaga omogućuje davanje smjernica za buduću gradnju ili sanaciju. Saniranje nastalih vrtača može se provesti

različitim tehnikama poboljšanja kao što su nasipavanje, zbijanje i injektiranje. Prema ocjeni povoljnosti terena s obzirom na seizmičnost, proučavano područje definira se kao uvjetno povoljan teren. Na takvom području bilo bi korisno provesti zoniranje s obzirom na opasnost od različitih hazarda, u koje se u ovoj specifičnoj geološkoj sredini ubrajaju i urušne vrtače. Na taj način mogle bi se izdvojiti zone u kojima je građenje moguće, zone nepovoljne za gradnju, kao i one zone u kojima je potrebno provesti prethodna detaljnija istraživanja i poboljšanje temeljnog tla. U budućnosti, to će pomoći sigurnijoj gradnji na takvim područjima i sprječavanju stvaranja materijalnih šteta i ljudskih žrtava.

## LITERATURA

ASTM D3080/D3080M-11, 2011. *Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions*. ASTM International, West Conshohocken, PA. url: <https://www.astm.org/> (29.7.2021)

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

GOODMAN, R.E., 1993. *Engineering Geology: Rock in Engineering Construction*. New York: John Wiley and Sons.

KING, H.M., 2018. What is limestone and How is it Used? *Geology.com*.  
Url: <https://geology.com/rocks/limestone.shtml> (22.9.2021)

KOVAČEVIĆ-ZELIĆ, B., 2020. Poboljšanje tla i stijena, predavanje.

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

KVASNIČKA, P., DOMITROVIĆ, D., 2007. *Mehanika tla: interna skripta*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

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

MIHALIĆ, S., 2007. *Osnove inženjerske geologije: interna skripta*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

MIHALIĆ ARBANAS, S., ARBANAS, Ž., KRKAČ, M., GAZIBARA, S., DAMJANOVIĆ, V., SINČIĆ, M., JAGODNIK, P., JAGODNIK, V., 2021. *Potres u Petrinji M6,2 od 29.12.2020: izvješće o inženjerskogeološkoj i geotehničkoj prospekciiji*. Izvještaj. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Rijeka: Građevinski fakultet.

MIHALIĆ ARBANAS, S., BERNAT S., 2013. *Inženjerstvo u stijenama: interna skripta*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

MULABDIĆ, M., 2018. *Ispitivanje tla u geotehničkom laboratoriju*. Osijek: Građevinski i arhitektonski fakultet.

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

RADMAN-FUNARIĆ, M., 2018. *Uvod u gospodarsku statistiku, Tko kaže da lažem? u potpisu – Statistika*. Požega: Veleučilište u Požegi

ROJE-BONNACI, T., 2007. *Mehanika tla*. Split: Građevinsko-arhitektonski fakultet.

SALVATI, D., SASOWSKY, I.D., 2002. Development of collapse sinkholes in areas of groundwater discharge. *Journal of Hydrology*, 264 (1-4), str. 1-11.

TOMAC, I., ZLATOVIĆ, S., i dr., 2021. *Geotechnical Reconnaissance and Engineering Effects of the December 29, M6.4 Petrinja, Croatia Earthquake, and Associated Seismic Sequence*. Izvješće. Zagreb: Geotechnical Extreme Event Reconnaissance (GEER) Association.

TOMLJENOVIĆ, B., STIPČEVIĆ, J., SEČANJ, M. 2021., *Izvješće o zabilježenim pojavama koseizmičkih površinskih deformacija na području Pokuplja i Banovine nastalih potresnom serijom od 28.12.2020 do 5.01.2021*. Izvješće. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

VRKLJAN, M., 2001. *Mineralogija i petrologija-osnove i primjena*. Zagreb: Rudarsko-geološko-naftni fakultet.

ZENG, Y., ZHOU, W., 2019. Sinkhole remedial alternative analysis on karst lands. *Carbonates and Evaporites*, 34 (2), str. 159-173.

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



KLASA: 602-04/21-01/229  
URBROJ: 251-70-11-21-2  
U Zagrebu, 13.09.2021.

Ena Rudec , studentica

## RJEŠENJE O ODOBRENJU TEME

Na temelju vašeg zahtjeva primljenog pod KLASOM 602-04/21-01/229, URBROJ: 251-70-11-21-1 od 20.07.2021. priopćujemo vam temu diplomskog rada koja glasi:

### KARAKTERIZACIJA TLA ZA 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)

Doc.dr.sc. Dubravko  
Domitrović

(titula, ime i prezime)

Prodekan za nastavu i studente:

(potpis)

Izv.prof.dr.sc. Dalibor  
Kuhinek

(titula, ime i prezime)