

## INDUKOVANI KOLAPSI - STALNI RIZIK KOD IZGRADNJE HIDROTEHNIČKIH OBJEKATA U KARSTU

Petar MILANOVIĆ

### REZIME

Svi građevinski objekti u karstu, a posebno brane, akumulacije, nasipi i tuneli su veoma "ranjivi" zbog prisustva površinskih i podzemnih defekata stene nastalih karstifikacijom. Jedna od najopasnijih posledica ovih defekata je proces nastanka indukovanih kolapsa. Tim procesom su posebno ugrožene akumulacije, bez obzira da li su formirane u celini ili samo delimično na kartstifikovanoj steni. Nastanak kolapsa znači istovremeno i nastanak ponora, a time i gubitak vode iz akumulacije. Veliki broj akumulacija u karstu uspešno funkcioniše zahvaljujući opsežnim antifiltracionim geotehničkim zahvatima ali u nekim slučajevima ni ove mere nisu bile dovoljno efikasne da bi objekat funkcionisao u skladu sa njegovom namenom. Za razliku od ponora i kaverni koji su identifikovani u toku geološkog kartiranja i čije saniranje može da se predvidi projektnim rešenjima, nastanak indukovanih kolapsi je nepredvidljiv i praktično trenutni proces. I pored realizacije obimnih istražnih radova, njihove lokacije je veoma teško otkriti jer su obično zamaskirane debelim slojem aluvijalnih sedimenata.

Rizik nastanka kolapsa i mogućih gubitaka vode iz akumulacija ili hidrotehničkog tunela je prisutan već od prvog dana njihove eksploatacije. Oni mogu da se jave već kod prvog punjenja, što je najčešće, ali i posle mnogo godina funkcionisanja akumulacije. Dobro koncipiranim programom istražnih radova rizik se može znatno smanjiti i svesti na minimum ali ne i eliminisati.

Pristup koji isključuje prihvatanje i minimuma rizika, kad se radi o karstu, je konzervativan i sputava realizaciju projekata, a time često i razvoj određenog karstnog regiona u celini.

**Ključne reči:** Kolaps, ponor, akumulacija, karst, tunel, nasip, podzemna voda.

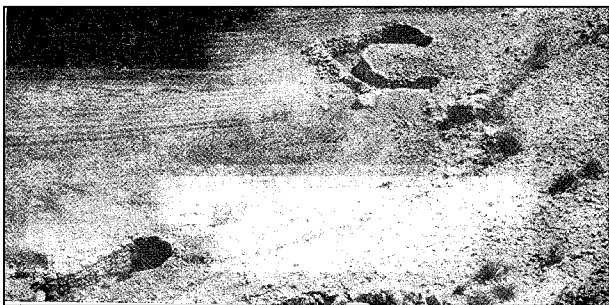
### UVOD

Od pamtiveka stari problem odvodnje karstnih polja prisiljavao je lokalno stanovništvo da izradom raznih

hidrotehničkih objekata za odvodnju produže vremenski period neophodan za poljoprivrednu proizvodnju. Tako još iz rimskog doba datira kanal usečen u krečnjake Enif polja u Turskoj radi odvodnje polja (slika 1). Radi sprečavanja začepjenja, odnosno održavanja konstantnog kapaciteta gutanja ponora i estavela, izvedeni su brojni radovi u karstnim poljima Dinarida, Peloponeza i Turske. Tako J. Cvijić u radu "Karstna polja Hercegovine" (1900) pominje radove na odvodnji Fatničkog polja koje realizuju inženjeri Balif i Andreaš: "Tek se trudnim radovima oko isušavanja ponora uspelo da se i najniži delovi Fatničkog polja daju obrađivati". Istovremeno tim radovima je sprečena erozija i gubitak velikih količina obradivog tla kroz ponore. Za zaštitu ponora korišćeni su raspoloživi prirodni materijali: kamen, drvo i glina (slika 2). Ovakve konstrukcije voda je često već posle prvih značajnijih kiša razarala, pa ih je stalno trebalo obnavljati. Zbog toga su veliki ponori štice od zatrpavanja konstrukcijama koje su imale karakteristike pravih brana (slika 3).



Slika 1. Enif polje, Turska. Proseka u krečnjaku radi odvodnje polja.



Slika 2. Stari priručni način zaštite ponora od zarušavanja sa kamenim suvozidom u Fatničkom polju

Najčešće, debljina nekonsolidovanih sedimenata koji su istaloženi preko karstifikovanog paleoreljefa, varira od nekoliko pa do preko 70 m. Kolapsi, na dnu i u bokovima akumulacija, su formirani dejstvom podzemne gravitacione vode, porne vode i površinske vode (poplavne ili veštački usporene), odnosno procesima erozije i filtracionog razaranja. Registrovani su i slučajevi kada voda pod snažnim uzgonom ili vazduh sabijen u nadizdanskoj zoni, pod dejstvom brzog porasta nivoa izdani, razaraju slabo konsolidovane sedimente i formiraju mesta poniranja (slika 4).



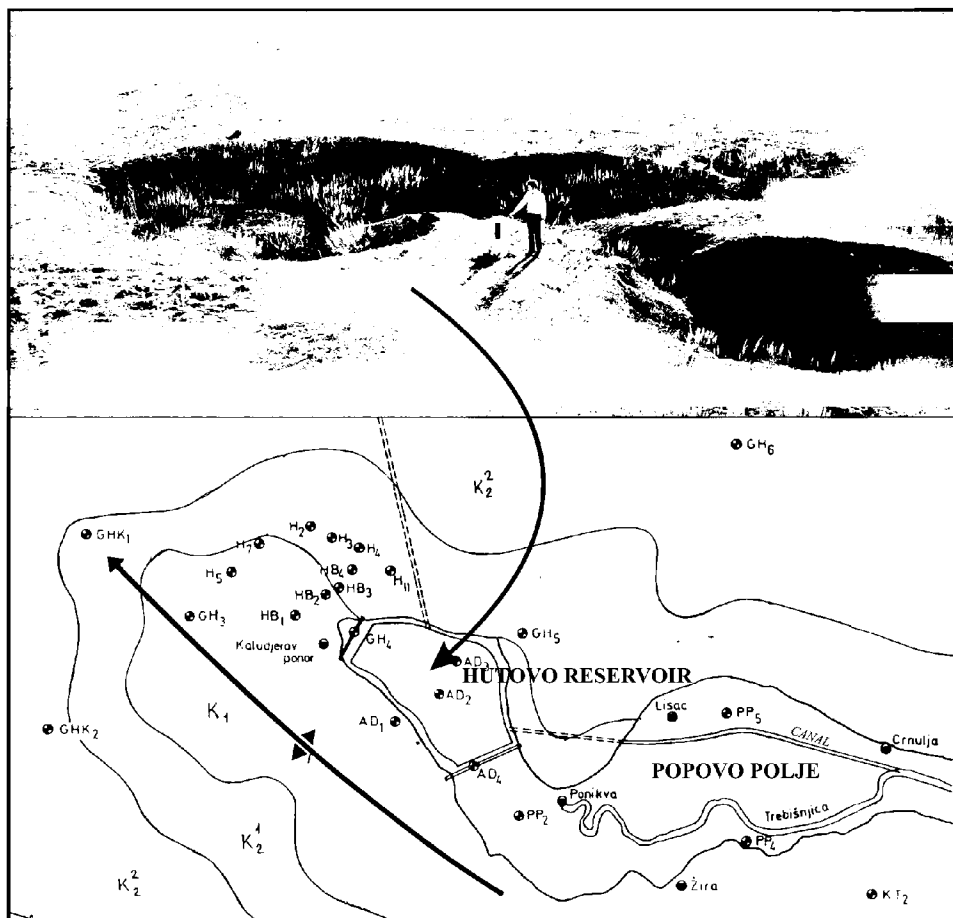
3. Peloponez, Grčka. Stara brana oko ponora na rubu polja

U pojedinim slučajevima, umesto kolapsa levkastog i bunarastog oblika, u aluvijalnom dnu akumulacija se formiraju široke i duge pukotine duž kojih se povremeno formiraju manji ili veći ponori (kolapsi).

I prilikom iskopa i eksploatacije podzemnih prostorija, naročito tunela, kao posledica tektonike i karstifikacije može da dođe do neželjenih efekata (kolapsa) na

površini terena ali i u tunelu zbog prodora velikih količina podzemne vode ili nepremostivih kaverni na trasi tunela.

Kolapsi mogu da ugroze tela nasipa i dna kanala uprkos tome što su zaštićeni raznim vrstama obloga, a najčešće prskanim betonom.



Slika 4 Ponorska zona u kompenzacionom bazenu "Hutovo", Popovo polje

### INDUKOVANI KOLAPSI U AKUMULACIJAMA

Indukovani kolapsi su veoma česte pojave koje ugrožavaju funkcionalnost akumulacija. Kolapsi koji su nastali u periodu prvog punjenja ili zbog intenzivnih oscilacija akumulacija i nivoa podzemnih voda u periodu eksploatacije mogu da prouzrokuju znatne gubitke. Ilustrativni primeri su Keban u Turskoj - 26 m<sup>3</sup>/s; Vrtac u Nikšićkom polju - 25 m<sup>3</sup>/s; Mavrovo u Makedoniji - 7 m<sup>3</sup>/s; Hutovo u Popovom polju - 3 m<sup>3</sup>/s; Perdika u Grčkoj, Wolf Creek u SAD, Tarbela u Pakistanu (ponori u aluvijumu), May u Turskoj i brojnih drugih. U pojedinim slučajevima istražni radovi su pokazali da i po cenu opsežnih geotehničkih zahvata rizik ostaje neprihvatljivo veliki pa se od projekata odustalo (u Cerničkom polju, Hercegovina i Taka polju na Peloponezu).

Paleoreljef ispod slabo konsolidovanih aluvijalnih sedimenata u svim karstnim poljima ima morfologiju sa svim pojavama tipičnim za karst uključujući vrtače i ponore. Tokom sedimentacije ovakav paleoreljef je prekriven sa tera rosom, glinom, peskom, šljunkom u krupnim valuticama. Prilikom sedimentacije neki od ponora su zatrpani i gube svoju funkciju, a drugi zadržavaju stalnu vezu sa površinom na kojoj imaju formu levkastih udubljenja. Jedna od karakteristika ovih ponora je da u toku poplave mogu da promene položaj na površini ali da i dalje ostanu povezani sa ponorom u paleoreljefu.

Veštačke akumulacije menjaju režim podzemnih i površinskih voda i prouzrokuju razne destruktivne procese: sufoziju, eroziju, i efekte vodenog ili vazdušnog "čekića".

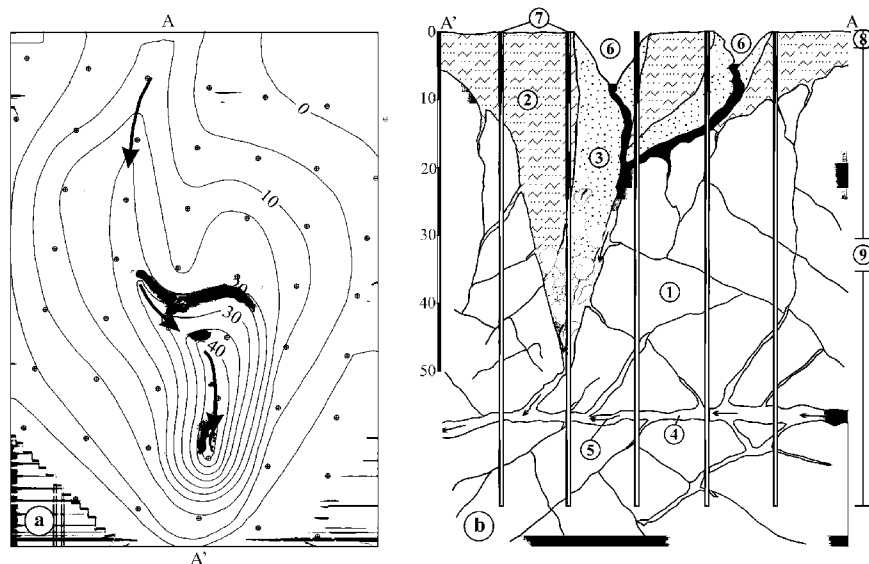
Sufozija može da bude posledica delovanja površinske vode pod dejstvom gravitacije ili podzemne vode pod dejstvom uzgona. Nakon formiranja inicijalnog kanala nastaje zajedničko delovanje sufozije i erozije. U aluvijumu se formiraju vertikalni kanali kružnog oblika koji na površini često imaju oblik levka. To su mesta potencijalnih koncentrisanih gubitaka iz akumulacije. Pored velikih gubitaka vode i velike količine erodovanog materijala se transportuju kroz ove kanale prema nižim erozionim bazisima.

Na mestima gde je karstni kanal prekriven nekonsolidovanim sedimentima snažan uzgon može da prouzrokuje fluidizaciju i "piping" proces. Konačni rezultat je isti kao i u slučaju sufozije.

Karstna polja su naročito podložna formiranju kolapsa (ponora). Zbog toga je i formiranje akumulacija u njima posebno osetljivo. U sušnom periodu nivo podzemnih voda je duboko ispod dna polja. U periodu padavina porast novoa izdani je izuzetno brz i dno akumulacije je izloženo snažnom uzgonu. Kao posledica veoma velikih padavina porast nivoa izdani može da dostigne 80 m/24h. Tada se javljaju kombinovani uticaji uzgona vode i pritiska vazduha sabijenog u kavernama i kanalima ispod dna akumulacije. Kao ilustrativni primeri ugroženosti akumulacija indukovanim kolapsima mogu da posluže neke akumulacije u karstu Dinarida.

Dno kompenzacionog bazena Hutovo, u najnižem delu Popovog polja, u Hercegovini, leži na aluvijalnim sedimentima debljine do 30 m. Topografija paleoreljefa (kredni krečnjaci) je tipično karstna. U prirodnim uslovima kroz 75 registrovanih ponora poniralo je 10 - 15 m<sup>3</sup>/s (slika 4).

Da bi se detaljno istražile karakteristike akumulacionog prostora primenjene su različite istraživačke metode: geološko kartiranje, geoelektrično sondiranje, istražno bušenje, merenje oscilacija nivoa podzemnih voda, merenje brzine vazdušne struje na bušotinama, raskopavanje pojedinih ponora do paleoreljeaf, speleologija i traserska istraživanja primenom Na-fluoresceina, radioaktivnih izotopa i gasovitog obeleživača (dima). Utvrđeno je postojanje, još uvek (povremeno) aktivnog ponora na dubini oko 50 m ispod dna kompenzacionog bazena. Pre prekrivanja aluvijalnim sedimentima to je bila jedna od najznačajnijih ponorskih zona u ovom delu polja. Morfologija ove ponorske zone je prikazana izolinijama na slici 5, (a), a presek kroz zapunjeni ponorski levak na istoj slici (b). Kapacitet gutanja ovog ponora je znatno limitiran u odnosu na njegove mogućnosti pre deponovanja aluvijalnih sedimenata.



Slika 5 Zaptivanje ponora u paleoreljefu

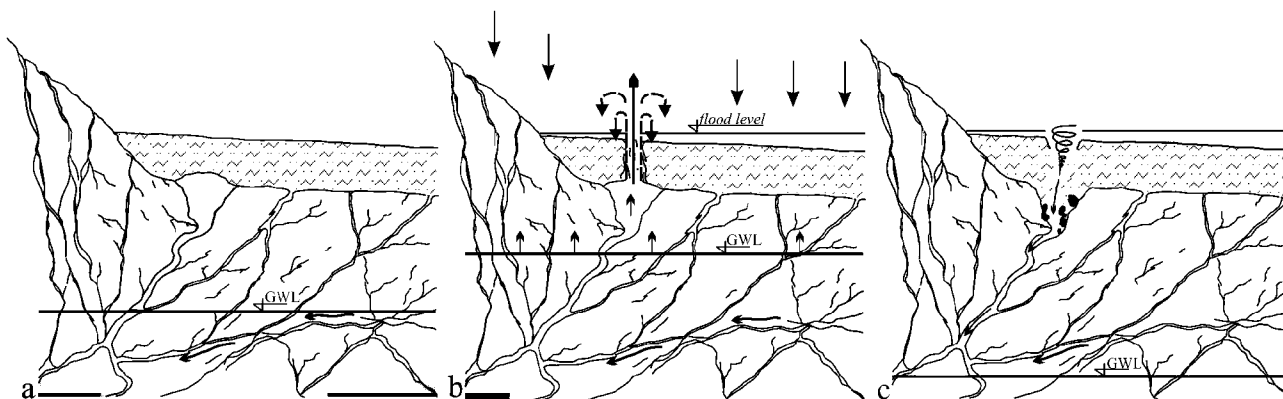
- (a) Izolinije paleoreljefa i raspored istražno-injekcionih bušotina. Strelice pokazuju trasu fosilnog rečnog korita  
 (b) Presek A-A': 1. Karstifikovani krečnjaci, 2. alluvijalni sedimenti, 3. Degradirana zona u aluvijalnim sedimentima, 4. Karstni kanal, 5. Pravac podzemnog toka, 6. Kolaps, 7. Istražno-injekcione bušotine, 8. Kompaktirana zona i 9. Injektirana zona.

Zaptivanje ove ponorske zone je obavljeno injektiranjem krečnjačkog paleoreljefa cementnom injekcionom masom do dubine 70 m. Nakon toga glinovito-cementnom injekcionom masom je zapunjen kanal u aluvijalnom delu ponora, a površina terena iznad ponora kompaktirana i zaštićena PVC folijom.

Tokom prve godine eksploatacije, uprkos opsežnom geotehničkom tretmanu, u dnu bazena se otvorio veliki broj novih ponora (38) koji su odmah sanirani; nakon druge godine formirana su 44 indukovana ponora, a posle treće 36. Veći broj ovih ponora postojao je i ranije ali je bio zamaskiran i neotkriven u fazi istraživanja. Tek nakon punjenja kompenzacionog bazena oni su

aktivirani. Nakon tri godine sanacionih radova oni su sanirani, a gubici svedeni na prihvatljivu količinu.

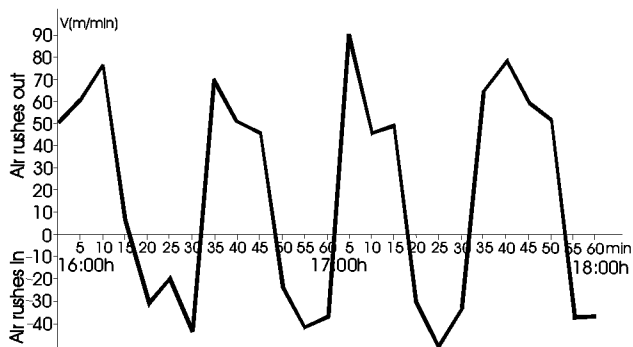
U formiranju ponora u dnu i bokovima ovog kompenzacionog bazena značajnu ulogu je imao vazduh pod pritiskom. U sušnom periodu nivo izdani se nalazi 100 i više metara ispod dna akumulacije. Nakon intezivnih padavina nivo naglo raste. (50 - 80 m/24h). Zarobljeni vazduh nema dovoljno vremena da se brzo evakuira jer su mu sanacijom dna presečeni izlazni kanali pa ostaje zarobljen u pojedinim kavernama i kanalima (slika 6). Veliki pritisak probija na oslabljenim mestima aluvijalni pokrivač i na površini dolazi do kratkotrajne erupcije vode i vazduha. Sa sniženjem nivoa izdani na tom mestu voda ponire.



Slika 6. Formiranje kolapsa-ponora pod dejstvom vazduha pod pritiskom

U toku porasta nivoa izdani uočeno je izbijanje snažne vazdušne struje iz pijeziometričkih bušotina u akumulaciji i po njenom obodu. Obavljena merenja (Kovačina, 1978) su pokazala da brzina vazdušne struje na ustima bušotine dostiže 15 m/s. Takođe je utvrđeno da ova cirkulacija ima karakter pulzacija, odnosno ritmičkog izduvavanja i usisavanja vazduha. Smer cirkulacije vazduha se menjao u periodima 17 do 35 minuta (slika 7). Ova pulzacija je registrovana samo u periodu porasta nivoa izdani, a nikada u periodu opadanja.

Da bi se obezbedila blagovremena evakuacija vazduha pod pritiskom kroz aluvijalne sedimente, do ponora u osnovnoj steni, ugrađene su aeracione cevi. Vrh ovih cevi je izveden iznad maksimalne kote uspora (slika 8).



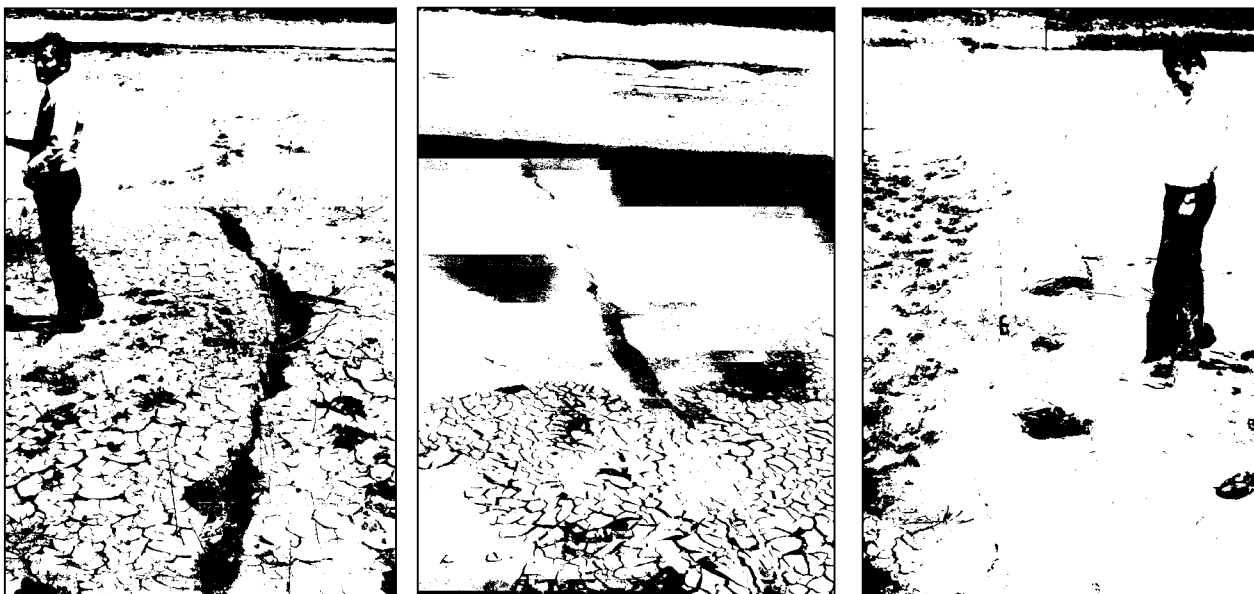
Slika 7. Pulzacije vazduha u bušotinama u periodu porasta nivoa podzemne vode



Slika 8. Aeraciona cev

Da bi se postigla zadovoljavajuća vodrživost dna kompenzacionog bazena je kompaktirano. Tokom prvog punjenja u aluvijalnom dnu su se formirale dugačke pukotine, širine od par do 30 cm, a dužine od par metara do par stotina metara. Prisustvo pukotina je uočeno pre pražnjenja bazena. Bile su vidljive kroz vodu, a neke od njih su formirane i ispod zaštitne PVC folije. Duž nekih od njih, a pogotovu na mestima gde se dve pukotine presecaju, formirani su kolapsi - ponori. U pojedinim slučajevima potonuo je teren između dve bliske pukotine (slika 9). U prirodnim uslovima (pre kompaktiranja) nije registrovano prisustvo pukotina ni posle čestih poplava dubine i do 40 m.

U pojedinim slučajevima ni armirani prskani beton nije bio dovoljno otporan na uzgon vode (slika 10). To su slučajevi kada su prskanim betonom prekrivene estavele, a da pri tome nisu ugrađeni jednosmerni ventili koji omogućuju smanjenje ili eliminaciju uzgona. Učinak ovih ventila je efikasan kada se radi o lokalnim pojavama i relativno kratkotrajnom dejstvu uzgona.

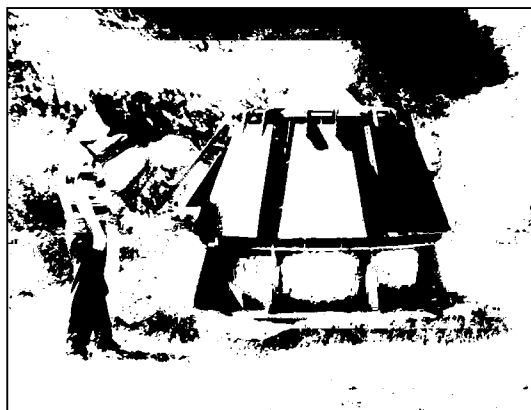


Slika 9. Pukotine u aluvijalnom dnu akumulacije: 1. Široka i dugačka pukotina, 2. Pukotina ispod zaštitne PVC folije, 3. Ponori formirani između dve bliske paralelne pukotine



Slika 10. Kolaps u oblozi od prskanog betona

Poseban problem predstavljaju estavele koje zahvataju velike delove akumulacionog prostora, a pogotovo kad je njihov izvorski režim je dugotrajan. Zbog svoje dvostruke hidrogeološke funkcije svaka estavela je potencijalni ponor, a kad je formirana u aluvijalnom depozitu, i potencijalni kolaps. Da bi se ostvarila vododrživost akumulacije Vrtac u Nikšićkom polju više različitih geotehničkih konstrukcija je korišćeno za izolaciju estavela: cilindrične brane, plombriranje ponora i estavela, jednosmerni ventili i prekrivanjem betonom vodopropusnih zona u krečnjaku. Pokazalo se da su ovi zahvati neefikasni. Posle prvog punjenja i snažnog dugotrajnog uzgona u vlažnoj sezoni, u dnu akumulacije je formirano više od 100 novih ponora (V. Vlahović, 1972). Ovi kolapsi-ponori su formirani u neposrednoj okolini ventilskih konstrukcija i betonskih pokrivača (slika 11). Očigledno je da u ovom slučaju treba primeniti drugu vrstu sanacionih geotehničkih mera.



Slika 11. Akumulacija Vrtac. Indukovani kolapsi prouzrokovani radom akumulacije i jednosmerni ventil ugrađen na jednoj od estavela

Uspešno saniranje kolapsa-ponora u akumulacionom prostoru, u fazi građenja objekta i prvog punjenja, ne znači da je proces njihovog formiranja i destruktivnog dejstva definitivno zaustavljen. Zbog intenzivnih oscilacija nivoa vode u akumulacijama i nivoa podzemne vode ispod i oko njih dolazi do lokalne degradacije injeksione zavese pa se vremenom formiraju novi kolapsi, a time povećavaju gubici. To pokazuju slučajevi akumulacija Mavrovo u Makedoniji, Slano u Nikšićkom polju, Wolf Creek u SAD i nizu drugih.

U slučaju Mavrova, tokom prvog punjenja (1960), dogodila su se dva veća i nekoliko manjih kolapsa-ponora u aluvijalnom pokrivaču koji je deponovan preko

karstifikovanih mermerisanih krečnjaka. Kroz njih se iz akumulacije gubilo između 9 i 12 m<sup>3</sup>/s vode. Kolapsi su zapunjeni lomljenim kamenom i prekriveni sa vodonepropusnim slojem, širine 70 m i dužine 430 m. Sledećih 25 godina (do 1986) akumulacija je funkcionisala bez gubitaka, ali nikad nije napunjena do maksimalne kote. Međutim, stalne oscilacije akumulacije i nivoa podzemne vode ispod nje, prouzrokovale su ispiranje zapune kaverni da bi, nakon ekstremnih padavina i naglog porasta nivoa akumulacije u 1986. godini, odigrale ulogu "okidača" i prouzrokovale velike kolapse, kako u zoni akumulacije tako i van nje (slika 12). Oštećen je lokalni puta i veći broj okolnih zgrada. Neki od kolapsa formirani su i u zoni koja je 25 godina ranije sanirana. Da bi se rešio

ovaj problem obavljeni su obimni istražni radovi, a konačnim rešenjem nasipom je odvojena kritična (ponorska zona) od akumulacionog prostora.



Slika 12. Akumulacija Mavrovo. Kolaps indukovan radom akumulacije.

Da bi se obezbedila vododrživost akumulacije Slano u Nikšićkom polju izvedena je (1961 - 1971) injekciona zavesa dužine 7.011 m i prosečne dubine 56,5 m. To je jedna od najdužih injekcionih zavesa u karstu. Gubici su smanjeni sa 33 m<sup>3</sup>/s na prihvatljivih 3,5 m<sup>3</sup>/s. Zbog lokalne degradacije zavesa, u periodu dužem od 35 godina, formiran je veći broj kolapsa-ponora razne veličine i različitog kapaciteta gutanja. Ukupni gubici su povećani od 4,5 m<sup>3</sup>/s do 7 m<sup>3</sup>/s, pri punoj akumulaciji (M. Vlahović, 2002).

I u slučaju akumulacije Wolf Creek formiranja kolapsa-ponora došlo je mnogo godina nakon izgradnje i funkcionisanja brane i akumulacije. Prve indikacije o početku njegovog formiranja registrovane su 11 godina nakon prvog punjenja. Proces je bio relativno spor tako da je kolaps, a time i gubitak vode iz akumulacije, dostigao kritičnu količinu 17 godina kasnije (1968). Da bi se sprečilo dalje progresivno povećanje gubitaka urađene su dodatna višeredna injekciona zavesa i betonska dijafragma. Za kontrolu efikasnosti ovih radova izbušeno je oko 300 pijezometarskih bušotina.

Dno akumulacije May u Turskoj prekriveno je aluvijalnim sedimentima debljine 15 do 20 m. Ovi sedimenti leže preko karstifikovanih krečnjaka, konglomerata i laporca. Tokom prvog punjenja otvorio se veliki broj kolapsa-ponora u dnu i desnom boku blizu samog tela brane. Nastali gubici su bitno smanjili projektovanu zapreminu akumulacije.

Brana Keban u Tirskoj je locirana na veoma karstifikovanim mermerima i krečnjacima, uključujući slojeve dolomita paleozojske starosti. Tokom prvog punjenja akumulacije uočen je veliki vrtlog na levom boku 150 m uzvodno od brane, i to samo deset metara ispod maksimalne kote uspora. Vir je bio posledica velikog kolapsa u aluvijalnom pokrivaču koji je karstnim kanalom bio povezan sa kavernom ogromnih dimenzija. Kroz novoformirani kolaps iz akumulacije se gubilo oko 26 m<sup>3</sup>/s vode u sekundi. Da bi se ublažili gubici kaverna je zapunjena sa 600.000 m<sup>3</sup> krečnjačkih blokova, šljunka, peska i gline. Zapunjavanje kaverne je obavljeno kroz iskopani šaht prečnika 2,5 m, uključujući i 13 bušotina prečnika od 14 do 17 inča. Cilj ovih radova nije bio potpuno eliminisanje gubitaka. Gubici su svedeni na prihvatljivu količinu.

Akumulacija Perdika u Grčkoj je locirana u krečnjacima gornje krede. Debljina plio-pleistocenskih naslaga u dnu akumulacije (prašinstva glina, prašinsti pesak, krupan pesak i šljunak) varira od 0,5 m do 90 m (Pantzarzis i dr., 1993). Prilikom prvog punjenja akumulacije formiran je veliki broj kolapsa i pukotina u dnu akumulacije. Nije uočna zavisnost između položaja kolapsa i debljine slabo vezanih sedimenata. Nivo podzemne vode je bio oko 70 m ispod dna akumulacije. Sanacione mere se nisu pokazale uspešnim.

I stabilnost nasipa, koji su fundirani na stenama podložnim karstifikaciji, može da bude ugrožena formiranjem kolapsa.

U proteklih 10 - 15 godina stotine kolapsa je formirano duž obale Mrtvog mora i na Izraelskoj i na Jordanskoj strani. Neki od njih su dostizali dubinu 19 m i prečnik 25 m (Y. Yechiely i dr. 2003). Kolapsi su nastali kao posledica rastvaranja slojeva soli i konstantnog opadanja nivoa Mrtvog mora 80 cm - 85 cm godišnje. Ovim procesom je ugrožena i stabilnost nasipa u južnom delu Mrtvog mora (slika 13). Nasipi su izgrađeni da bi se formirali bazeni za isparavanje, a fundirani su (lokalno) na aluvijalnom nanosu koji leži direktno na slojevima soli. Veliki broj kolapsa je formiran i u krugu fabrike potaše čime su ozbiljno ugroženi pojedini objekti (slika 14). Istražni radovi sa ciljem izbora efikasnih geotehničkih mera su u toku.

I nasipi koji su fundirani na aluvijalnim sedimentima koji leže preko karstifikovanih krečnjaka mogu da dožive havariju zbog nastanka kolapsa ispod njihovog tela. Na slici 15 je prikazana havarija nasipa koji je izgrađen duž dela kanala u Popovom polju. Debljina aluvijalnih sedimenata na tom mestu je veća od deset



metara, a paleoreljef je izuzetno karstifikovan. Zaptivanjem kanala u krečnjaku ispod nasipa omogićena je rahabilitacija ovog dela nasipa. Vreme trajnosti sanacionih radova nije moguće predvideti pa se i obnavljanje defekta ne može isključiti.



Slika 13. Kolaps u nasipu pored Mrtvog mora, Izrael (foto J. Charrach)



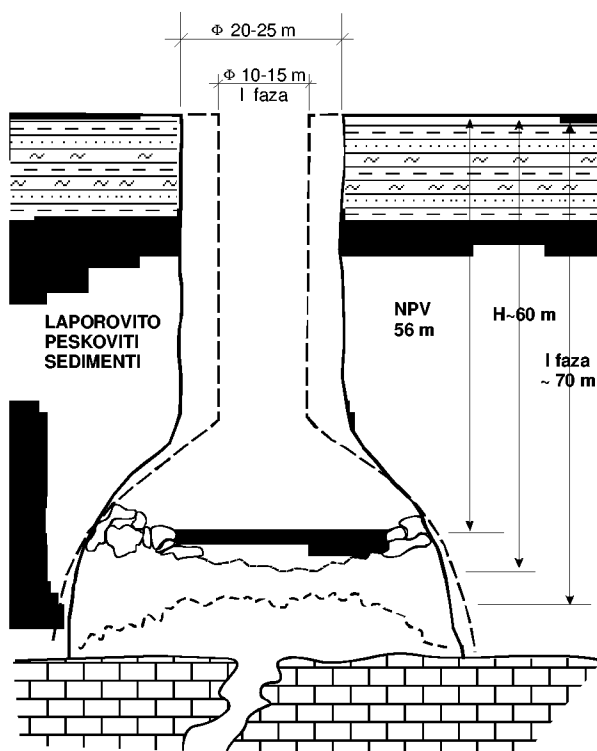
Slika 14. Mrtvo more, Izrael. Kolaps u krugu fabrike (foto J. Charrach)

Postoje slučajevi kada se kolapsi formiraju, a da u radijusu od desetak i više kilometara ne postoji vidljivi uzročnik za njihov nastanak. To se može ilustrovati primerom kolapsa kod Karapinara (plato Konje) u Turskoj. Kolaps prikazan na slici 16 je formiran 2002. godine u peskovitim laporcima čiju podinu čine karstifikovani krečnjaci. Njegova dubina je preko 70 m. Evidentne su tri faze njegovog formiranja. U prvoj fazi, kao posledica oscilacije podzemnih voda i sufozije, formirana je velika šupljina na kontaktu krečnjak -

peskoviti laporac, prečnika preko 30 m i svodom rasterećenja slične visine. U drugoj fazi, prolomom svoda rasterećenja formiran je vertikalni kružni kolaps prečnika 10 - 15 m. Par dana nakon prvog prolamanja ponovo dolazi do vertikalnog prolamanja i formiranja kružnog vertikalnog šahta prečnika 20 - 25 m.



Slika 15. Popovo polje. Kolaps nasipa na dovodnom kanalu za hidroelektranu



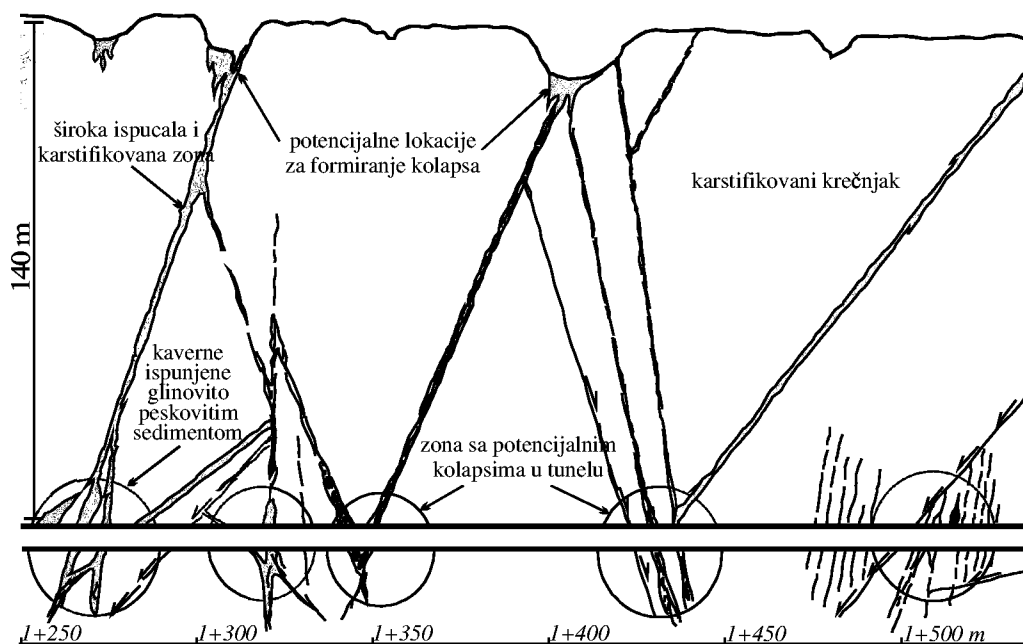
Slika 16. Karapinar, Turska. Dve faze formiranja dubokog kolapsa

## PROBLEMI ISKOPA TUNELA U KARSTU

Izvođenje tunela u karstu, po pravilu, je skopčano sa brojnim problemima među kojima su najčešći: prodori podzemne vode i poplave tunela, savladavanje velikih kaverni (praznih ili zapunjenih pećinskim sedimentima) i kolapsi na površini terena u slučajevima kada je nadsloj iznad tunela mali. Pogotovo su osetljivi hidrotehnički tuneli pod pritiskom. Među brojnim primerima mogu se navesti: tunel pumpne HE Čapljine, i tunel Fatnica - Bileća u Hercegovini, tunel Kuhrang III

u Iranu za prevođenje voda, putni tunel Učka, putni Irahull tunel u Nemačkoj, putni Jaodingshan i željeznički Sichuan-Guizhov tunel i Milwaukee duboki tunnelski sistem u Kini.

Rasedne i kavernozone koje se nalaze u zoni podzemnog rada, a povezane su sa površinom, predstavljaju potencijalnu opasnost po lokalnu stabilnost terena (slika 17). Ove zone su posebno osetljive kada kroz njih prolaze hidrotehnički tuneli pod pritiskom, pogotovo tuneli pumpnih elektrana.



Slika 17. Tunel Dabar - Fatnica. Potencijalne zone formiranja kolapsa u tunelu i na površini

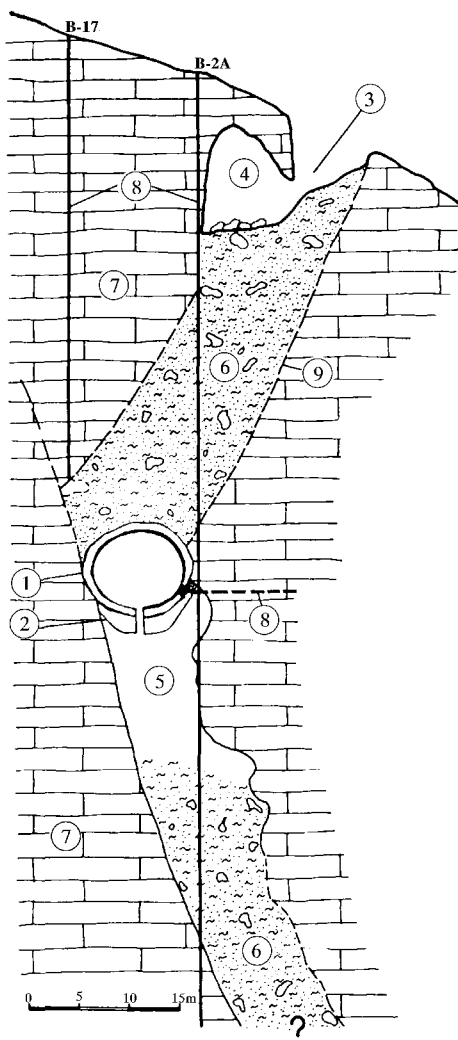
Karakterističan primer je prikazan na slici 18 gde je, u toku rada pumpne elektrane, došlo do ispiranja velikih količina glinovito-peskovitog materijala iz kavernozone tektonske zone. U vrlo kratkom vremenu formirani su kolapsi i na površini terena i ispod tunelske obloge. Posebnu opasnost je predstavljao gubitak oslonca tunelske cevi u dužini od 16 metara. Radi sanacije nastalog defekta obavljani su sledeći istražni radovi: merenje gubitaka u tunelu, istražno bušenje, osmatranje oscilacija nivoa podzemne vode, geološka analiza površine terena, TV karotaž i traserski testovi korišćenjem boje i dima kao trasera. Sanacioni radovi su se sastojali od armirano betonskog svoda fundiranog i ankerisanog u krečnjačke bokove ispod tunelske obloge i zapunjavanjem praznog prostora prepaht betonom i injekcionom masom (slika 19).

Analizirajući kompleksnost problema iskopa tunela u karstu centralne Evrope R. Pottler (2003) zaključuje da investitor i izvođač moraju da prihvate i zajednički da podele rizik krajnjeg ishoda, jer se on ne može izbeći. Istovremeno on pledira na razvoju kulture prihvatanja rizika.

U toku iskopa tunela Kuhrang III u Iranu, dužine 23 km, u više navrata se dogodilo potpuno potapanje deonica tunela koje su prolazile kroz karstifikovane krečnjake. Tek nakon obimnih injekcionih radova nastavljen je iskop. Da bi se sprečili prodori podzemne vode iskop pojedinih delova tunela je bio moguć tek nakon sukcesivnog injektiranja karstifikovanog krečnjaka 50 - 70 m ispred čela tunela.

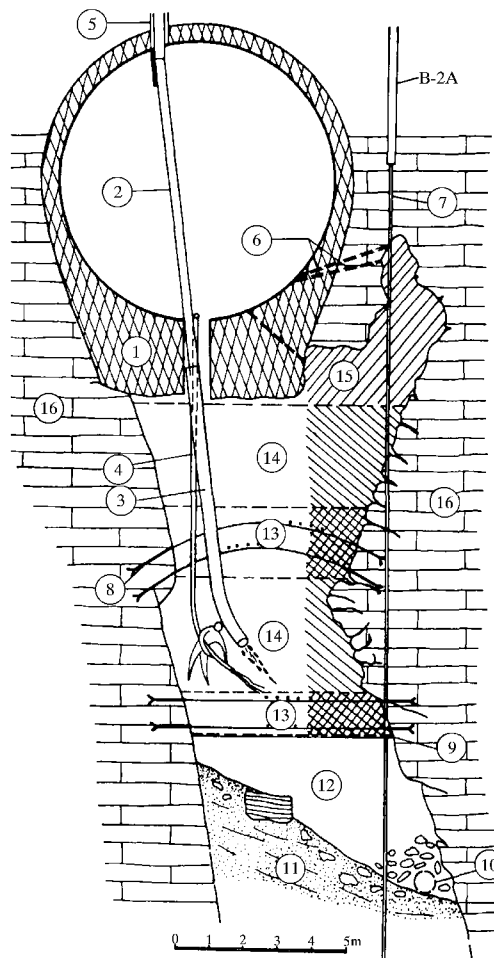
U slučaju tunela PHE Čapljine i pomenutih primera iz Kine kaverne na trasi tunela su bile tolikih dimenzija da je jedino razumno rešenje bilo devijacija tunela, tj. zaobilaznje kaverne najpogodnijom trasom.

Prilikom iskopa Milwauikee tunela, pored prodora podzemne vode u tunel dogodilo se i nekoliko kolapsa na površini koji su ugrozili neke objekte na površini terena. Takođe došlo je do potonuća "krtice" u glinu, pa je za njeno spasavanje urađen pomoćni šaht (Day, 2004).



Slika 18. Dovodni tunel za reverzibilnu HE Čapljinu. Kolapsi u tuneli i na površini terena nastali kao posledica rada elektrane.

1. Tunelska obloga, 2. Dodatno ojačanje obloge, 3. Kolaps, 4. Pećinski deo kolapsa, 5. Prazan prostor ispod tunela, 6. Nekonsolidovana ispunjena kaverne, 7. Krečnjak, 8. Istražna bušotina, 9. Rased.



Slika 19. Reverzibilna HE Čaplina. Ojačavanje tunela u zoni gde je izgubio oslonac.

1. Tunelska obloga, 2. Cev za transport agregata sa površine terena, 3. Fleksibilna cev, 4. Injekciono crevo, 5. Bušotina velikog prečnika sa površine terena, 6. Injekciona bušotina, 7. Istražna bušotina, 8. Anker, 9. Plastična folija, 10. Drenažna cev, 11. Agregat, 12. Filtarski sloj, 13. Armirana lučna konstrukcija, 14. Prepakt beton, 15. Prostor ispunjen injektionom masom, 16. Krečnjak.

## ZAKLJUČCI

Jedna od najčešćih pojava koja ugrožava vododrživost akumulacija u karstu su kolapsi indukovani (izazvani) procesima koji su posledica prisustva kako vode akumulirane na površini tako i podzemne vode. Ovi procesi su naročito izraženi u akumulacijama koje su formirane u karstnim poljima dok su akumulacije u rečnim dolinama i kanjonima manje podložne ovim procesima.

Kolapsi se događaju na mestima gde su fosilne ponorske zone u paleoreljefu prekrivene, odnosno zamaskirane, nekonsolidovanim sedimentima. Postojeće istraživačke metode pružaju vrlo ograničene mogućnosti da se oni tačno lociraju. Zbog toga pojavu kolapsa je nemoguće predvideti, a njihovo događanje je trenutno. Bez obzira na broj u vrste izvedenih istražnih radova i analiza rizik koji nosi njihov nastanak je nemoguće eliminisati. Dobro koncipiran i izveden istraživački program može znatno da doprinese smanjenju rizika ali ne i njegovom potpunom eliminisanju. Da bi se rizik sveo na minimum neophodna je značajna finansijska podrška kako u fazi istraživanja tako i u fazi izvođenja zaptivnih geotehničkih radova.

U većini slučajeva efekat zaptivnih geotehničkih radova se zna tek nakon prvog punjenja akumulacije. Po pravilu nakon prvog punjenja ili posle prve godine funkcionisanja akumulacije postoji potreba za dodatnim zaptivnim radovima. Retki su slučajevi u karstu kada zaptivni radovi koji su projektovani i izvedeni u toku građenja predstavljaju konačno rešenje. Dosadašnja praksa je pokazala da se, u većini slučajeva, tek sa naknadnim geotehničkim radovima postigne vododrživost koja je prihvatljiva za racionalno funkcionisanje objekta. Zbog toga se preporučuje da se, kod realizacije objekata u karstu, unapred predvide sredstva za naknadne sanacione radove i da se deo geotehničke operative zadrži na objektu do njihovog puštanja u pogon, a po potrebi i duže.

Kad su u pitanju tuneli pod pritiskom praksa je pokazala da u njima svakih 3 - 5 godina postoji potreba za značajnijim sanacionim zahvatima.

Za razliku od drugih geoloških sredina pitanja stručne otvorenosti i kulture prihvatanja rizika u karstu imaju izuzetan značaj. Otvoreno izneto iskustvo, sa analizom problema pa i eventualnih promašaja u karstu, ima veliku stručnu vrednost. Takođe, nemogućnost da se rizik u potpunosti eliminiše uslovljava razvoj svojevrstne stručne kulture prihvatanja rizika. Rizik mora da bude podeljen između investitora, projektanta i izvođača. Ali, što više investitor ograničava sretstva za istražne radove, logično je da se njegov udeo u prihvatanju rizika povećava. Međutim ni tada rizik nije isključivo njegov. Najgora solucija je "podviti rep" i pobeći od problema ili se prikloniti varijanti koja garantuje "miran san", bez težnje da se iz onoga što pruža priroda izvuče maksimum, pa makar i po cenu obimnih geotehničkih radova i uz preuzimanje određenog rizika. Da nije bilo spremnosti da se preuzme rizik brojni objekti, koji

godinama uspešno funkcionišu, nikada ne bi bili izgrađeni.

## LITERATURA

- [1] Day M.J. 2004. *Karstic problems in the construction of Milwaukee's Deep Tunnels*. International Journal of geosciences, Environmental Geology. Vol. 45. Springer-Verlag.
- [2] Kovačina N., i Skopljak E. 1978. *Mikropulzacije pritiska u mjernom pijezometru i mogućnost predviđanja promjena nivoa podzemne vode*. Zavod za hidrotehniku građevinskog fakulteta u Sarajevu.
- [3] Milanović P., Vučić M. i Jokanović V. 1987. *A cavern around power plant headrace tunnel tube*. Groundwater effects in geotechnical engineering. A.A. Balkema/Rotterdam.
- [4] Milanović P. 2002. *The environmental impacts of human activities and engineering constructions in karst*. Episodes, Journal of International Geosciences. Vol. 25.
- [5] Milanović P. 2003. *Prevention and Remediation in Karst Engineering*. Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst, Edited by B. F. Back. American Society of Civil Engineers.
- [6] Milanović P. 2004. *Geotechnical Problems - Stability of Dike and Foundations in the Area of dead Sea Works*. Mission Report. Interni izveštaj.
- [7] Pantzartzis P., Emmanuilidis G., Krapp L., Milanović P. 1993. *Karst phenomena and Dam Construction in Greece*. Hydrogeological Processes in Karst Terraines. IAHS Publ. No 207.
- [8] Pottler R. 2003. *Addressing karst in Central Europe*. Tunnels & Tunneling International.
- [9] Vlahović M. 2002. *Sanacija injekcionih zavjesa na akumulacijama "Slano" i "Krupac"*.
- [10] Elektroprivreda Crne Gore A.D. - Nikšić. Nepublikovana informacija.
- [11] Vlahović V., 1972. *Površinsko zaptivanje i otvaranje novih ponora u akumulaciji Vrtac*. Građevinar 7, Zagreb.

[12] Yechieli Y. i dr. 2003. *Formation of sinkholes along the shore of the Dead Sea - Preliminary investigations*. Sinkholes and the Engineering and

Environmental Impacts of Karst. Geotechnical Special Publication No. 122. American Society of Civil Engineers. Reston.

## INDUCED SUBSIDENCES HAZARD AS CONSEQUENCE OF DAMS, RESERVOIRS AND TUNNELS CONSTRUCTION IN KARST

by

Petar MILANOVIĆ

### Summary

Considering all man-made structures in karst, dams, reservoirs, tunnels and dykes are most vulnerable in relation to the induced subsidences. Especially subsidence-prone are reservoirs which are located, entirely or partially, in the karstified rocks covered with unconsolidated sediments. Subsidences occurs under the influence of water (groundwater, reservoir water, flood water, pore water) as erosion and piping action breaks down the support of poorly consolidated sediments. In rare cases, water pressurizing air in the aeration zone has triggered blow-outs through the overlaying sediments.

As consequence of induced subsidence number of reservoirs had considerable leakage after first filling. In some cases induced subsidences occurs after many years of reservoir operation. Formation of subsidence in such a manner is very harmful because their

development is unpredictable and practically instantaneous.

Particularly high risk is present in the case of dam, reservoir and tunnel construction in karst. One axiom of karst construction is that risk cannot be absolutely eliminated by increasing the investigation programme, but has to be minimize. To minimize risk, comprehensive investigation approach and successful treatment has to be applied. To deal with karst treatment successfully, innovation, engineering practice, execution feasibility and commercial understanding must all be employed. In this regard it has to be understood that an economic solution needs investment in both investigations and solutions.

Key words: subsidence, reservoir, karst, tunnel, ground water

Redigovano 16.06.2004.