

# Izazovi građenja u području krša - pregled odabranih primjera izgradnje objekata u kršu Republike Hrvatske

---

**Vidaković, Matea**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2021**

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

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:184895>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-04-02**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Matea Vidaković**

**Izazovi građenja u području krša – pregled odabranih primjera izgradnje objekata  
u kršu Republike Hrvatske**

**Construction challenges in karst regions – selected case studies in karst of the  
Republic of Croatia**

**Završni rad**

**Rijeka, veljača 2021.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Stručni studij**  
**Primijenjena geologija**

**Matea Vidaković**

**0114031952**

**Izazovi građenja u području krša – pregled odabranih primjera izgradnje objekata  
u kršu Republike Hrvatske**

**Construction challenges in karst regions – selected case studies in karst of the  
Republic of Croatia**

**Završni rad**

**Rijeka, veljača 2021.**

Naziv studija: **Preddiplomski stručni studij Građevinarstvo**

Znanstveno područje: Tehničke znanosti

Znanstveno polje: Građevinarstvo

Znanstvena grana: Geotehnika

Tema završnog rada

**IZAZOVI GRAĐENJA U PODRUČJU KRŠA – PREGLED ODABRANIH PRIMJERA IZGRADNJE  
OBJEKATA U KRŠU REPUBLIKE HRVATSKE  
CONSTRUCTION CHALLENGES IN KARST REGIONS – SELECTED CASE STUDIES IN KARST OF THE  
REPUBLIC OF CROATIA**

Kandidatkinja: **MATEA VIDA KOVIĆ**

Kolegij: **PRIMI JENJENA GEOLOGIJA**

Završni rad broj: **20-ST-20**

**Zadatak:**

Područja krša, karakterizirana različitim vrstama površinskih i podzemnih reljefnih oblika, predstavljaju izazove graditeljima. Posebna pozornost posvećuje se istraživanjima lokacija za potrebe građenja, a izazove predstavljaju i inženjerski zahvati radi prilagodbe specifičnim morfološkim uvjetima. Zadatak studenta je:

- dati pregled krških reljefnih oblika koji su od značaja za graditeljsku praksu te pregled osnovnih značajki krša na području Republike Hrvatske,
- dati pregled najčešćih geotehničkih problema prilikom gradnje u području krša,
- obraditi i prezentirati odabrane primjere izgradnje objekata u kršu Republike Hrvatske.

**Tema rada je uručena: 24. veljače 2020.**

**Mentorica:**

dr. sc. Petra Jagodnik,  
v. pred.

## IZJAVA

Završni rad izradila sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

*Matea Vidaković*

---

Matea Vidaković

U Rijeci, 17.02.2021.

## ZAHVALA

Zahvaljujem mentorici dr. sc. Petra Jagodnik dipl. ing. geol. Na strpljenju i stručnim savjetima u izradi ovoga završnog rada.

Posebno želim zahvaliti mojoj obitelji i mojim bližnjima koji su me tijekom čitavog školovanja podupirali i bili uz mene.

## SAŽETAK

U ovom radu obrađuje se tema izazova građenja u području krša te su odabrana tri tunela u Republici Hrvatskoj čije se građenje detaljnije opisuje u narednom tekstu. Opisano je sa kojim problemima se susrelo prilikom izgradnje tunela Mala Kapela, Sveti Rok i tunel Učka, te na koje podzemne (jame, špilje, kaverne ) ili površinske (škrape, kamenice, ponikve, uvale, polja, zaravni, humci) oblike krša se naišlo. Geotehnička istraživanja imaju veliki značaj u današnjem građevinarstvu, pogotovo u području krša, istraživanjima se mogu znatno olakšati građevinski radovi, jer svojim rezultatima mogu dati jasni uvid u podzemlje na području kojem se izvode radovi. Također je opisan tijek izvođenja istraživačkog bušenja i seizmičkog istraživanja, te njihove karakteristike i rezultate koje pridonose u sprječavanju nastanka štete prilikom izgradnje. Prilikom izgradnje cesta na području krša može se susresti sa vrlo velikim problemima koji mogu otežati samu izvedbu, a i zasigurno produljiti sami rok izgradnje zbog različitih morfoloških pojava. Neki od problema i izazova s kojima su se suočili tunelograditelji u hrvatskome kršu su pojava praznih kaverni različitih dimenzija na trasi ili u blizini tunela, pojava speleoloških objekata ispunjenih tlom i kršem te ispadanje blokova iz kaverne u kaloti tunela. Ukoliko se nije u mogućnosti izvoditi geotehnička istraživanja prije početka gradnje, onda se mora uzeti u obzir jako veliki rizik jer i na malom području mogu proizaći veliki problemi, zato je krš vrlo nepredvidljiv. U većini slučajeva nije predviđen novac za prethodna istraživanja terena ili nije u dovoljnoj mjeri, ali je praksa pokazala da naknadno pronađena npr. kaverna može prouzročiti veće financijske neprilike nego prethodna istraživanja sa kojima bi se evidentirala ta kaverna.

Ključne riječi: istraživanje, krš, izazovi, problematika, tunel

## **ABSTRACT**

This paper deals with the topic of construction challenges in the karst area and selected three tunnels in the Republic of Croatia, the construction of which is described in more detail below. It describes which problems are encountered during the construction of the tunnel Mala Kapela, Sveti Rok and the tunnel Učka, and on which underground (pits, caves, caverns) or surface (cracks, oysters, sinkholes, bays, fields, plateaus, mounds) are formed karst found. Geotechnical research is of great importance in today's construction, especially in the area of karst, research can significantly facilitate construction work, because their results can give a clear insight into the underground in the area where the work is performed. The course of performing exploratory drilling and seismic research is also described, as well as their characteristics and results that contribute to the prevention of damage during construction. When building a road in the area of karst, you can encounter very big problems that can complicate the performance itself, and certainly extend the construction period due to various morphological phenomena. Some of the problems and challenges faced by tunnel builders in the Croatian karst are the appearance of empty caverns of various dimensions on the route or near the tunnel, the appearance of speleological objects filled with soil and karst and the fall of blocks from the cavern in the tunnel. If it is not possible to carry out geotechnical research before the start of construction, then a very high risk must be taken into account because even in a small area large problems can arise, so the karst is very unpredictable. In most cases, no money is foreseen for previous field research or it is not sufficient, but practice has shown that a subsequently found, for example, cavern can cause greater financial trouble than previous research to prove this cavern.

Keywords: research, karst, challenges, problems, tunnel



Sadržaj:

1. UVOD .....	1
2. OKRŠAVANJE I MORFOLOGIJA KRŠA .....	2
1.1. Krška polja .....	4
1.2. Vrtače .....	6
1.3. Kaverne .....	7
1.4. Ponori, vrulje i estavele.....	8
3. KRŠ U HRVATSKOJ .....	11
4. GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA U PODRUČJU KRŠA.....	13
4.1. Istraživačko bušenje.....	13
4.2. Seizmička istraživanja .....	14
5. IZAZOVI I POTEŠKOĆE GRADNJE U PODRUČJIMA KRŠA.....	16
6. ODABRANI PRIMJERI IZGRADNJE OBJEKATA U KRŠU REPUBLIKE HRVATSKE .....	20
6.1. Tunel Mala Kapela.....	20
6.2. Tunel Sveti Rok .....	24
6.3. Tunel Učka.....	28
7. ZAKLJUČAK .....	30
8. LITERATURA:.....	31

# 1. UVOD

Krš je naziv za karakteristične površinske i podzemne oblike reljefa koji su u geološkom vremenu oblikovani na vapnenačkoj stijenskoj podlozi pod utjecajem oborinske vode. Krški prostori prostiru se na oko 30 milijuna km<sup>2</sup> odnosno na 20% ukupne svjetske kopnene površine, a u Republici Hrvatskoj na gotovo cijelom području Istre, Primorja i Dalmacije, te na području Banije, Žumberka, Ivanščice i Medvednice. Da bi se krš oblikovao, potrebna su tri općenita uvjeta. Prvi uvjet je da je teren izrađen od stijena koje su relativno lako topive u atmosferskoj vodi, a to su uglavnom vapnenci. Drugi uvjet je da se područje nalazi u klimatskom pojasu s velikom količinom kiše, a treći da stijene imaju dobro razvijenu sekundarnu poroznost odnosno dobru propusnost, kako bi voda mogla prodrijeti u podzemlje i cirkulirati kroz naslage. Oblici krškog reljefa mogu se općenito podijeliti na površinske i podzemne krške oblike [1].

Krš zahtijeva posebnu pozornost prilikom projektiranja i izgradnje, posebice velikih građevinskih objekata poput brana, prometnica, tunela, akumulacija i slično. Naročito je važno ispravno planirati i provesti istraživačke radove, kako bi se što detaljnije ustanovili uvjeti reljefa i geološke građe krškoga područja. Pri tome, posebnu pozornost zahtijevaju podzemni krški oblici, naročito kaverne, jer su to krški oblici bez prirodnog ulaza pa ih je samim time istraživanjima teže ustanoviti., itd., te inženjeri kod gradnje u krškom području imaju takve probleme, kakve nemaju u drugim područjima gdje se krš ne nalazi, na prvi pogled ti problemi znaju izgledati i nepremostivi. Zbog takvih problema, uveliko pomažu geotehnička istraživanja koja se izvode prije početka projektiranja, kako bi se na vrijeme uočili potencijalni problemi. Neki od geotehničkih istraživanja su istraživačko bušenje, seizmička istraživanja, geoelektrična istraživanja [2].

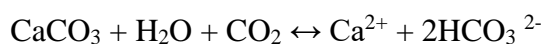
Izazovi i specifičnosti gradnje u kršu na području Republike Hrvatske su brojni. U ovom radu dan je pregled odabranih primjera izgradnje objekata u području krša Hrvatskoj, njihove problematike i rješenja kojima su se uspjeli ukloniti ili umanjiti navedeni izazovi. Vrlo je važno ozbiljno shvatiti krš i bilo kakvu gradnju u kršu, jer na oko mala šupljina za koju se misli da ju je moguće sanirati, može uskom pukotinom prijeći u značajan speleološki objekt velike opasnosti za objekt koji se izgrađuje, na primjer za konstrukciju ceste.

## 2. OKRŠAVANJE I MORFOLOGIJA KRŠA

Okršavanje je proces kontinuiranog kemijsko-mehaničkog trošenja vapnenca koji se odvija tijekom milijuna godina. Tim kompleksnim procesom razvoja krša pod utjecajem kemijski agresivne vode koja ponire i protječe kroz pukotine oblikuje se specifičan površinski reljef (egzokrš) i nastaju složeni sustavi podzemnih šupljina (endokrš) [3].

Razlikuju se tri faze okršavanja i ovisno o njima razlikuju se stadiji krškog reljefa: mladi krš, zreli krš i stari krš. Kod mladog krša krajolik nije znatno okršen i zbog toga zadržava normalnu površinsku drenažu. Kod zrelog krša stvaraju se vertikalne pukotine i plitke špilje. Špilje se nakon nekog vremena urušavaju pri čemu dolazi do stvaranja vrtača na površini, zbog čega je površina terena neravna. U starom kršu vapnenac je skoro potpuno otopljen, a na njegovu mjestu se nalazi tlo sastavljeno od čestica koje predstavljaju netopivi ostatak minerala kalcita i dolomita. Kod čvrstog kompaktnog vapnenca je potrebno znatno duže geološko vrijeme za razvoj sve tri faze okršavanja, dok je za porozni i mekani vapnenac to vrijeme nešto manje [4].

Kod procesa okršavanja najvažniji uvjet je topivost karbonatnih stijena u atmosferskoj vodi. Proces okršavanja može se izraziti kao



$\text{CaCO}_3$  -kalcijev karbonat

$\text{H}_2\text{O}$  -voda

$\text{CO}_2$  -ugljičkov dioksid

$\text{Ca}^{2+}$  -ioni kalcija

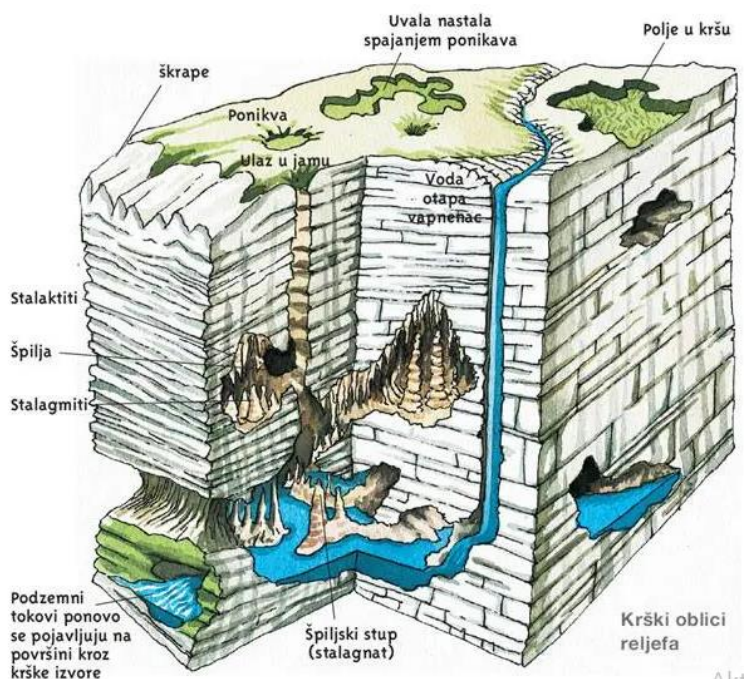
$\text{HCO}_3^{2-}$  -hidrogen karbonat

To znači da se kalcijev karbonat u dodiru s vodom i ugljik-dioksidom raspada na ione kalcija i hidrogen-karbonata. Ugljikov dioksid koji većinom potječe iz tla, a dijelom izravno iz oborina, znatno pospješuje otapanje vapnenca i dolomita [5].

Okršavanjem nastaju mali i veliki krški morfološki oblici (Slika 1.). Male krške morfološke oblike predstavljaju kamenice i škrape, a najčešći veliki krški morfološki oblici su ponikve, krška polja, ponori i špilje. Ovi se oblici dijele u površinske i podzemne krške oblike, od kojih su važniji navedeni u Tablici 1. Važnu ulogu u razvoju krških morfoloških oblika ima geološka struktura određenog područja. Stijenske mase nikada nisu jednolične geološke građe, čak i onda kada se sastoje isključivo od vapnenačkih stijena. Za to su zaslužne slojne plohe, pukotine i smične plohe, tj. rasjedi. Upravo rasjede koristi voda na svojem putu, pa ih otapanjem proširuje. U podzemlju tako nastaju šupljine raznih veličina, od sitnih do golemih, kao i različitih neobičnih oblika, a u šupljinama nakit podzemlja – vapnenačke sige [1].

Tablica 1. Sistematizacija krških oblika.

POVRŠINSKI KRŠKI OBLICI	Škrape, kamenice, ponikve, uvale, polja, zaravni, humci
PODZEMNI KRŠKI OBLICI	Jame, špilje, kaverne



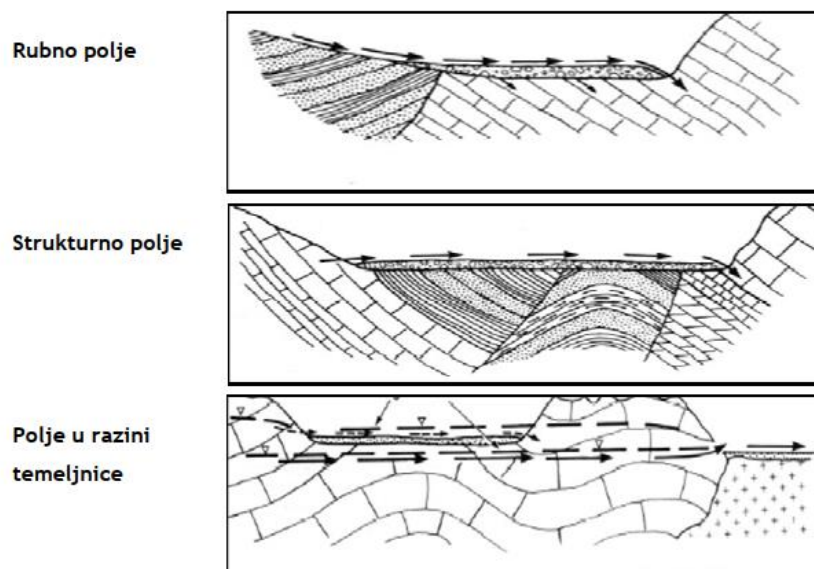
Slika 1 Fotografija različitih površinskih i podzemnih oblika krškog reljefa; [6]

U nastavku su opisani odabrani površinski i podzemni krški morfološki oblici te je dan kratki pregled hidrogeoloških značajki krša.

## 1.1. Krška polja

Polja u kršu specifičan su dio krškog krajolika. U kršu su uglavnom vrlo loši uvjeti za razvoj poljoprivrede zbog nedostatka tla, to jest zbog čvrstog skeletnog tla, odnosno kamenjara. No, postoje određeni dijelovi dinarskoga krša koji su građeni od razlomljenijih i trošnijih stijena pa na njima onda nastaje i deblje tlo. Za razliku od većine krškog reljefa, polja su ravna ili blago udubljena, okružena brdima ili planinama te je površina polja u kršu često prekrivena mekom zemljom i humusom. Većinom su dugačka i nekoliko desetaka kilometara [5].

Najveća polja u kršu Hrvatske su: Gacko, Ličko, Krbavsko, Kninsko, Kosovo, Petrovo, Imotsko, Sinjsko, Vrgoračko [7].



Slika 2 Fotografija koja prikazuje vrste krških polja; [8]

Razlikuju se tri osnovna tipa polja: rubno, strukturno i temeljno (Slika 2.). Rubno polje je prijelaz prema slijepim dolinama. Strukturno polje je geološki kontrolirano, najčešće u Dinaridima. Polje u razini temeljnica je polje gdje vodno lice presijeca površinu. Pružaju se nekoliko stotina metara do nekoliko kilometara, ali im je širina znatno manja. U njima nema stalnih vodotoka, a povremeni se gube u podzemlju zbog ekstremne otkršenosti [7].

Nastanak polja u kršu još je dijelom nepoznat. Na oblikovanje ovakvog oblika krša znatan je utjecaj imala tektonika, pa su polja u kršu uglavnom dna većih tektonskih potolina(nizina). Krška su polja usko povezana s vodom iz razloga što krševite planine oko polja apsorbiraju velike količine oborina koje se zatim kroz propusnu stijenu cijede u podzemlje. Taj proces se odvija sve dok ne naiđu na nepropusnu stijenu gdje voda ponovno izbija na površinu, obično je to u jednom kraju polja u obliku jednog ili više nepravilno raspoređenih izvora. Iz njih često teku rijeke, jer taloženjem lapora i gline nastaje nepropusna podloga, pa se iz tog razloga održavaju na površini. U drugom, nižem kraju polja rijeke naiđu na propusnu kršku stijenu, pa voda ponovno ponire i može ponovo nastaviti svoj put kroz krško podzemlje. Zato je i naziv tih rijeka vrlo simboličan, nazivamo ih rijeke ponornice jer uspijevaju ponirat u podzemlje to jest ne zadržavaju se na površini. Neke od naših najpoznatijih ponornica su Lika, Gacka, Dobra, Lička Jasenica, Zagorska Mrežnica, Dretulja, Pazinčica, Lokvarka, Ličanka, Ričica i Vrnjika[7].

## 1.2. Vrtače

Vrtače ili ponikve su udubine ljevkastog oblika na površini krškog terena. Predstavljaju najčešći oblik površinskog krškog reljefa. U gornjem dijelu promjer vrtača može iznositi od 10 do 100 metara, ponekada i više, dok im dubina iznosi uglavnom do 100 metara. Nastaju na dva načina, otapanjem stijena na površini te urušavanjem površine iznad podzemnih šupljina. Vrtače u odnosu na izgled, oblik, dubine i nagiba strana mogu se podijeliti na dva genetska i tri morfološka tipa vrtača [9].

Prema izgledu otvora vrtače se mogu podijeliti na: okruglaste, ovalne i izdužene. Za vrtače je zanimljivo da se rijetko pojavljuju usamljene, već se često pojavljuju u grupama. Takva područja se nazivaju boginjavi kras. Što se tiče njihovog mjesta nastajanja to su uglavnom ravne površine, rijetko kada će to biti neki nagnuti tereni [10].



Slika 3. Prikaz vrtača iz Valjeva [11]

### 1.3.Kaverne

Kaverne su podzemni krški oblici koji nemaju prirodnog ulaza, i po tome se razlikuju od preostalih podzemnih krških oblika. a mogu također biti izuzetno velikih dimenzija. U Hrvatskoj je 2006. godine registrirano preko 850 kaverni. Najveća se nalazi u tunelu Vrata (nedaleko Fužina), tlocrtne dimenzije 83x63 metara, dok je visina 45 metara. Tijekom izgradnje tunela Sveti Rok koji je dug 5679 metara otkriveno je 48 velikih kaverni i nekoliko stotina manjih špilja. Najveća kaverna zove se Sveti Rok i duža je od 2 kilometra [12].

Jedan od primjera su kaverne (Slika 4.) koje su se pronašle pri izvedbi zemljanih radova to jest probijanju trase za izgradnju pazinske zaobilaznice odnosno spojnice ceste od Rogovića do Lindarskog križa. Naišlo se na kaverne malih primjera, no dosta velikih dubina, što se može provjeriti i laički na licu mjesta bacanjem kamenčića u kavernu i procijeniti dubinu. Iz razloga što se ove kaverne nalaze na mjestu gdje je predviđena bankina te ne ugrožava previše prometnicu, zato će se kaverne samo prekriti betonskim poklopcem.



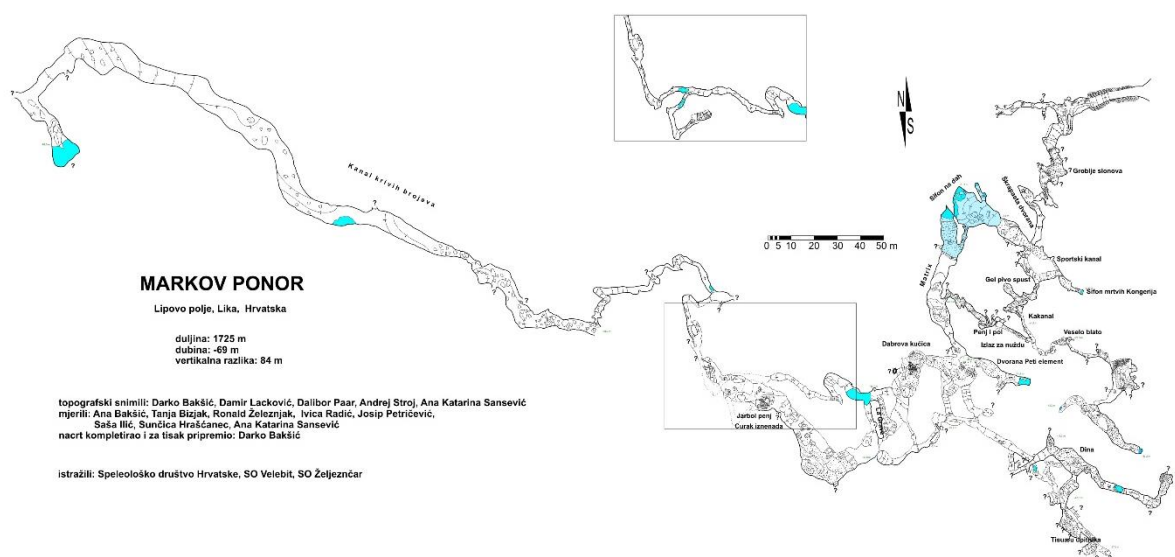
Slika 4. Fotografije kaverni koje su otkrivene prilikom izvedbi zemljanih radova; [privatna arhiva, Megi Ahmetović]



## 1.4. Ponori, vrulje i estavele

Krš karakteriziraju i određene hidrogeološke značajke, odnosno specifični morfološki oblici. To su ponori, vrulje i estavele [5].

Ponor je otvor ili sustav pukotina u propusnim stijenkama u kojima se površinska tekućica gubi odnosno ponire. Postoje dvije vrste ponora, a to su trajni i periodični ponori koji ovise o samoj naravi tekućica. Zanimljivi su ponori u našem kršu iz razloga što naizmjenice kod niskih voda, gutaju vodu, a kod visokih voda, izbacuju vodu kao snažna vrela. U Lici se takvi ponori nazivaju rigala [5]. Glavni ponor rijeke Like je Markov ponor (Slika 5.), smješten je na jugozapadnom rubu Lipovog polja. Dug je 2240 metara (horizontalna duljina 1725 metara), a nalazi se na dubini od -65 metara. Prema istraživanjima Markov ponor završava u Velebitskom kanalu između Svetog Jurja i Jablanca [13].



Slika 5. Nacrt Markovog ponora [14]

Vrulje su stalni ili povremeni krški izvori slatke vode ispod površine mora (potopljeni) (Slika 6.). Naziv su dobili po tome što ti izvori izgledaju baš kao da voda vrije na tim mjestima. Najčešće su skrivene u modrim dubinama Jadrana pored obala koje često i nisu baš dostupne, ali također ih možemo i prepoznati po drukčijoj teksturi morske površine koja može izgledati poput mreškanja ili valova. Na mjestima gdje se pojavljuju vrulje ukoliko se zaroni može se osjetiti na tom djelu prisustvo hladnije vode, te da struji s dna ili iz dubine. Zanimljivo je što

su vrulje zapravo izvori vode koje je more potopilo tijekom posljednjeg ledenog doba tijekom uzdizanja morske razine za više od 100 metara. Taj prirodni fenomen je nastao istjecanjem slatke vode podzemnim kršnim kanalima u more. Zbog tlaka vode u tim podzemnim kanalima more ne može ući u izvor. Vrulja može biti stalna ili povremena, ovisno o količini vode i njezina tlaka koji osiguravaju izvor ispod mora. Vrulje koje spadaju u kategoriju stalnih pojavljuju se uz obalu i u podnožju velikih planina poput Učke, Velebita, Biokova i u Konavlima, dok se vrulje koje su povremene javljaju uz obalu otoka i poluotoka. Velika koncentracija vrulja na jednom mjestu može negativno utjecati i na turizam prisustva hladnije vode [14].



Slika 6. .: Fotografija vrulje vidljive na površini mora [15]

Estavela je šupljina u kršu (Slika 7.) koja za vrijeme suše prima vodu (mjesto povremenog poniranja vode), a za vrijeme visoke razine podzemnih voda daju vodu kao izvori (mjesto povremenog izviranja vode) [16]. Otvori estavele su u vezi sa više podzemnih kanala od kojih jedni odvođe naviše, a drugi naniže. Ovi koji odvođe naviše, odvođe zapravo u polja veće apsolutne visine, a ove koje odvođe naniže, odvođe u doline ili niža polja. Kada su jake i dugotrajne kiše voda ne može dovoljnom brzinom prolaziti kroz podzemne kanale i zato se penje, gornji otvori takvih kanala biće vrela. Kada se smanje oborine to jest kada se smanji dotok vode sa površine tada se isprazne podzemni kanali i isti otvor kanala na površini djeluje kao ponor. Estavele su po obliku slične vrtačama [17].

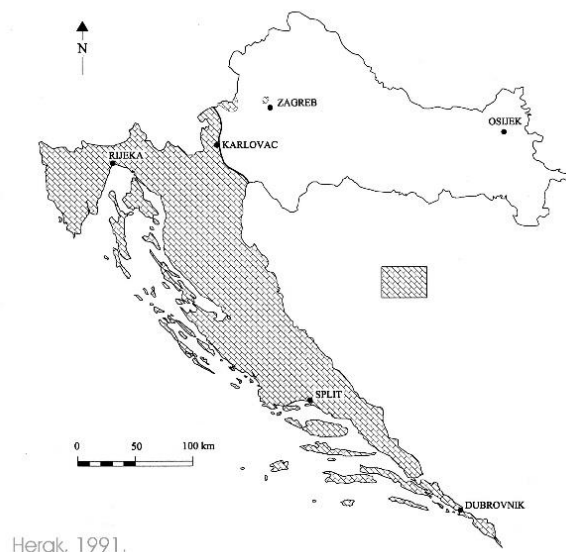


Slika 7.: Fotografija estavele; [18]

### 3. KRŠ U HRVATSKOJ

Većina spoznaja o inženjersko geološkim i ostalim karakteristikama krša u Hrvatskoj proizašle su tijekom regionalnih istraživanja provedenih za potrebe izrade Osnovne geološke karte SFRJ M:100 000, ali i prilikom detaljnih istraživanja provedenih za potrebe izgradnje pojedinih objekata. Gotovo polovica teritorija Republike Hrvatske, oko 52% izgrađena je od karbonatnih sedimentnih stijena koje su pod utjecajem atmosferske vode značajno morfološki izmijenjene, čime je oblikovan krš [12].

U Hrvatskoj se krš dijeli na jadransko područje (otoci i obalni pojas) (slika 8.), područje visokog krša i unutarnji plitki krš. Hrvatska krška područja pripadaju tipu krša umjerenih širina (Dinaridi, Alpe, Pirineji, Apalachian gorje, gorja Australije itd.) koji se ističe debelim (i do 8 km) karbonatnim mezozojskim i paleogenskim sedimentima, što uz naglašenu tektonsku razlomljenost utječe na podjednaku zastupljenost horizontalnih i vertikalnih oblika (speleoloških objekata). Hrvatsko krško područje čini trokut čiji se sjeverozapadni vrh nalazi kod Savudrije, jugoistočni je na rtu Prevlake (uključujući i sve hrvatske otoke, osim Brusnika i Jabuke), a treći je sjeverni i nalazi se u Samoborskom gorju. Hrvatski krški trokut predstavlja dio širega dinarskoga krškog kompleksa u koji su uključena i krška područja susjednih zemalja kao što su Slovenija te Bosna i Hercegovina na sjeverozapadu, sjeveru i sjeveroistoku, i Crna Gora na jugoistoku. Tako da se najveći dio granica hrvatskog krša podudara s političkim granicama susjednih zemalja i s granicama hrvatskih teritorijalnih voda u Jadranskom moru [19].



Slika 8.: Prostorna raspodjela krša na području Republike Hrvatske [20]. Krško područje istaknuto je kvadratičnom kartografskom oznakom sivom bojom.

U najvećoj mjeri je razvijen „dinarski krš“ u kojem su razvijeni površinski i podzemni krški oblici pa se zato naziva „locus typicus“ krša. Zanimljivo je da se iz tog razloga hrvatski nazivi za pojedine krške oblike ne prevode na svjetske jezike, nego su ušli u međunarodnu kršku terminologiju. Sve krške morfološke pojave u priobalnom kršu Hrvatske grade vapnenci i dolomiti koji su pretežito jurske, kredne i eocenske starosti [26].

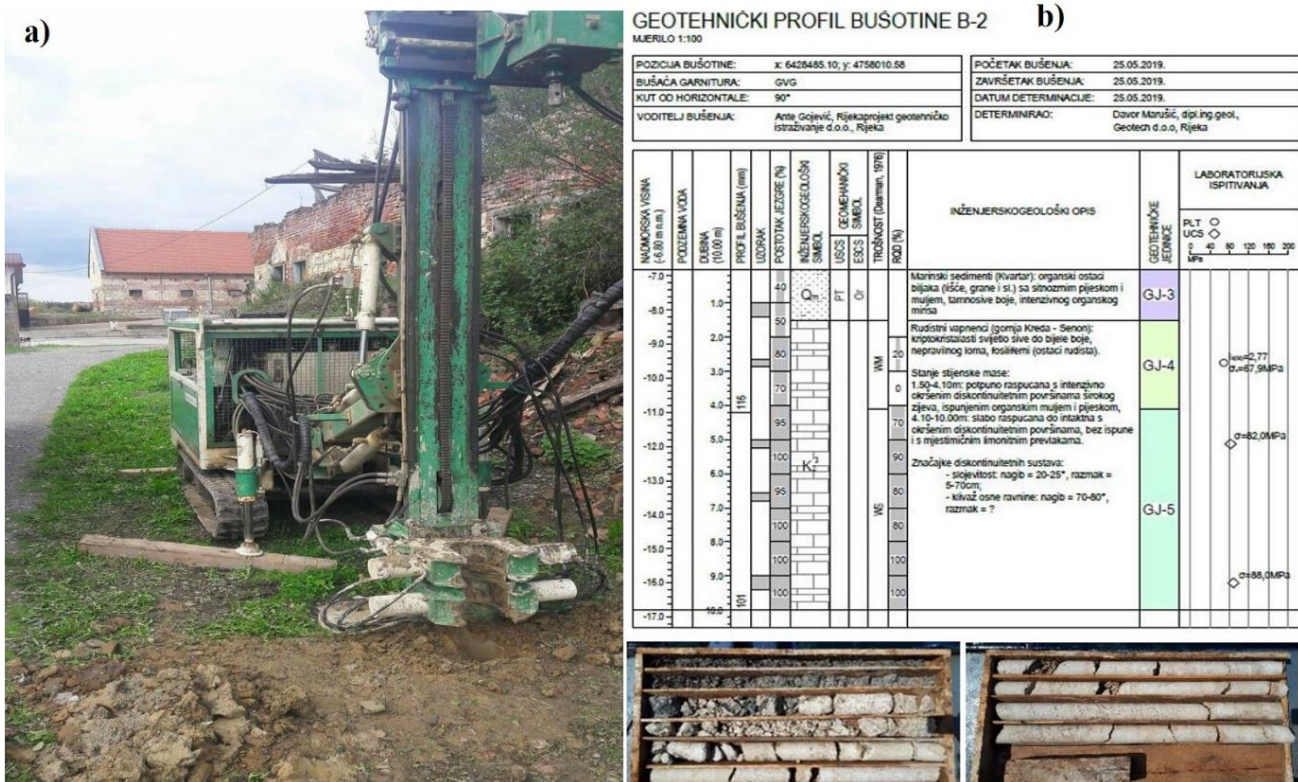
Krškim prostorima u pravilu se pripisuju ukupne površine svih primorskih županija (Istarska, Primorsko-goranska, Ličko-senjska, Zadarska, Šibensko-kninska, Splitsko-dalmatinska i Dubrovačko-neretvanska) te dijelovi Sisačko-moslavačke, Zagrebačke i Karlovačke županije. Granice krša u trima kontinentalnim županijama samo se manjim dijelom poklapaju s administrativnim granicama upravno-teritorijalnih jedinica (županije, gradovi, općine, naselja ili katastarske općine). Uzimajući u obzir ta nepodudaranja, taj dio granice se određuje kombiniranjem geološko-hidroloških i administrativnih međa, odnosno statističkih krugova ili jedinica, što olakšava analize i usporedbe brožanih pokazatelja (demografskih, gospodarskih i sl.) To je naravno utjecalo i na vrlo bitne razlike u podacima o površinama kontinuiranih i izdvojenih krških prostora u Hrvatskoj [19]

## **4. GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA U PODRUČJU KRŠA**

Geotehnička istraživanja su od iznimne važnosti u građevinarstvu, jer predstavljaju jednu od osnovnih podloga svakog građevinskog projekta. Njima se procjenjuju uvjeti u podzemlju prije negoli započne faza izgradnje. Odgovarajuće planiranim i ispravno provedenim istraživanjima mogu se izbjeći brojne poteškoće prilikom građenja, koje su u području krša nerijetko učestalije nego na nekim drugim, geološki jednostavnijim i manje nepredvidljivim područjima [21].

### **4.1. Istraživačko bušenje**

Istraživačko bušenje je tehnika kojom se pomoću izvođenjem bušotine u podzemlje (Slika 9.) dobiva izravan uvid u geološku građu, odnosno u litološki sastav stijene/tla, čiji se uzorci uzimaju za laboratorijska ispitivanja. Tehniku, raspored i dubinu istraživačkog bušenja uvjetuje svrha istraživanja i vrsta potrebnih informacija. Pošto bušotine zbog svog oblika ne zauzimaju veliku horizontalnu površinu, raspoređivanje istraživačkih bušotina ovisi o vrsti inženjerske građevine. Broj i razmak bušotina treba omogućiti praćenje bočnih i vertikalnih promjena inženjersko geoloških uvjeta (rasjeda, bora, pukotina i sl.). Samo bušenje provode specijalizirani timovi bušača, oni vade jezgru i slažu je u bušaće sanduke, a inženjerski geolog provodi determinaciju izbušene jezgre, odnosno inženjerski opis stijene/tla. Opis jezgre je kontinuirani zapis vertikalnog profila stijene dobivene bušenjem, dužina jezgre varira ovisno o geološkoj građi, opremi i zahtjevima klijenta. Konačan rezultat istraživačkog bušenja (Slika 9.) je vrlo vrijedan izvor podataka za sve buduće radove, zapis gotovo svih informacija [22].



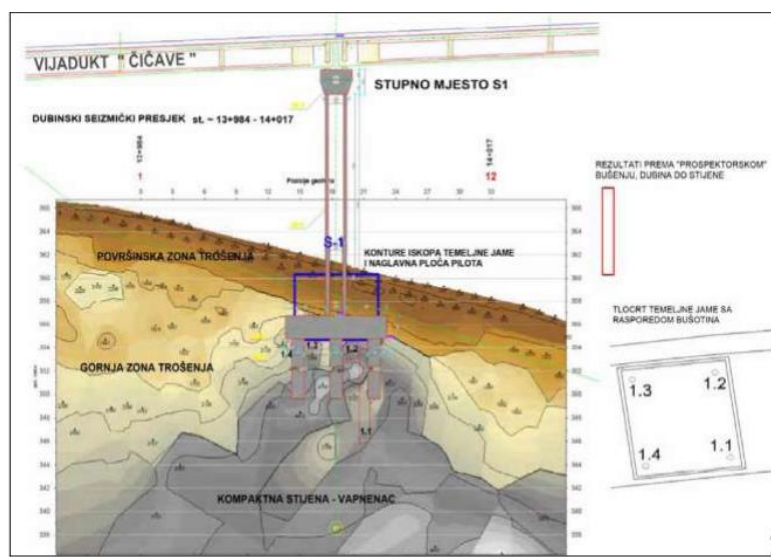
Slika 9.: a) fotografija istraživačkog bušenja [23]; b) vertikalni presjek (log) istraživačke bušotine [24]

## 4.2. Seizmička istraživanja

Seizmičke metode istraživanja zasnivaju se na činjenici da što je viši elastični modul (elastična svojstva stijena/tla) to je veća brzina širenja seizmičkih valova kroz njih. Kristalinitet i poroznost su dominantne značajke stijena koje utječu na brzine valova. Kod stijena koje imaju kristalastu teksturu i nisku poroznost brzina valova je veća, jer takve stijene imaju viši modul elastičnosti i više tlačne čvrstoće. Poroznost tla ovisi o granulometrijskom sastavu i obliku zrna. Na brzine valova također utječe i mineralni sastav: npr. prisustvo gline u vapnencima smanjuje brzine u odnosu na čiste vapnence. Glavni faktor koji u stijenama smanjuje brzine valova su diskontinuiteti i trošnost stijenske mase. Voda na brzinu širenja valova utječe različito za različite vrste valova. U inženjersko-geološkoj praksi koriste se metode seizmičke refrakcije i refleksije. Seizmička refrakcija se u modelu karbonatnih terena uglavnom koristi za utvrđivanje trošnih zona ili kartiranje površinskog okršavanja. Rezultati seizmičke refleksije koje imaju veliki raspon frekvencija (veliku razlučivost) u istraživanjima krša mogu biti

opterećeni pogreškama, posebno ako su prisutne stijene velikih seizmičkih brzina kakve imaju svježe karbonatne stijene. U nekim područjima se uopće ne mogu dobiti jasni refleksi, pa se takva područja nazivaju "ne-seizmičkim terenima". Općenito se u krškim terenima teško mogu dobiti refleksijski profili zadovoljavajuće kvalitete. Međutim, primjena refleksije na krškim terenima je vrlo važna zbog postizanja znatne dubine profila. Pomoću seizmičkih modeliranja rješavaju se sve nedoumice. Na kršu se registriraju niže frekvencije (do 60 Hz) u odnosu na klasične naslage, pa se znatno smanjuje razlučivost zbog povećanja valnih duljina.

Rezultati seizmičkog istraživanja u grani inženjerske geologije su litostratigrafska identifikacija stijenskog materijala u stijenskom masivu i identifikacija strukturno-tektonske građe stijenskog masiva većinom u 2D presjeku trase profila. Također se istraživanjem dobiva kvantitativna ocjena inženjersko-geoloških uvjeta stijenskog masiva u zoni prostora kojeg se istražuje, definiranje dubine nestabilnosti, položaja, orijentacija, nagib pukotina, analiza stabilnosti prirodne padine i slično (Slika 10.) [25].



Slika 10.: Dubinski seizmički presjek jednog od stupnih mjesta Vijadukta "Čičave" izrađen na temelju metode seizmičke refrakcije; [25]



## 5. IZAZOVI I POTEŠKOĆE GRADNJE U PODRUČJIMA KRŠA

Prilikom izgradnje cesta na području krša može se susresti sa vrlo velikim problemima koji mogu otežati samu izvedbu, a i zasigurno produljiti sami rok izgradnje zbog različitih morfoloških pojava [26].

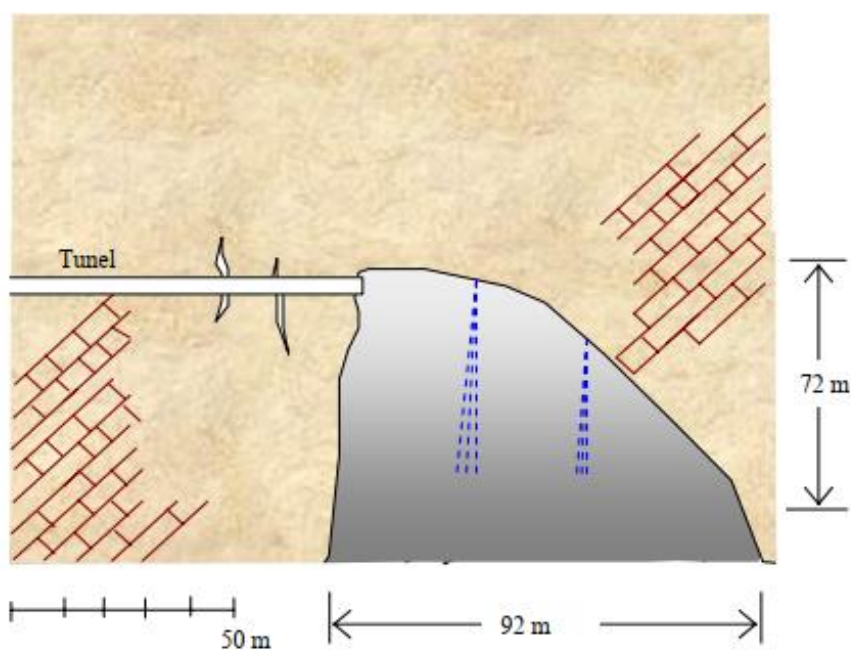
Mnoge prijašnje generacije su maštale o prometnom povezivanju sjevera i juga Hrvatske, no prve izgrađene ceste pratile su površinu terena pa problemi krša nisu bili vidljivi odnosno nisu se pojavljivali. Tunelograditelji i drugi su u 19. stoljeću se susreli sa pojavom krških fenomena koji su otežavali građenje. Karbonatne stijene Dinarskog krša pokazuju dobro geotehničko ponašanje i to je odličan medij za građenje u ili na njemu pod uvjetom da nisu karstificirane. Pošto su karbonatne stijene topive u vodi, a voda mijenja strukturu stijenske mase i narušava kontinuiranost stijenske mase, formirajući sistem pukotina. Zato građenje u i na njima može biti vrlo problematično, jer karstifikacija uvijek prati karbonatne stijene, a to znači da postoji pojava i stvaranje pukotinske poroznosti u stijenskoj masi, što nije poželjno za građenje [29].

Iako su tunelograditelji stekli bogato iskustvo, to ne znači da prilikom slijedećeg iskopa tunela neće biti iznenađeni nekim novim pojavama koje do sada još nisu zabilježili ili se susreli na svim ostalima [26].

Neki od problema i izazova s kojima su se suočili tunelograditelji u hrvatskome kršu su sljedeći:

## 1.) Pojava praznih kaverni različitih dimenzija na trasi ili u blizini tunela

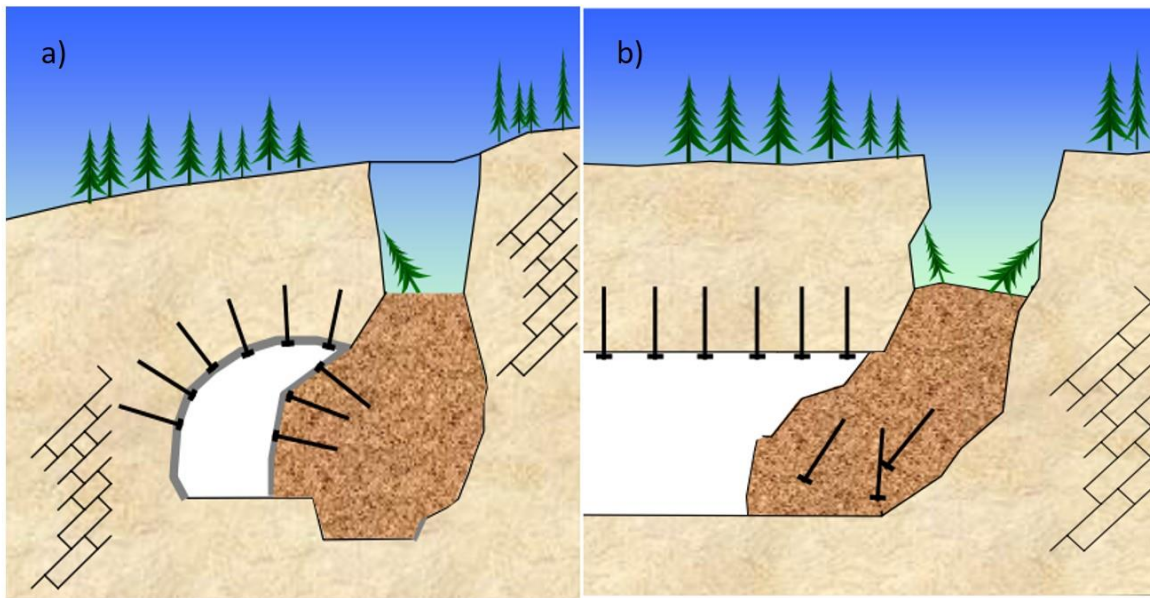
U ovom slučaju nema pravila, jer se kaverna može pojaviti kao i kod kratkih tako i kod dugačkih tunela, tako da se tunelograditelji ne mogu oglasiti na tu činjenicu da se i u njihovom tunelu može pronaći kaverna velikih dimenzija (slika 11). Prednost hidrotehničkih tunela je to što kod nailaska na veliku kavernu se može jednostavno promijeniti trasa tunela to jest zaobići kavernu. No, kod prometnih tunela takav problem se može riješiti jedino izgradnjom mosta ili zatrpavanjem kaverne do nivoa prometnice [27].



Slika 11.: Skica kaverne na trasi tunela Velebit [27]

## 2.) Pojava speleoloških objekata ispunjenih tлом i kršem

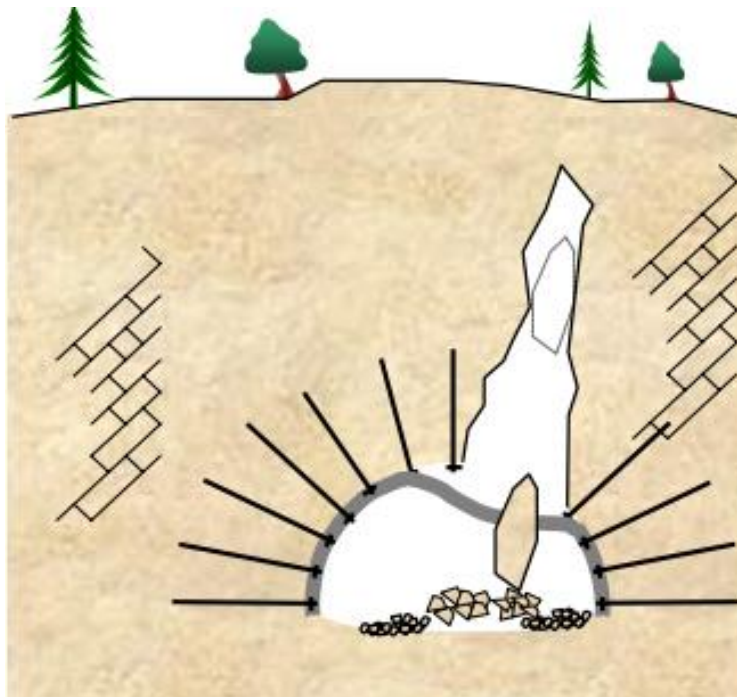
Speleološki objekti koji se pojavljuju u površinskoj zoni okršavanja uglavnom su ispunjeni glinom i kršem. To ima loša geotehnička svojstva pa može ugroziti stabilnost tunela. Ispuna se može pojaviti na čelu iskopa te jednostavno iscuriti u iskopani dio tunela ili ako se curenje ispune ne dogodi tijekom iskopa već je ispuna u kasnijoj fazi građenja prekomjerno opteretila podgradu, što je dovelo do njenog loma. Takva urušavanja većinom sežu do površine terena (slika 12.)[27].



Slika 12.: Primjer urušavanja tunela a) Urušavanje tunela Lučice na autocesti Rijeka-Zagreb [27] ; b) Urušavanje tunela Brinje na autocesti Zagreb-Split [27]

### 3.) Ispadanje blokova iz kaverne u kaloti tunela

Kod ovog problema postoji opasnost od ispadanja nestabilnog bloka (Slika 13.) koji može razbiti podgradu tunela, jer se nalazi na velikoj visini. Speleološki objekti u kršu većinom su vertikalni zbog vertikalnog tečenja vode i tunel često presijeca takve objekte, koji su na većim dubinama većinom prazni. Zato se u kaloti tunela radi betonski čep različitih debljina kako bi se sanirali ovakvi slučajevi. Također je dobro kavernu iznad betonskog čepa ispuniti pijeskom do neke visine, radi amortizacije udara. Drenažnom cijevi osiguran je protok vode iz kaverne u tunel ili u neki drugi speleološki objekt u podu tunela [27].



Slika 13.: Ispadanje bloka iz speleološkog objekta u kaloti Tunela Sv. Rok [27]

## 6. ODABRANI PRIMJERI IZGRADNJE OBJEKATA U KRŠU REPUBLIKE HRVATSKE

U ovom poglavlju dan je pregled primjera izgradnje triju tunela u području krša Republike Hrvatske. To su: (i) tunel Mala Kapela, (ii) tunel Sveti Rok, i (iii) tunel Učka.

### 6.1. Tunel Mala Kapela

Cestovni tunel Mala Kapela je najveći tunel u Hrvatskoj, dužine desne cijev 5760 metara, a lijeve 5761,7 metara. Proteže se od Bosiljeva do Sv. Roka u sklopu autoceste A1 između Zagreba i Splita, odnosno Dubrovnika. Izgradnja tunela započeta je u svibnju 2002. godine, a za promet je otvoren krajem lipnja 2005. godine. Na samom početku su određene okolnosti obilježile izgradnju, a ujedno i potaknule sumnje u završetak izgradnje cijele autoceste u predviđenom roku. Prva se odnosila na neusklađenost prostornih planova i prometne strategije vezane uz savladavanja netaknute Gacke doline, koja predstavlja područje s najvećim zalihama pitke vode u Hrvatskoj, a druga je bila vezana uz natječaj za izvoditelja tunela. Osnovna dvojba oko građenja tunela je bila hoće li autocesta do Ličkog Lešća biti izgrađena preko Otočca, što je bio prijedlog investitora, ili će se izgraditi preko Žute Lokve, za što su se zalagale ekološke udruge i stanovnici Gacke doline. Naposljetku je odlučeno da se autocesta izgradi preko Žute Lokve, što se odrazilo i na povećanje duljine tunela Mala Kapela. Tunel Mala Kapela imao je izrađene tri projektne varijante. Prva varijanta je rađena kada još nije bila određena konačna trasa, zato je vlada dala nalog da se tunel preprojektira, te je odabrana varijanta kojom će se trasa pružati drugom padinom brda prema Jezeranama. Kada je donesena odluka o promjeni trase, radovi na sjevernom dijelu tunela su već bili izvedeni tako da su se promjene mogle izvesti samo na južnom dijelu. Nakon određenih poteškoća oko odabira izvoditelja radova, natječaj je dobila talijanska tvrtka Coopcostruttori koja se obavezala da će do prosinca 2004. godine iskopati obje tunelske cijevi [28].

Izgradnja tunela Mala Kapela bila je jedna od najzanimljivijih i najuzbudljivijih građevinskih priča u našem graditeljstvu. To je bio prvi tunel u Hrvatskoj koji je na probijan

na relativno jeftin i brz način. Ovisno o kategoriji kvalitete stijene, s iskopom se napredovalo i do 50 metara na dan, a na tjedan je ta brojka znala dosegnuti i 200 metara [28].

Tunel je projektiran u dvije cijevi, pri čemu se u svakoj cijevi odvija istosmjerni promet (slika 14.). U početku je promet protjecao samo desnom cijevi, a ovisno o povećanju prometa se nakon nekog vremena opremila se i uključila i lijeva cijev. U svom konačnom obliku tunel je projektiran za brzine od 100 kilometara na sat i razmak osi između dviju paralelnih tunelskih cijevi je 25 metara. Prema statistikama ima puno manje nesreća u cijevima s jednosmjernim nego s dvosmjernim prometom. Tako da i u ovom tunelu druga cijev omogućuje bolju evakuaciju u slučaju nesreće preko prolaza koji su međusobno povezani za vozila i za pješake [28].



Slika 14. Dvocijevni prikaz tunela Mala Kapela [29]

Za potrebe izrade geotehničkog projekta provedena su temeljna geološka, inženjerskogeološka i geomehanička istraživanja. Istraživački radovi obuhvaćali su geološko kartiranje, inženjerskogeološko kartiranje, istraživačko bušenje, laboratorijska ispitivanja uzoraka stijenskih materijala i geofizička istraživanja. Na temelju istraživačkih radova, prognozirano je da trasa tunela prolazi kroz vapnence, dolomite i dolomitne breče. U određenom dijelu trase pretpostavljena je i tektonska zona. Brzini iskopa tunela značajno je pridonijelo to što je odnos stijena u stvarnosti bio puno bolji od prognozirano [28].

Što se tiče projektiranja stabilizacije podzemnog iskopa primijenjena je integralna metoda, koja objedinjuje racionalni, empirijski i promatrački pristup stabilizaciji podzemnog iskopa. Na osnovu te metode projektiranje se odvija u dvije faze. Prva faza je prije početka gradnje tunela kada se na temelju istražnih radova daju prognozirana rješenja, a zatim se druga faza (projektiranje) odvija tijekom građenja kada se modificiraju prognozirana rješenja [28].

Sam početak radova i sam pred usjek nisu baš mnogo obećavali, iz razloga jer je na sjeveru bilo mnogo kaverni i vrtača. 2002. godine od kad su radovi krenuli svih je iznenadila brzina proboja. Tajna takvog brzog iskopa je vjerojatno u jako kvalitetnim tunelskim bušilicama (Atlas Copco) koje su omogućavale minska bušenja i do 6 metara, te napredovanje u dobrom materijalu i po 5 metara na dan na mjestu proboja. Zanimljiva činjenica je da su brzinom iskopa premašili sve dosadašnje tunelograditelje u Hrvatskoj. Također je Mala Kapela prvi tunel u Hrvatskoj gdje se podgrada izvodi mikro armiranim mlaznim betonom [28].

Geološki uvjeti bili su u većinom u skladu sa predviđanjima, jedino nije bio slučaj u prvoj zoni gdje je bio vrlo mali nadsloj i gdje su stijene bile tektonski okršene (kredni vapnenci i dolomiti). Na tom terenu su zabilježene i vrtače koje sežu duboko u podzemlje, a dolazilo je i do urušavanja njihovih dijelova. Najveću špilju koja se nalazila na južnoj strani tunela ispitivao je Hrvatski speleološki savez. Voda se u iskopu tunela pojavljuje jedino za vrijeme kiše, inače nije bilo nikakvih prodora vode. No, što se tiče stijena, stijene su povoljnije nego što se očekivalo [28].

Izgradnja ovog tunela postigla je pravu malu „revoluciju“ u razbijanju konvencija da se ne može minirati više od 3 metra. Uspjeli su postići i po 4 miniranja u jednoj smjeni. Na miniranju je radila tvrtka iz Budinščine Elmech (Slika 15.) [28].



Slika 15. Prva miniranja na sjevernom ulazu u tunel [29]

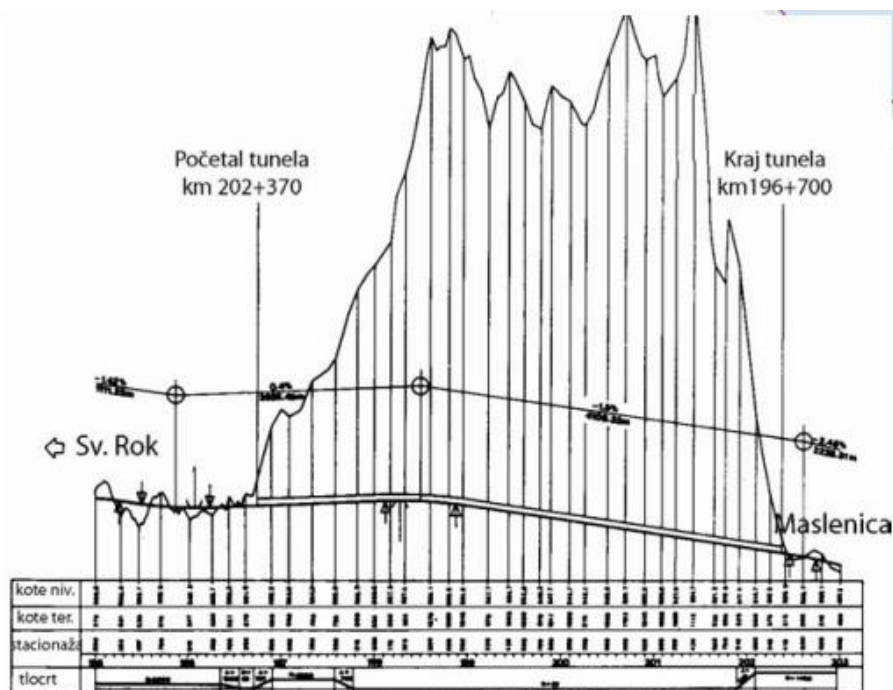
Razlog uspješnosti bušenja tunela uz kvalitetu stijene, dobre strojeve, dobre radnike, stručne projektante i nadzorne inženjere te dobru organizaciju, vjerojatno i činjenica da se buše istodobno dvije cijevi. To omogućava maksimalno iskorištavanje mehanizacije i radne snage te istodobno izvođenje radova u više faza. Time se izbjeglo međusobno ometanje radova i znatno se ubrzalo izvođenje, a smanjio se i zastoj u pojedinim fazama. Na primjer dok se u desnoj tunelskoj cijevi izvodila hidroizolacija, betonska obloga i drugi radovi, bio je moguć odvoz materijala iz iskopa kroz lijevu tunelsku cijev. Ili se u jednoj cijevi bušilo za miniranje, a u drugoj se odvozio materijal. Znatno je pomoglo i kod betonske obloge koju je nemoguće izvoditi dok se iskop obavlja samo u jednoj cijevi. Takav način izgradnje tunela svakako bi se trebao primjenjivati i u građenju drugih, posebno velikih tunela [28].

Tunel Mala Kapela ima najsuvremeniji i najopremljeniji centar za kontrolu prometa u našoj zemlji. U tunelu se nalazi 77 video kamera te pomoću njih se može kontrolirati svaki dio tunela, na video-zidu od 10 četvornih metara. Cijeli sustav je potpuno automatiziran pa kamere reagiraju na svaku promjenu [28].



## 6.2. Tunel Sveti Rok

Tunel Sveti Rok jedan je od ključnih građevina na cijeloj trasi autoceste prema Dalmaciji (Slika 16). Gradio se prije, i bio je udaljeniji i nešto manji od tunela Mala Kapela. Gradnja je započela kopanjem predusjeka 1996. godine, kroz golemi Velebitski masiv, a tunel je u promet pušten 2003. godine. Tunel Sveti Rok je također imao kao i tunel Mala Kapela dvije cijevi, najprije su iskopali desnu (zapadnu) cijev, a lijevu cijev su iskopali naknadno. Desna cijev je duga 5670 metara, a lijeva 5679 metara. Sjeverni portal nalazi se na visini od 561,44 m.n.v., a južni portal na 510,65 m.n.v. [29].



Slika 16. Uzdužni profil tunela Sv. Rok [29]

Investitor tunela je bila Hrvatska uprava za ceste, sadašnje Hrvatske autoceste d.o.o., a projekt je izradio IGH d.d. iz Zagreba( ta je tvrtka i nadzirala gradnju). U gradnju prve faze tunela uključene su desna i lijeva cijev, prilazne ceste, portali i slično. Za kompletnu gradnju tunela potrošeno je 1003 milijuna kuna sa PDV-om [29].

Na prometnom savjetovanju u Zadru 1987. godine javila se ideja o probouju Velebita, jer su se svi dosadašnji prijelazi preko te planine prilagođavali terenu i iz tog razloga nisu bili u stanju zadovoljiti suvremene prometne zahtjeve. Te godine je utvrđena i lokacija ispod Tulovih greda koja je zabilježena i u Prostornom planu Hrvatske [29].

Prave istražne radove onemogućio je rat, a poslije je to također onemogućio i minirani teren. Tunel Sveti Rok je dugi tunel s velikim nadslojem, a po težini izvedbe iskopa pripada srednje teškim tunelima. Projektantima je veliki problem stvorio teren iza južnog portala sa strmim velebitskim padinama, posebno jer su nagibi padine između 200 i 650 metara nadmorske visine iznosili 1:2, a mjestimice i 1:1. Morali su se prilagoditi padinama na način da izbjegavaju zasjeka visokih pokosa te dugačke potporne zidove i što više primjenjivati niske nasipe, dublje usjeka, vijadukte i tunele. Zato su na pojedinim mjestima izgrađeni trakovi za spora vozila, a na trasi su i tri tunela te nekoliko vijadukata [29].

Projektne elementi druge faze:

Što se tiče prve faze izgradnje tunela, iskopane su i podgrađene obje tunelske cijevi, desna je bila opremljena i puštena u promet, a lijeva je služila za evakuaciju i u njoj je bio izveden tamponski sloj kolničke konstrukcije. U lijevoj tunelskoj cijevi projektom su obuhvaćeni građevinski radovi, radovi odvodnje i hidroizolacije te kolnička konstrukcija, a ugradnju opreme i uređaja uključuju sva projektna rješenja. Pošto je desna tunelska cijev izvedena u prvoj fazi, u drugoj fazi je projektom obrađen dovršetak lijeve tunelske cijevi. Također u prvoj fazi izgradnje izvedene su portalne građevine, predusjeci i zaštita njihovih pokosa. Tunel je uglavnom cijelom svojom duljinom u pravcu, osim ulaznog i izlaznog dijela koji su u krivini zbog sprječavanja nepovoljnih optičkih promjena na vozače. Razmak između lijeve i desne tunelske cijevi iznosi 35 metara, a veličina i oblik tunelskih cijevi uvjetovana su brdskim pritiscima, potrebnom širinom kolnika koja iznosi 7,7 (2 x 3,85 m) metara i prostorom za smještaj opreme i uređaja. U cijeloj duljini tunela je betonska obloga debljine 0,3 metara, a izvodi se na već izvedenoj primarnoj zaštiti. Ovisno o kvaliteti iskopane stijene, primarna se zaštita sastoji od ugrađenih sidara, mlaznog betona, čelične mreže ili čeličnih lukova, a u materijalu V. tunelske stijene izrađen je i podložni svod [29].

Po cijeloj dužini tunela između primarnog osiguranja i sekundarne obloge predviđena je PVC hidroizolacija sa zaštitnim slojem geotekstila. Zbog visinskog odnosa autoceste, mogućnosti gravitacijske odvodnje, smanjivanja zagađenja od motornih vozila i geoloških uvjeta niveleta tunela se nalazi u dvostranom nagibu. Sa sjeverne strane je u usponu od 0,4 posto, a prema južnom portalu 1,5 posto. Ali je zato poprečni nagib tunela jednostrešan, u pravcu je 1,5 posto, a u krivinama je 2,5 posto [29].

Visina tunela iznosi 4,5 metara i ona omogućuje nesmetanu montažu prometne signalizacije i ventilacije. S unutrašnje strane energetskog kanala (lijeva strana u smjeru vožnje) smještene su instalacije jake struje, a instalacije slabe struje i hidrantski vod smješteni su na suprotnoj strani. Za odvodnju su predviđeni šuplji rubnjaci, a za sprječavanje širenja vatre kanalizacijom rađeni su sifonski preljevi s potopljenom pregradom. U osi tunela smještene su kanalizacijske cijevi, i u njih se uvodi tekućina s kolnika i voda prikupljena bočnim drenažama, preko revizijskih okna i izravnih sifonskih ispusta [29].

Za izvedbu niša i proširenja tunelske cijevi potrebni su određeni građevinski zahvati, u njima će biti smještena oprema za pogon tunela ili će služiti za okretanje i zaustavljanje vozila. Na tunelu je od građevinskih radova izvedeno 90 posto radova na betonskoj oblozi. Desna i lijeva cijev sastoje se od četiri prolaza za vozila i 15 prolaza za pješake [29].

U prvoj fazi izvedena su i okretišta, opremljena su vatrootpornim vratima za prolaz vozila i s posebnim prolazima za pješake. Također su i pješački prolazi bili izvedeni u prvoj fazi, nalaze se na svakih 350 metara. Iako se radi o jednosmjernom prometu, u sredini tunela su predviđene i dvije niše za uklanjanje vozila s lijeve strane. To je učinjeno radi mogućeg preusmjeravanja prometa iz desne u lijevu tunelsku cijev.

U prvoj fazi je izveden iskop i podgrada u obje tunelske cijevi, a u drugoj fazi je potrebno popraviti iskopani profil i podgradu ukoliko to bude potrebno. Dijelovi u lijevoj cijevi koji su u nepovoljnim geološkim uvjetima izvedeni su betonskom oblogom. Sekundarna betonska

zaštita se izvodi pomoću samohodnih hidrauličkih oplata (Slika 17.) s kampadama od 12 metara [29].



Slika 17. Samohodna hidraulična oplata pred južnim portalom tunela Sv. Rok [29]

Radovi su tekli dobro, bez većih problema. Jedino je hladnoća stvarala problem jer su tokom dana znale biti velike oscilacije u temperaturi, čak i do 40 stupnjeva Celzija. Problem je bio jer se neki radovi nisu mogli izvoditi pri smanjenim temperaturama. Miniranja su se obavljala radi ispravljanja profila, tri puta tjedno i u noćnim satima jer je tada promet najslabiji. [29].

### 6.3. Tunel Učka

Cestovni tunel Učka povezuje Istru sa područjem grada Rijeke. Građen je pet godina, u razdoblju od 1976. do 1981. godine. Sastoji se od jedne tunelske cijevi duljine 5 062 m i uz sebe sadrži još dva mala tunela, a to su Zrinščak 1 i Zrinščak 2. U tim su se tunelima prvi puta primijenili principi Nove austrijske tunelske metode. Za vrijeme iskopa otkriven je vrlo razveden sustav podzemnih prostora velikih dimenzija na udaljenosti 1300 metara od Riječkog portala. Najveća kaverna otkrivena je slučajno, zahvaljujući malom otvoru koji se pojavio u boku tunela tijekom bušenja tunelske cijevi u navlaci krednih vapnenaca na kontaktu s nepropusnim naslagama fliša.

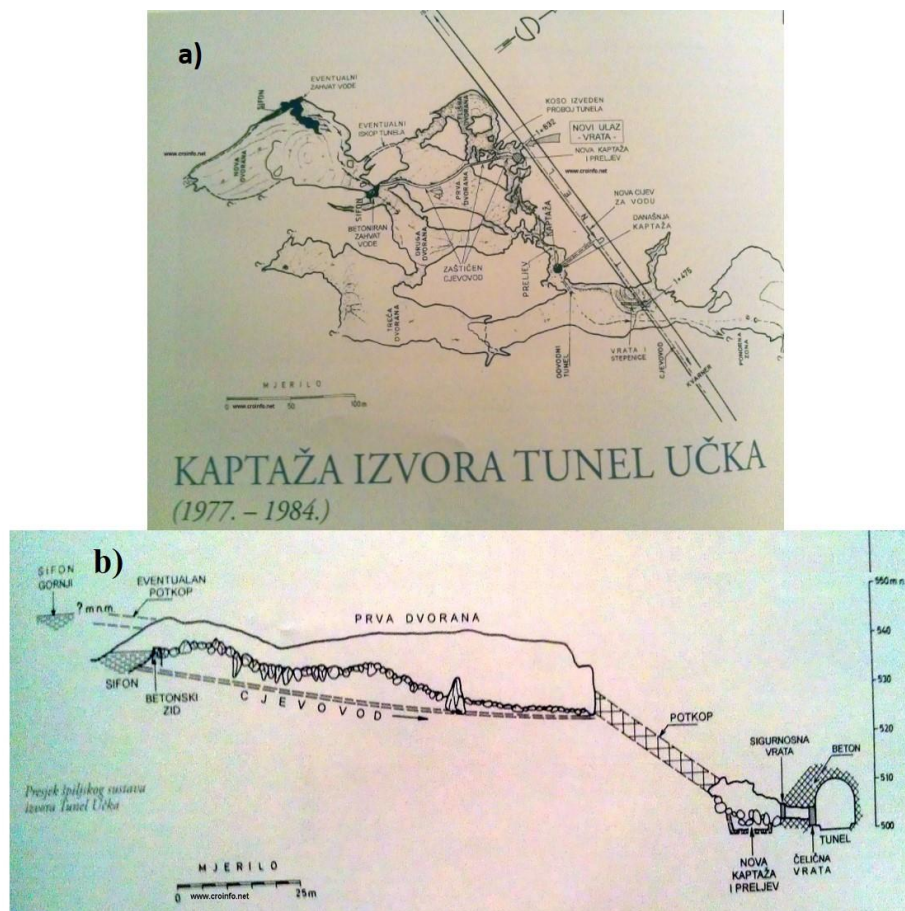
Tijekom detaljnih speleoloških i hidrogeoloških istraživanja te izradom preglednog i geodetskog nacrtu za potrebe izgradnje tunela istražen je i registriran složen sustav kanala i velikih dvorana s aktivnim i stalnim tokom podzemne vode, koji se procjeđuje u podzemlje s najviših dijelova tunela Učke. Da se to nije dogodilo, graditelji ne bi bili svjesni da se ispod tunela nalaze tako veliki podzemni prostori te da je stabilnost tunela ugrožena. Ovaj primjer pokazuje da se i najmanji speleološki objekt mora detaljno istražiti jer on može biti samo mali dio velikog sustava [27].

Za vrijeme miniranja došlo je do poteškoća uslijed ispadanja blokova stijene iz svoda kaverne koja se nalazila ispod tunela, pa su se poduzele mjere kako ne bi došlo do urušavanja tunela. Nije se mogla primjenjivati mehanizacija većih dimenzija jer je ulaz u kavernu bio vrlo uzak [27].

Razmatrano je nekoliko varijanti sanacije na način da se ugradi betonski svod u krovu kaverne, no nije bilo moguće postaviti tešku skelu koja bi pridržavala oplatu i beton svoda tako da su se radovi izveli na način da su zasipali kavernu. Većinu čini zasip koji je napravljen od agregata koji se koristio na gradilištu za proizvodnju betona. Zasipavanje se vršilo iz tunela pomoću stroja koji je transportirao agregat kroz cijevi promjera 150 milimetara. Jedan dio zasipa je ojačan sa 150 kilograma cementa na 1 metar kubni zasipa iz razloga da se spriječi odnošenje zasipa i smanji njegovo slijeganje tijekom cikličkih pojava visokih voda u kavernama. Cement se dodavao u stroj zajedno sa agregatom, a na mjestu ugradnje dodavana

je voda. Ojačani zasip je u cijelosti opkolio osnovni zasip, a u zoni ispod tunela je imao i ulogu oplata pri pod betoniranju svoda kaverne. U sklopu sanacijskih mjera ugrađena je armirano betonska ploča debljine 0,75-1,0 m u kojoj su ostavljene rupe kroz koje se po potrebi mogu ugraditi sidra. Na cijeloj plohi kontakta svoda kaverne i betonske ispune ugrađena su sidra od rebrastog čelika promjera 24 mm orijentirana u pravcu očekivanih vlačnih sila [27].

Tijekom sušnog perioda utvrđeno je da ovim sustavom protječe 10-30 l/s, a u kišnom periodu preko 1 m<sup>3</sup>/s. Voda koja je tijekom sanacijskih radova kaptirana (Fotografija 18.), danas se koristi za napajanje područja grada Opatije [27].



Slika 18.: a) Prikaz kaptaže izvora u tunelu Učka [30]; b) Presjek kaptaže tunel Učka [30]

## 7. ZAKLJUČAK

U ovom radu obrađena je tematika krša, te problemi sa kojima se možemo susresti prilikom gradnje na krškom području. Krš je naziv za karakteristične površinske i podzemne morfološke oblike koji su u geološkom vremenu oblikovani na vapnenačkoj stijenskoj podlozi pod utjecajem oborinske vode. Zahtijeva posebnu pozornost prilikom projektiranja i izgradnje, posebice velikih građevinskih objekata poput brana, prometnica, tunela, akumulacija i slično. Pokazalo se da su brojni problemi bila posljedica nedovoljnog poznavanja geoloških, hidrogeoloških i hidroloških kretanja vode u prostorima krša. Problemi koji su se pojavljivali potakli su istraživače da dublje i detaljnije analiziraju procese koji se zbivaju u površinskim i podzemnim prostorima krških terena. Jedan od većih problema izvođenja geotehničkih istraživanja je svakako novac, koji u većini slučajeva nije predviđen u onolikoj količini koliko zahtijevaju sama istraživanja, cijena i veličina geotehničkog istraživanja varira ovisno o složenosti to jest vrsti projekta i poteškoćama prirodnih odnosno geoloških uvjeta. Nažalost, kada se dogode problemi tijekom iskopa tunela vodi se rasprava o tome jeli teren bio dovoljno istražen. Zbog toga proizlazi zaključak da bi se trebali inženjerski geolozi uključiti u ranoj fazi projektiranja jer oni znaju genezu nastanka područja što geotehničar obično ne zna. Naravno da se krš ne može istražiti tako detaljno da se u iskop tunela ulazi bez rizika. Kao primjer može poslužiti tunel Barton čiji je teren bio detaljno istražen ali se i pored toga desila tragedija sa ljudskim žrtvama. Treba se osvijestiti da svaki iskop tunela je neponovljiva prilika za detaljna geotehnička istraživanja i da se svaki propust koji se dogodio pokuša spriječiti na gradnji sljedećeg tunela.

## 8. LITERATURA:

- [1] Tatjana Vlahović, GEOLOGIJA ZA GRAĐEVINARE; izdanje 2011.
- [2] <http://gradst.unist.hr/eng/other/publishing-hr-page/a/view/id/3793>, datum pristupa 25.03.2020.
- [3] <http://onlinerjecnik.com/rjecnik/komentari/516434>, datum pristupa 25.03.2020.
- [4] Nikolina B., GEOFIZIČKA ISTRAŽIVANJA RASPUCALIH ZONA I KAVERNI U KRŠU, Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultete, datum pristupa 27.03.2020.
- [5] [http://www.skole.hr/nastavni-materijali/materijal?nm\\_action=download\\_materijal&id=194&rev=1](http://www.skole.hr/nastavni-materijali/materijal?nm_action=download_materijal&id=194&rev=1), datum pristupa 28.03.2020.
- [6] <https://sites.google.com/site/primorskahrvatska89/home/reljef>, datum pristupa: 25.03.2020.)
- [7] <http://priodahrvatske.com/krska-polja/>, datum pristupa 29.03.2020.
- [8] Vrste krških polja ([https://www.google.com/search?q=vrste+kr%C5%A1kih+polja&rlz=1C1NHXL\\_hrHR781HR781&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjf-Z6AjYLSAhWQa8AKHSoEC4UQ\\_AUoAXoECAwQAw&biw=1242&bih=597](https://www.google.com/search?q=vrste+kr%C5%A1kih+polja&rlz=1C1NHXL_hrHR781HR781&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=2ahUKEwjf-Z6AjYLSAhWQa8AKHSoEC4UQ_AUoAXoECAwQAw&biw=1242&bih=597)), datum pristupa: 25.03.2020.)
- [9] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?id=49406>, datum pristupa 01.04.2020.
- [10] <https://geografijazasve.me/2017/02/13/vrtace/>, datum pristupa 03.04.2020.
- [11] ([https://sr.wikipedia.org/srel/%D0%92%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0#/media/%D0%94%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BA%D0%B0:Vrtace\\_u\\_lelickom\\_krasu.jpg](https://sr.wikipedia.org/srel/%D0%92%D1%80%D1%82%D0%B0%D1%87%D0%B0#/media/%D0%94%D0%B0%D1%82%D0%BE%D1%82%D0%B5%D0%BA%D0%B0:Vrtace_u_lelickom_krasu.jpg)), datum pristupa 01.01.2021.)
- [12] [https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI\\_1.predavanje\\_Uvod\\_u\\_Mehaniku\\_stijena\\_2012.pdf](https://www.grad.unizg.hr/download/repository/GI_1.predavanje_Uvod_u_Mehaniku_stijena_2012.pdf), datum pristupa 06.04.2020.
- [13] <http://speleologija.eu/markovponor/>, datum pristupa 11.04.2020.
- [14] <http://priodahrvatske.com/vrulje/>, datum pristupa 11.04.2020.



- [15] (<https://moj.izzi.hr/DOS/1660/1826.html>, datum pristupa 26.09.2020.)
- [16] <https://www.geografija.hr/pitajgeografa/sto-je-estavela/>, datum pristupa 12.04.2020.
- [17] <http://niksic.me/lokalna-uprava/organi-uprave/sekretarijat-za-uredenje-prostora-i-zastitu-zivotne-sredine/sektor-za-zastitu-zivotne-sredine/estavela-gornjepoljski-vir/>, datum pristupa 15.04.2020.
- [18] ([https://cistopodzemlje.info/wp-content/uploads/2020/05/819\\_Jama\\_kod\\_Kresa-1-690x470.jpg](https://cistopodzemlje.info/wp-content/uploads/2020/05/819_Jama_kod_Kresa-1-690x470.jpg), datum pristupa 26.09.2020.)
- [19] <http://prirodahrvatske.com/krs/>, datum pristupa 17.04.2020.
- [20] (<http://speleologija.eu/znanost/sige/slike/003-krsHrvatska.jpg>, datum pristupa 26.09.2020.)
- [21] <https://www.geokon.hr/djelatnosti/geotehnicka-istrazivanja>, datum pristupa 18.04.2020.
- [22] [https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids\\_snjezanamihalic/19\\_poglavlje.pdf](https://rudar.rgn.hr/~smihalic/nids_snjezanamihalic/19_poglavlje.pdf), datum pristupa 18.04.2020.
- [23] (<https://www.geotech.hr/wp-content/uploads/2018/06/geotehnicko-istrazno-busenje-4.jpg>, datum pristupa 26.09.2020.)
- [24] ([https://www.geotech.hr/wp-content/uploads/2019/08/geotehnicki\\_profil\\_busotine.jpg](https://www.geotech.hr/wp-content/uploads/2019/08/geotehnicki_profil_busotine.jpg), datum pristupa 27.09.2020.)
- [25] <http://www.ipkin.com/primjeri/Geotehnika%20-%20Geofizicka%20istrazivanja.pdf>, datum pristupa 19.04.2020.
- [26] [Geotehnički problemi gradnje cesta u područjima krša Dalmacije \(Hrvatska\), T. Roje-Bonacci, S. Šestanović i P. Mišćević](#), datum pristupa 09.08.2020.
- [27] <http://sloged.si/wp-content/uploads/Razprave%206.%20posvetovanja/0.2.pdf>, datum pristupa 18.08.2020.
- [28] <http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-56-2004-01-05.pdf>, datum pristupa 01.07.2020.
- [29] (<http://casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE-61-2009-02-05.pdf>, datum pristupa 03.10.2020.)

[30] (<http://croinfo.net/forum/index.php?topic=2124.0>, datum pristupa 15.10.2020.)