



*Pregledni rad/Review paper*  
*Primljen/Received: 9. 1. 2019.*  
*Prihvaćen/Accepted: 26. 2. 2019.*

## SPECIFIČNI INŽENJERSKO-GEOLOŠKI I GEOTEHNIČKI PROBLEMI IZGRADNJE BRANA U KRŠKIM TERENIMA

**Aleksandar Golijanin**, Mr. Sc., ing. geol.

Agencija za nadzor nad tržištem Bosne i Hercegovine, [acgolijanin88@gmail.com](mailto:acgolijanin88@gmail.com)

**Dragutin Jevremović**, prof. dr. sc.

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki fakultet, [dragutin.jevremovic@rgf.bg.ac.rs](mailto:dragutin.jevremovic@rgf.bg.ac.rs).

**Tina Đurić**, Mr. Sc., ing. geol.

Univerzitet u Beogradu, Rudarsko-Geološki fakultet, [tina.djuric@rgf.rs](mailto:tina.djuric@rgf.rs).

**Sažetak:** U radu je, na početku, dan opći prikaz problema izgradnje brana – formiranja akumulacija u krškim terenima, zatim specifičnosti krških terena, specifični inženjersko-geološki problemi i mjerodavni činioci uticaja krškog procesa i njegovih tvorevina na izgradnju brana u njima. Izgradnja brana u krškim terenima predstavlja poseban problem koji zahtjeva dopunske uvjete u odnosu na uvjete u ostalim terenima, te je zbog toga neophodna posebna opreznost tokom inženjersko-geoloških istraživanja, ali i izgradnje i eksploatacije. U krškim terenima postoje brojni, složeni, raznovrsni pa i specifični inženjersko-geološki problemi, skoro uvijek nešto drugačiji, na svakoj novoj lokaciji, koji se moraju uzeti u obzir pri izgradnji brana. Na kraju rada daju se karakteristični primjeri inženjersko-geološkog rizika izgradnje brana u krškim terenima, iz inozemne i domaće prakse, gdje su sanacioni radovi dali pozitivna rješenja, ali i primjeri gdje ni obimni i dugotrajni sanacioni radovi sa velikim finansijskim sredstvima, nisu dali zadovoljavajuće rezultate. Posebna pažnja posvećena je riziku proviranja vode iz akumulacije.

**Ključne riječi:** inženjersko-geološki i geotehnički problemi, izgradnja brana, krški tereni.

**Abstract:** The paper first presents a general overview of the problem of dam construction - the formation of reservoirs in karst terrains, followed by the overview of the karst terrains specificities, specificities of engineering geological problems, and the relevant influence factors of the karst process and its forms on dam construction in karst. The construction of dams in karst terrains is a special problem that requires additional conditions in relation to the conditions in other terrains, which is why special care is needed during engineering geological research, as well as construction and exploitation. There are numerous, complex, versatile and specific engineering geological problems in karst terrains, almost always somewhat different, at each new location, which must be taken into account when constructing dams. Typical examples of the engineering geological risk of constructing dams in karst terrains, from foreign and domestic practices, are presented in the end of this paper, including both, remediation works that have given positive solutions, and cases where extensive and long-term remediation works with high financial resources have not given satisfactory results. Special attention is given to the risk of water seepage from the accumulation.

**Keywords:** engineering geological and geotechnical problems, dam construction, karst terrains



## 1. Općenito o izgradnji brana i formiranju akumulacija u krškim terenima

Izgradnjom brana u krškim terenima formirane su brojne akumulacije, neke od njih i sa izvanredno velikom kubaturom vodene mase, pa i u terenima koji su se činili dosta problematičnim u pogledu vododrživosti. No ima i primjera neostvarenih želja, tj. sagrađenih brana a ne stvorenih akumulacija. One su najčešće posljedica raznih činilaca, a naročito geoloških. To najbolje ilustrira primjer akumulacije Mont Žak u Andaluziji, koja nikako ne može da se napuni" (Coyne, A, 1955).

Pored velikog broja izgrađenih brana i formiranih akumulacija u krškim terenima, problemi osiguranja stabilnosti podloge i smanjenje vodopropustljivosti (gubljenja vode iz akumulacije) još uvijek nisu potpuno riješeni.

Ti problemi uvjetovani su složenošću krškog procesa, koji se manifestira ukupnošću geoloških pojava koje nastaju u stijenskoj masi. Krški tereni se odlikuju specifičnim reljefom i hidrografskom mrežom i svojevrsnim režimom površinskih i podzemnih voda. Krški izvori se odlikuju velikom oscilacijom razine. Amplituda oscilacija razina izvora u hercegovačkom kršu iznosi oko 300m. U kišnom periodu za svega 24 sata razina izvora poraste za oko 100m. Brzine kretanja podzemnih voda u kršu su velike. One rastojanje od 35km prođu za svega pet dana, dok im je za prolaženje istog rastojanja u krupnozrnim pjeskovima potrebno dvadeset tri godine (Milanović, P. 1979).

Navešćemo neke primjere brana izgrađenih u kršu koje su se suočile sa problemom gubljenja vode iz akumulacija, odmah nakon njihovog punjenja: Keban (Turska)  $26\text{m}^3/\text{s}$ ; Višegrad (BiH, Republika Srpska)  $24\text{m}^3/\text{s}$ ; Vrtac (Crna Gora)  $14,8\text{m}^3/\text{s}$ ; Camarasa (Španjolska)  $11,2\text{m}^3/\text{s}$ ; Mavrovo (Makedonija)  $9-12\text{m}^3/\text{s}$ ; Salakovac (BiH) više od  $10\text{m}^3/\text{s}$ ; Ataturk (Turska) više od  $10\text{m}^3/\text{s}$ ; Lar (Iran)  $10,8\text{m}^3/\text{s}$ ; Canelles (Španjolska)  $8\text{m}^3/\text{s}$ ; Slano (Crna Gora)  $8\text{m}^3/\text{s}$ ; Buško Blato (BiH)  $5\text{m}^3/\text{s}$ ; Gorica (BiH, Republika Srpska)  $2-3\text{m}^3/\text{s}$  (P. Milanović, 1996) – po najnovijim podacima (2003) gubici, u desnom boku brane, pored injekcione zavese, iznose oko  $4\text{m}^3/\text{s}$ .

Postoje brojni primjeri gdje su za potrebe smanjenja gubitaka vode i osiguranje stabilnosti objekata izvođeni obimni zaptivni radovi koji su u većini slučajeva dali zadovoljavajuće rezultate, odnosno gubitci vode su znatno smanjeni (Keban, Camarasa, Mavrovo), ili svedeni na zanemarljivo malu količinu (Krupac, Canelles). Također, postoje primjeri koji pokazuju, kao što je to slučaj hidrotehničkog objekata Lar, gdje ni dugotrajni sanacioni radovi sa velikim finansijskim sredstvima, nisu dali zadovoljavajuće rezultate. To iskustvo navodi konstruktore brana na obazrivost pri njihovoj izgradnji u krškim terenima, a geologe - „inženjerce” na sistematski pristup istraživanjima radi utvrđivanja svih činilaca koji utječu na definiranje inženjerskogeoloških i hidrogeoloških uvjeta izgradnje brana i formiranja akumulacija u krškim terenima.

Osim gubitaka vode iz akumulacija, postoje brojni primjeri i rušenja brana, pri čemu su uzroci bili najčešće geološke prirode. Statistički podaci govore da je u svijetu, u toku XX stoljeća, srušeno oko 1%, a ozbiljno deformirano ili oštećeno oko 2% od ukupnog broja velikih brana, kojih je bilo oko 9.000 (Zolotarev, S. G., 1990). Po mišljenju L. Milera, trećina do polovina rušenja nastala je zbog geoloških problema – nedovoljan obim geoloških podataka, njihova nepravilna interpretacija, nedovoljno pouzdane geološke prognoze i sl.

Izgradnja brana i formiranje akumulacija u jako karstificiranim karbonatnim stijenskim masama je izuzetno složena i zahtijeva najdetalnija istraživanja. Povećavaju se zahtjevi u pogledu inženjerskogeološke i hidrogeološke dokumentacije, pa se zbog toga izvode složenija i obimnija inženjerskogeološka i hidrogeološka istraživanja. Unaprijed se zna da su ona u vezi sa rizikom velikih gubitaka vode. Taj rizik se uvijek može previdjeti, i najčešće smanjiti, a rijeđe i otkloniti, uz pomoć manje ili više skupih sanacionih - zaptivnih mjera. Cirkulacija podzemnih voda u krečnjacima može dovesti do ispiranja pukotina, ali ne utiče na smanjenje čvrstoće stijenskih masa, kao što je to slučaj sa stijenskim masama koje sadrže glinovitu komponentu. Zbog toga inženjerskogeološka i hidrogeološka istraživanja u ovakvim terenima imaju specifične zadatke i metodiku izvođenja.



I pored navedenih poteškoća i rizika izgradnje brana i formiranja akumulacija u kršu, one će se i dalje graditi. Postavlja se pitanje, a zašto će se graditi? Zašto je u bivšoj Jugoslaviji skoro 50% hidrotehničkih objekata sagrađeno ili projektima predviđeno za gradnju u krškim terenima (Na primjer, čitav hidrosistem Trebišnjice) i to ni manje ni više nego u „ljutom kršu”. Brane se u krškim terenima grade iz sljedećih razloga:

- U krškim terenima riječne doline su najčešće, klisurastog oblika ili oblika kanjona, a to su u morfološkom pogledu najpovoljnije lokacije za pregradni profil betonskih lučnih i gravitacionih brana.
- Riječne doline u krškim terenima su sa velikim padom te je njihov hidroenergetski potencijal veliki. Po nekim procjenama  $1 \text{ m}^3/\text{s}$  vode na padu od oko 650 m proizvede oko 32 miliona kWh godišnje.
- To su područja, u bivšoj Jugoslaviji, sa najvećom količinom prosječnih godišnjih padavina, odnosno područja sa neobično povoljnim uvjetima za hidroenergetsko korištenje vodnih potencijala, što je i jedan od razloga izgradnje i projektiranja skoro 50% hidrotehničkih objekata u području Dinarida.

Izgradnja brana i formiranje akumulacija u krškim terenima predstavlja poseban problem koji zahtijeva dopunske uslove u odnosu na uslove u ostalim terenima, te se zbog toga savjetuje posebna opreznost. Velika opreznost, koja je pozitivna i za svaku preporuku, često je prelazila u negativnu krajnost tj. da treba odbaciti svaki rizik pri izgradnji brana i formiranja akumulacija u kršu. Ovakvo shvatanje ne dovodi do napretka u izgradnji brana i formiranju akumulacija u kršu, već na protiv vodi ka tehničkom konzervatizmu. Suočeni s problemima izgradnje brana i formiranja akumulacija u kraškim terenima, bez lažne skromnosti, možemo reći da su stručnjaci bivše Jugoslavije svojim istraživanjima često išli ispred svjetskih iskustava.

## 2. Specifičnosti krških terena

**Što je ustvari krš?** Od mnogobrojnih objašnjenja i definicija koje u svijetu postoje, navešćemo samo dvije, jednu stariju, domaću - Cvijićevu i jednu stranu, koju su dali ruski stručnjaci.

Cvijić, svjetski pionir u istraživanju krša, dao je ovakvo objašnjenje: „*Krečnjački tereni se odlikuju zatvorenim udubljenjima na površini, a ispod površine spletom pećina i pukotina koje su međusobno povezane; kroz ove šupljine, poredane jedne ispod drugih, između površine zemljišta i nepropustljivog sloja, protiču podzemni vodotoci*”.

Za područje krša, Cvijić je napisao da liči „*na uzburkano okamenjeno more*”, što je najvjerniji geomorfološki opis ovih terena, a *čija je unutrašnjost-podzemlje još zamršenija i neodređenija*. Teško je dati potpuni opis ili karakteristike krškog podzemlja. *Poroznost, pa samim tim i vodopropustljivost krškog podzemlja, uporediva je samo sa sitima ili saćima pčelinjih konstrukcija*.

Definicija krša, koju su dali ruski stručnjaci, a koja je usvojena na savjetovanju stručnjaka iz proučavanja krša u Moskvi 1956. godine, glasi: „*Pod kršom se podrazumijeva sveukupnost geoloških pojava u zemljinoj kori i na njezinoj površini, izazvanih kemijskim rastvaranjem stijena i izraženih u stvaranju šupljina u zemljinoj kori, u rušenju i izmjeni strukture i sastava stijena, u stvaranju cirkulacije i režima podzemnih voda posebnog karaktera, specijalnog reljefa oblasti i naročito režima hidrografske mreže*”.

Na logičko pitanje: Zašto je krš za istraživače i graditelje složen i još uvek zagonetan, najbolje daju odgovor navedene definicije krša.

Iz obje definicije krša slijedi: „**cirkulacija podzemne vode je bit krša**”. Jedino u krškim terenima su moguće pojave izvora izdašnosti i po nekoliko  $\text{m}^3/\text{s}$ , ali i ponori istog kapaciteta i gubljenja vode iz akumulacija, te katastrofalni prodori ogromnih količina vode u tunele i druge podzemne objekte.



Krš je od značaja za građevinske inženjere, a posebno hidrotehničare koji u njemu projektiraju i grade velike građevinske objekte (brane, tuneli i podzemne hale hidroelektrana, kanali) u cilju akumuliranja i korištenja krških voda u različite svrhe. Oni pred sobom imaju takve probleme, kakve nemaju u nekrškim terenima.

Iz navedenih definicija krša se svakako sagledava i odgovor zašto u krškim terenima postoje mnogi, složeni, raznovrsni pa i specifični inženjersko-geološki problemi za izgradnju brana i formiranje akumulacija u njima, skoro uvijek nešto drukčiji na svakoj novoj lokaciji.

Iskustvo stečeno u bivšoj Jugoslaviji pri izgradnji brana i akumulacija, tunela, kanala i drugih objekata, u tipičnim holokrškim terenima, ukazuje da postoji i čitav niz drugih problema o kršu koji još uvijek ostaju otvoreni. Geološka istraživanja treba da obuhvate sve ono što ona obuhvataju pri proučavanju nekrških terena, ali pridajući pri tom posebnu pažnju proučavanju tektonskog sklopa. Tektonski sklop je posebno važan ne samo radi upoznavanja i razjašnjenja krškog procesa već i za racionalno projektiranje i izvođenje hidrotehničkih objekata i geotehničkih melioracija.

Pri proučavanju litološkog sastava u krškim terenima mora se ići u takve detalje u kakve se rijetko ide u nekrškim terenima. I najmanje litofacijalne, čak i skoro nevidljive laporovite i glinovite prevlake na površinama slojevitosti imaju značaja kod procesa karstifikacije. Izuzetnu važnost pri izučavanju krških terena predstavlja utvrđivanje podzemnih krških oblika i hidrogeoloških pojava. U kršu postoji veliki broj specifičnih površinskih i podzemnih morfoloških fenomena. U podzemlju ih je znatno više i mnogo raznovrsnijih, ali je za sada njihovo detaljno proučavanje rjeđe i poznavanje manje. Još uvijek se sve šupljine u kršu, osim prslina i pukotina, nazivaju kavernama.

U morfološkom pogledu, kaverne su najčešće izometrične šupljine, stvorene krškim procesima u krečnjacima i drugim stijenama podložnim karstifikaciji. Po odnosu veličina osa i promjera kaverne se razlikuju od tabularnih šupljina: prslina i pukotina i linearnih šupljina: kanala, krških „crijeva”, sifona i jama. Pećine su u većini slučajeva složeni oblici, kombinirani na najrazličitije načine od kaverni, krških kanala i „crijeva”. Kaverne, s obzirom na njihov oblik i rijeđu međusobnu povezanost, naročito u dubljim dijelovima skaršćenih masa, češće imaju funkciju rezervoara podzemnih voda, dok u višim dijelovima skaršćenih masa, gdje je njihova povezanost s drugim oblicima šupljina češća, one imaju funkciju kolektora provodnika. Nasuprot, kavernama, krški kanali, „crijeva” i pukotine i u plićim i u dubljim dijelovima skaršćenih masa mahom imaju funkciju hidrogeološkog provodnika. Stoga takve šupljine u kršu i čine osnovne komunikacije za kretanje nekada i vrlo jakih podzemnih vodotoka. Navedene činjenice daju nam za pravo da krškim kanalima, „crijevima” i pukotinama, a ne kavernama, pridajemo odlučujući hidrogeološki značaj pri rješavanju hidrotehničkih problema bilo u cilju ispitivanja mogućnosti formiranja akumulacija ili izvođenja melioraciji (navodnjavanje i odvodnjavanje) terena u kršu.

Na kraju, samo da spomenemo da kod krških kanala, „crijeva” i pukotina, pri ocjenjivanju njihove hidrogeološke funkcije ne treba gubiti iz vida njihova stješnjenja - „tijesna grla”, kao ni ukupnu vertikalnu dimenziju sistema šupljina, ili točnije rečeno hidrostatički stub, od kojih neosporno bitno zavise i brzina i količina protoka podzemnih voda u kršu. Za potrebe izgradnje brana i formiranje akumulacija u krškim terenima geološkom istraživanjima (strukturnim, inženjersko-geološkim, hidrogeološkim i geofizičkim) treba odrediti: oblik kaverni, njihovu veličinu, prostorni položaj, način postanka i hidrogeološke funkcije.

### 3. Specifični inženjersko-geološki problemi izgradnje brana - formiranja akumulacija u krškim terenima

Za analizu uvjeta izgradnje brana i formiranje akumulacija u krškim terenima, u geološkom pogledu značajne su dvije sredine. Prvu sredinu čine **osnovne stijenske mase u podlozi brane**, a drugu **površinski pokrivač – kvartarne tvorevine**. Kada je u pitanju prva sredina, neophodno je odrediti: vrste stijenskih masa, homogenost i heterogenost, način pojavljivanja,



ubranost, rasjednutost i ispuicalost. Za drugu sredinu trebalo bi odrediti vrstu i debljinu površinskih tvorevina i njihov utjecaj na stabilnost i filtraciju vode. Ukoliko je to moguće, uvijek bi trebalo težiti k tome da se brana postavi na osnovnim stijenskim masama. Ovaj uvjet obavezan je za brane lučnog tipa.

Pri izgradnji brana u terenima izgrađenim od karbonatnih stijenskih masa skoro da nema drugih teškoća osim onih koje stvara krš. Karbonatne stijenske mase se karakteriziraju veoma različitim uvjetima izgradnje brana. Kompaktni, velike debljine i slabo karstifikovani krečnjaci su povoljna sredina za izgradnju brana. Znatne teškoće pričinjavaju tektonski oštećeni i karstifikovani krečnjaci. Kod njih se po površima slojevitosti, rasjedima, pukotinama i kavernama odvija intenzivna filtracija vode. Karbonatne stijenske mase su skoro uvijek statički sigurna podloga, ali s druge strane, velika mehanička oštećenost i kavernožnost dovode u pitanje mogućnost ekonomične izgradnje brana odnosno formiranja akumulacija na njima. Dosadašnja naša i strana iskustva pokazala su da se u kršu ne mogu bilo gdje graditi brane i stvarati akumulacije, već samo na onim mjestima gdje se još uvijek ekonomičnim tehničkim mjerama može postići zadovoljavajuća vodonepropustljivost akumulacionog bazena. Sužene doline (klisure i kanjoni) u karbonatnim stijenskim masama pružaju često topografski vrlo primamljive profile za izgradnju lučnih brana. Pri lociranju brana na jako karstifikovanim krečnjacima među brojnim pitanjima na koje treba istraživanjima dati odgovor posebno je značajno pitanje ocjene vodopropustljivosti. Zone karstifikacije se mogu nalaziti na dubinama i preko 100 m ispod korita rijeke. Zato pri izboru lokacija treba izbjegavati zone gdje su na znatnim dubinama razvijene velike i brojne krške šupljine.

Kada se govori o specifičnostima inženjersko-geoloških problema koji se javljaju pri izgradnji brana i formiranju akumulacija u krškim terenima, onda se one grubo mogu svrstati, prije svega, na probleme:

- filtracionih svojstava stijenskih masa – vododrživost akumulacionog bazena, tj. gubljenje vode po dnu i obodu akumulacionog bazena i ispod i oko tijela brane,
- neravnomjernih deformacijskih svojstava i
- složenih naponskih stanja.

Ostali problemi kao što su: smicanje tijela brane u podlozi i bokovima, seizmičnost područja, postojanje i upotrebljivost lokalnih geoloških građevinskih materijala i dr. su isti ili su malo različiti od tih problema u ostalim terenima izgrađenih od drugih kamenitih vrsta stijenskih masa. Filtraciona svojstva krških terena pričinjavaju dosta poteškoća zbog složene i specifične poroznosti skaršćenih stijenskih masa, odnosno raznovrsnih odnosa kaverni, pećina, krških kanala, ponora i drugih podzemnih oblika u skaršćenim stijenskim masama. Otuda su filtraciona svojstva presudni činitelj za makro i mikro lociranje pregradnog mjesta, pa i samu veličinu objekta. Filtracija vode može se odvijati kroz stijenske mase površinskog pokrivača i kroz osnovne stijenske mase.

Filtracija vode kroz stijenske mase površinskog pokrivača moguća je u blizini brane (ispod nje ili oko nje, tj. u bokovima na koje se brana oslanja) i iz područja akumulacije. Postoje samo dva slučaja filtracije vode kroz površinski pokrivač na području akumulacije, i to: filtracija vode kroz sipare u dublje horizonte podzemnih voda ili kroz aluvijalne nanose.

Filtracija vode kroz osnovne stijenske mase u podlozi brane odvija se samo kroz stijene sklone rastvaranju, tj. kroz karbonatne stijene, sulfatne stijene i kloridne stijene. Posebno su nepovoljne pojave gipsa i anhidrita, jer su procesi rastvaranja i sufozije u njima intenzivniji u odnosu na krečnjake i dolomitite. Međutim, naslage ili sočiva gipsa i anhidrita se obično proslojavaju ili su okruženi vodonepropustljivim laporcima koji ih „čuvaju” od rastvaranja i omogućuju njihovu dugotrajnost. Takvi laporovito-gipsni kompleksi obično nisu opasni u kontaktu s vodom jer voda ne može izaći izvan naslaga laporaca.

Od svih karbonatnih stijenskih masa za izgradnju brana i formiranje akumulacija najnezahvalniju sredinu čine krečnjaci. Oni su jače vodopropustljivi ako su ispuicali i dublje karstifikovani. Kada se krečnjaci nalaze samo u osnovi brane i ako su ispuicali i razdrobljeni,



problem gubljenja vode se može riješiti izgradnjom vodonepropusne zavjese. Ako se, pak, krečnjaci nalaze u dnu akumulacije, nedaleko od brane, protivfiltracioni radovi postaju znatno obimniji i skuplji.

Među značajne činitelje za izgradnju brana i formiranje akumulacija u krškim terenima spadaju i hidrogeološka svojstva karstnih terena kao što su: vrsta, oblik i veličina izvora, hidraulički mehanizam, prihranjivanje, pražnjenje, izdašnost, veza riječne i jezerske vode, pravac kretanja podzemnih voda i njihova međusobna povezanost, kemizam vode i dr.

Deformacijska svojstava stijenskih masa u kršu imaju svoju specifičnost koja se ogleda u tome što u njima može doći do proloma skaršćenih masa ukoliko kaverne koje se nalaze plitko ispod dna temeljnog iskopa ostanu neotkrivene tokom istraživanja. Ostali problemi vezani za deformaciona svojstva skaršćenih stijenskih masa su slični tim problemima u ostalim terenima izgrađenih od kamenitih stijenskih masa.

U pogledu nosivosti stijena i stabilnosti objekta može se reći da u krškim terenima rijetko nailazimo na onakve teškoće na kakve nailazimo u nekarstnim terenima. Naše krške oblasti su izgrađene, najvećim dijelom, od mezozojskih krečnjaka i dolomitita, koji su dovoljno čvrsti, i koji po svojim elastičnim i drugim osobinama najčešće pružaju sredinu u kojoj se i na kojoj se mogu izgraditi objekti bez većih teškoća i komplikacija, čak i ako su tektonski jače oštećeni. Problem naponskog stanja može u krškim terenima postati bitan zbog mogućih većih defekata skaršćene stijenske mase i što to može dovesti do njihovog loma, naročito zbog nepovoljno orijentiranih filtracionih, ali i drugih pritisaka. Riječne doline u krškim terenima, skoro po pravilu, imaju oblik klisure ili kanjona, pa po tom parametru pružaju povoljne uvjete za lociranje pregradnog mjesta. No sa zaključkom o valjanosti pregradnog profila treba biti oprezan, naročito u tektonski i mehanički oštećenim i jako skaršćenim stijenskim masama.

Osim navedenog, u krškim terenima je veoma bitno utvrditi debljinu riječnog nanosa i karakter sadašnje i stare riječne erozije, stare fosilne ili pogrebene riječne doline. Postanak i starost riječnih dolina u krškim terenima je veoma značajan faktor pri izgradnji brana u dubokim dolinama. Naime, zapaženo je da u geološki mlađim, a dubokim dolinama, stvaranim žljebljenjem pretežno u kvartaru, imamo veću nestabilnost padina i češća odronjavanja, nego u geološki starijim dolinama iste dubine. Ova činjenica je konstatirana u skaršćenim krečnjacima Crne Gore, gdje dubine klisura dostižu i do 1.000 m.

Još jedan problem treba istaknuti, a to je razlika u skaršćenosti krečnjaka i dolomitita. Nekada ona može biti u istoj lokalnosti tako velika da se pri stvaranju akumulacija dolomititi ponašaju kao hidrogeološki izolatori koji omogućuju formiranje akumulacija u krečnjačkim masama iznad njih, ili pored njih. Na primjer, presudan faktor za formiranje akumulacije Bileća na rijeci Trebišnjici, najvećoj ponornici u bivšoj Jugoslaviji, bilo je dolomititsko jezgro u Lastvanskoj antiklinali dinarskog pravca pružanja SZ-JI, koje razdvaja obalu Jadranskog mora i dno i obod vještačkog jezera. Brana „Grahovo” u Crnoj Gori sagrađena je na slojevitim do masivnim gornjotrijaskim dolomititima, koji su ispucali ali nisu jako karstifikovani. Kako su ovi dolomititi čvrste, dobro nose i slabo vodopropusne stijene to su inženjersko-geološki uvjeti za izgradnju brane i formiranje akumulacije bili relativno povoljni. Dakle, nije se pojavio problem vodopropusnosti, a nije bilo ni drugih geoloških problema pri izgradnji ove brane.

Treba naglasiti i to da je Bilećkim jezerom potopljeno krško vrelo Trebišnjice, koje se po punjenju akumulacije našlo na 70m ispod maksimalne kote jezera, koje ima volumen preko 1,2 milijarde m<sup>3</sup>. Na taj način je stvoren veliki dio podzemne akumulacije. Za sagledavanje, danas već ostvarenih, mogućnosti izvedena su detaljna inženjersko-geološka istraživanja koja su se sastojala od: strukturnog bušenja, pijezometarskih osmatranja na širem području između jezera i Jadranskog mora, kao i geofizička ispitivanja. Na osnovu dobivenih krivih geoelektričnog sondiranja ustanovljena je baza karstifikacije. Na osnovu analize rezultata svih izvedenih radova, a posebno istražnog bušenja i geoelektričnog sondiranja, projektirana je i izvedena dvoredna injekciona zavjesa, dubine do 150m i površine 60.000m<sup>2</sup>. Za potrebe injekcione zavjese izbušeno je 44.000m' bušotina.



#### 4. Mjerodavni činitelji utjecaja krškog procesa i njegovih tvorevina na izgradnju brana - formiranje akumulacija

Za realno sagledavanje uticaja krša, tj. procesa karstifikacije i njegovih tvorevina na izgradnju brana i formiranje akumulacija mora se prići sistematskoj analizi brojnih faktora. Među njima najznačajniji su: vrsta, geneza i starost krša, dubina karstifikacije, razvojni stadij krša, površinske i podzemne tvorevine krša, prostorni položaj i pravilnost rasporeda krških fenomena, krška aktivnost i intenzitet skaršćenosti, pokrivenost krša, povezanost krških s ostalim procesima, ispune krških šupljina, stabilnost i prolomi terena, hidrološka i hidrogeološka svojstva terena.

Za donošenje odluke o izgradnji brana od izvanrednog je značaja dubina karstifikacije. Na primjer, pri formiranju akumulacije Naifedoum u Libanu, zbog duboke karstifikacije uslojenih i ispućalih eocenskih krečnjaka, projektirana je zavjesa duga 4 km i dubine do 270m. To je potvrđeno izradom dva probna injekciona polja, s injektiranjem do tih dubina. Navešćemo još nekoliko primjera iz svjetske i domaće inženjerske prakse uticaja dubine karstifikacije na uvjete izgradnje brana, odnosno dubinu injekcione zavjese.

*Brana „Keban” (Kebant Baraji), na rijeci Firat (Euphrates) u Turskoj* konstatirana je potreba injektiranja i do dubine od 250m, premda je prethodno ocijenjeno da je karstifikacija plića i da zaptivni radovi mogu biti plići. Brana je sagrađena na jako karstifikovanim mramorima i krečnjacima s proslojcima dolomitita i karbonatnih škriljaca paleozojske starosti. Visina brane je 211m sa volumenom akumulacije od  $30,6 \times 10^9 \text{m}^3$ . Za potrebe istraživanja pregradnog profila brane iskopano je 11km istražnih galerija u pet nivoa i izbušeno 36.000m' istražnih bušotina. U podlozi akumulacije naknadno je uočen veliki broj kaverni. Tokom završnih radova na brani 1971. godine u lijevom boku brane otkrivena je kaverna volumena  $105.000 \text{m}^3$ , koja je nazvana „Krab”. Dno kaverne nalazilo se na koti 500m, a vrh na koti 539m. Za njeno zapunjavanje utrošeno je oko  $64.000 \text{m}^3$  betona i injekcionog materijala. U toku punjenja akumulacije 1975. godine, kada se nivo vode u akumulaciji po prvi put podigao iznad kote 825,5m, na površini akumulacije su se pojavila slaba vrtložna kretanja u različitim točkama uzduž lijeve obale, oko 150m uzvodno od pregradnog profila brane. U ovom području je u toku 1976. godine, kada je nivo vode u akumulaciji dostigao kotu 838,5m (projektirani radni nivo je na koti 845m), došlo do pojave snažnih vrtložnih tokova sa iznenadnim „praskom” blizu obalne linije. Filtracioni gubici su naglo porasli od  $7,5 \text{m}^3/\text{s}$  na  $26 \text{m}^3/\text{s}$ , što je zahtijevalo naknadna kompleksna istraživanja. Nakon pražnjenja akumulacije ispod kote 838,5m, tokom iste godine, ustanovljeno je da su prethodno pomenuta vrtložna kretanja uzrokovala ispiranje materijala koji je zapunjavao ulaz u kavernu. Na osnovu rezultata naknadnih istraživanja koja su obuhvatila istražno bušenje, ehosondiranje i speleološka ispitivanja ustanovljeno je postojanje velike kaverne koja je nazvana „Petek”. Dno kaverne se nalazi na koti 730m, a vrh na koti 780m. Širina kaverne u planu iznosi 30m, a dužina 90m, s izduženjem u pravcu istok-zapad. Kaverna je s površinom povezana krškim kanalom velikog promjera kroz koji se gubila voda. Utvrđeno je da velika količina vode brzo pritiče u kavernu uzduž postojećih pukotina u stijenskoj masi. Radi zapunjavanja kaverne urađen je šaht promjera 2,5m i 13 bušotina promjera od 35,56 do 43,18cm. U kavernu je ubačeno  $605.000 \text{m}^3$  krečnjaka od najsitnije frakcije pa do blokova. Ukupno je sanirano oko 30 kaverni. Osim saniranja kaverni, izvedena je i dugačka betonska dijafragma i cementna zavjesa i izvršeno je premještanje zgrade hidroelektrane. Izgradnja je potrajala nekoliko godina, a dopunski troškovi za sanacione radove iznosili su 40% od cijene hidročvora. Isticanje vode u Kebanskom potoku, na udaljenosti od oko 2,5km južno od mjesta poniranja, smanjeno je na  $8-9 \text{m}^3/\text{s}$ , što se, u usporedbi sa srednjim proticajem Eufrata ( $635 \text{m}^3/\text{s}$ ), smatra prihvatljivim.

Lučnabrana „Dokan” (*Dokan*) u Iraku, visine 116m, sagrađena je u kanjonu rijeke Lesser Zab. Pregradno mjesto brane nalazi se na krilu antiklinale. Jezgro antiklinale izgrađuju karstifikovani dolomititi, a preko njih se nalaze tankoslojeviti krečnjaci. Brana se oslanja na dva grebena koja su izgrađena od jako karstifikovanih krečnjaka. U periodu 1955-



1957. godine izvedena je jednoreдна protivfiltraciona zavjesa (lijeva i desna), ukupne dužine 2.541m. Kada je nivo vode u akumulaciji dostigao 2/3 maksimalne kote, registrirani su gubici od  $6\text{m}^3/\text{s}$ . Utvrđeno je da voda ponire u karstifikovanim krečnjacima u lijevom boku akumulacije na oko 1,8km od brane. Ponorska zona formirana je na kontaktu krečnjaka i dolomitita. S obzirom na to da ove vode zaobilaze injekcionu zavjesu, pristupilo se njenom produžavanju za 336m, sa dubinom injektiranja od 150-160m. Periodično se, svakih 10-15 godina, izvode injekcioni radovi na obnavljanju zavjese.

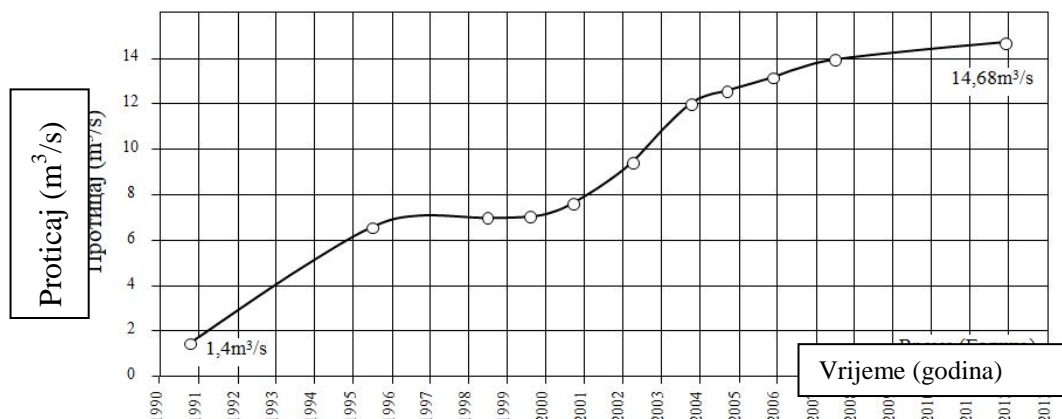
Sličnih problema bilo je i pri izgradnji brana u Dinarskom holokarstu na prostoru bivše Jugoslavije:

- brane „Sklope” na rijeci Lici u Republici Hrvatskoj,
- akumulacije „Buško Blato” u slivu Cetine u Bosni i Hercegovini koja akumulira podzemne vode iz kraških polja jugozapadne Bosne i Hercegovine (Kupreško, Glamočko, Duvanjsko i Livanjsko polje sa Buškim Blatom),
- brane „Salakovac” i „Grabovica” na rijeci Neretvi u Bosni i Hercegovini,
- brana „Višegrad” na rijeci Drini u Bosni i Hercegovini (Republika Srpska),
- brana „Mratinje” na rijeci Pivi u Crnoj Gori i dr.,
- brane i akumulacije: „Slap Zete”, „Glava Zete” i „Krupac”.

Betonska gravitaciona brana „Višegrad”, na Drini u Republici Srpskoj, fundirana je u karstifikovanim krečnjacima i dolomititima koji leže preko kompleksa laporovitih krečnjaka, pješčara i glinaca. U fazi istraživanja za definiranje pregradnog mjesta, bušotine su u malom stupnju konstatirale kavernožnost. Karstifikacija je naknadno ustanovljena u bokovima (u istražnim galerijama), a u riječnom koritu, tokom iskopa temeljne jame utvrđeno je postojanje velikih krških kanala. Neki od njih bili su zapunjeni kalcitom i tera rosom. Na nedovoljno izučenom problemu karstifikacije i procjeni njezinog utjecaja na sigurno funkcioniranje, izgrađena je betonska gravitaciona brana visine 50m, a u kruni je širine oko 280m. Izvedena je injekciona zavjesa dubine 50m, a lokalno i 60m. Izvođenje injekcione zavjese za branu „Višegrad” je započelo poduzeće „Geoinženjering” Sarajevo 1988. godine, a do siječnja 1989. godine završeni su radovi na lijevom boku, središnjem delu i započeti radovi na desnom boku.

Prilikom punjenja akumulacije pri nivou od 4,0m ispod maksimalno predviđene kote akumulacije, nizvodno od brane – na mjestu slapišta, u riječnom koritu registrirane su pojave izvora. Izvorska voda je bila bistra, ali s povećanom temperaturom u odnosu na okolnu vodu ( $14,4\text{--}18,7^\circ\text{C}$ ). Ronilačke ekipe su ustanovile da iz karstifikovanih stijenskih masa u dnu korita ističe voda s velikim sadržajem glinovitih suspendiranih čestica. Nakon konstatiranja te pojave, pristupilo se saniranju injekcione zavjese u zoni bloka broj 5, u širini od 30m i dubini od 110m. Nakon prvih negativnih rezultata na kontrolnim bušotinama, injekcione radove je nastavilo poduzeće „Geosonda” iz Beograda. Prva faza sanacionog injektiranja izvedena je do dubine od 110m, ali ne i dublje, zbog veoma brze filtracije. Prilikom izvođenja injekcione zavjese 1990. godine bilo je velikih problema. Tokom bušenja injekcionih bušotina dolazilo je do gubitka vode, propadanja pribora, a tokom injektiranja i do povećanih utrošaka injekcione mase (i preko  $10.000\text{kg}/\text{m}'$ ). To je zahtijevalo promjenu projekta injektiranja, tj. smanjenje rastojanja između injekcionih bušotina sa 1,5m na 0,7m i produbljivanje bušotina u nekim sektorima za jednu do dvije etaže. Za injektiranje je utrošeno 6.400t suhe mase. Unatoč izvedenim sanacionim radovima, količina vode na izvorima nizvodno od brane nije prestala, već se povećala od prvobitnih  $1,4\text{m}^3/\text{s}$  (1990. god.) na  $14,68\text{m}^3/\text{s}$  (prosinac 2012. god.), Sl. 1.





Slika 1. Zbirni proticaj na izvorima u koritu Drine ispod brane (Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi” Beograd i „Stucky Ltd.”).

Izdašnost izvora se u toku pet godina (1991-1996) povećala sa  $1,4\text{m}^3/\text{s}$  (što u odnosu na prosječan proticaj Drine od  $342\text{m}^3/\text{s}$  na pregradnom profilu iznosi  $0,41\%$ ) na  $6,5\text{m}^3/\text{s}$  ( $1,90\%$  u odnosu na prosječan proticaj Drine na pregradnom profilu). Nakon 1996. godine izvršeno je pet mjerenja izdašnosti izvora i dobijeni su sljedeći rezultati:  $7,18\text{m}^3/\text{s}$  (1999),  $7,01\text{m}^3/\text{s}$  (2000),  $7,56\text{m}^3/\text{s}$  (2001) i  $9,41\text{m}^3/\text{s}$  (2003). Kao što se vidi, u periodu 2000-2003. godine isticanje je dobilo radikalni trend rasta u odnosu na prethodni period iznosilo je  $2,75\%$  od prosječnog proticaja Drine na pregradnom profilu. Radi utvrđivanja prostornog položaja zona filtracije, izvedena su brojna istraživanja na osnovu kojih su izvedeni sledeći zaključci:

- izvorska voda je mješavina termalnih voda koje dolaze iz većih dubina (u blizini je Višegradska banja) i vode iz akumulacije;
- najveći gubici vode iz akumulacije su ispod centralnog dijela zavjese uzduž zone širine oko 30m i dubine oko 60-100m;
- filtracija se odvija uzduž dvije karstifikovane razlomne zone. Jedna od njih se pruža duž korita rijeke, a druga dijagonalno u odnosu na rijeku. Glavni filtracioni tokovi nalaze se na dubini od oko 108m, ali ih treba očekivati i na dubinama ispod 110m.

Glavni razlog ozbiljnih problema koji su pratili izvođenje injektione zavjese je nedovoljno poznavanje procesa karstifikacije. Ni jedna vrsta geoloških istraživanja, kao ni ona u toku izvođenja injektione zavjese nisu dala pouzdane odgovore na osnovna pitanja: geneze karstifikacije, dubine, veličine i svojstava krških oblika i zakonomjernosti njihovog prostornog pojavljivanja. Kao otvoreno pitanje je ostala i prognoza ponašanja karstifikovanih stijenskih masa u uvjetima formiranja uspora. Dopunska istraživanja koja su obavljena 1996. godine, a potom i 1999. godine, pokazala su, da bi dalje nekontrolirano proviranje vode ispod brane, moglo prouzrokovati ozbiljne štete, ne samo zbog gubitaka vode iz akumulacije, već više zbog uticaja na sigurnost i samog objekta. Zbog toga su Institutu „Jaroslav Černi” iz Beograda (tokom 2008-2009. god.) povjerena detaljna istraživanja, kojima su određeni generalni pravci kretanja vode kroz podzemlje u zoni brane. Na osnovu rezultata tih istraživanja 2010. godine izrađen je „Projekat sanacije proviranja voda ispod brane HE „Višegrad”.

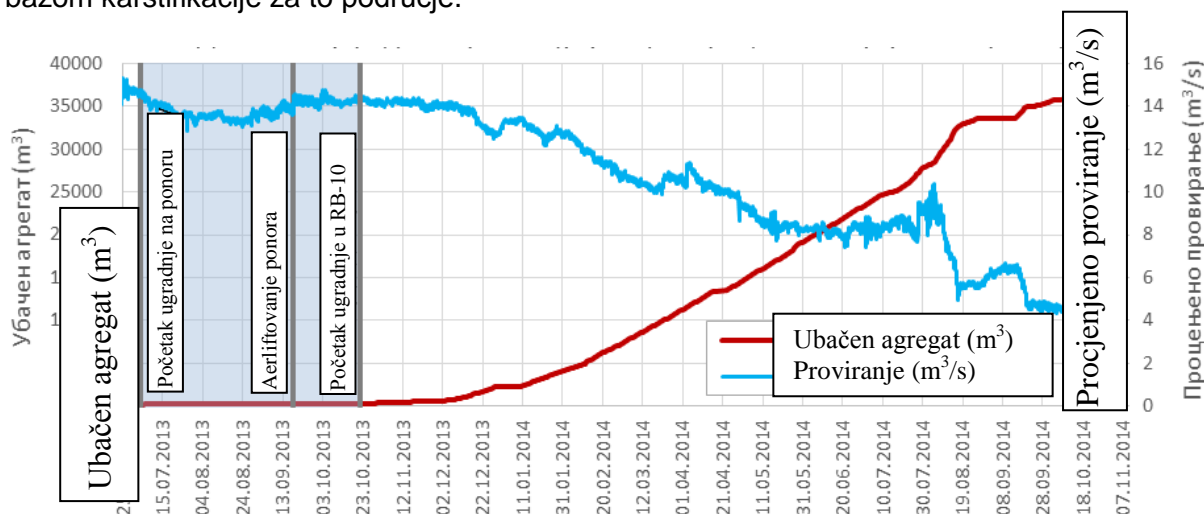
Za potrebe realizacije sanacionih radova I faze, u obimu akumulacije, izvedeno je: 10 istražno repernih bušotina (ukupne dubine 1733m), u koje je ugrađena oprema za monitoring. Potom su izvedene još 4 bušotine (ukupne dubine 697m) u kruni brane i tri pijezometarske bušotine iz injektione galerije. U cilju monitoringa izvora u koritu Drine, nizvodno od brane, izgrađeni su konzolni nosači na koje su postavljeni mjerači brzine vode, sonde za merenje elektrootpornosti i podvodne video kamere. Najprije je zaptivanje pokušano injektiranjem, pri čemu je utrošeno: oko 2.503,251t cementa, 541,784t pijeska, 91,891t bentonita i 24,638t aditiva, odnosno ukupno  $2.392.842\text{l}$  ( $\text{dm}^3$ ) injektione mase. Kako



su rezultati zaptivanja bili neznatni, pristupilo se intervenciji u rejonu samog ponora, ručnim ubacivanjem granuliranog materijala. Nakon ugradnje svega 177m<sup>3</sup> agregata konstatirano je zagušenje ulaznog djela ponora. Zbog toga je dalji rad na toj lokaciji prekinut, a potom je materijal ubacivan kroz istražno-reperne bušotine (locirane u akumulaciji). Za tu operaciju izvršeno je proširenje bušotina na Ø500mm, što je omogućilo i mehanizirani način ubacivanja granulata (gumenom transportnom trakom). Ukupno je ugrađeno oko 37.000m<sup>3</sup> (u RB-10 oko 20.422m<sup>3</sup>; u RB-4 oko 23m<sup>3</sup>; u B-15 oko 15.027m<sup>3</sup> i uponor 1.524m<sup>3</sup>). Taj materijal je predstavljao krečnjačku rizlu sljedećih frakcija: 0-4mm, 4-8 mm, 8-16mm, i 16-32mm.

Uslijed utroška raspoloživih finansijskih sredstava, donijeta je odluka da se radovi prekinu i izvrši konzervacija bušotina, kako bi kasnije bio moguć nastavak radova na sanaciji. Izvršenim sanacionim radovima, koji su u najkraćim crtama prikazani, postignut je značajan uspjeh u smanjenju proviranja (s oko 14,68m<sup>3</sup>/s na oko 4,5m<sup>3</sup>/s), što je vidljivo na sl. 2. Na osnovu nekoliko naprijed navedenih primjera može se izvesti zaključak da je u krškim terenima za izbor mjesta brane, između ostalih zadataka, neophodna analiza povijesti formiranja riječne doline i različitih faza karstifikacije.

Analizom rezultata pokusa VDP-a u 150 dubokih bušotina u istočnoj Hercegovini, sa 398 etaža od po 5m, konstatirano je prisustvo krških šupljina u 138 etaža. Pri tom najviše otvorenih kaverni (57%) bilo je na dubini između 50 i 150m, dok je najkarstifikovanija zona od 0-15m. Na dubini većoj od 270m nije konstatirana vodopropustljivost veća od 30Lu, koja bi se mogla pripisati značajnijoj karstifikaciji, pa se regionalno posmatrano ta dubina smatra bazom karstifikacije za to područje.



Slika 2. Dijagram efekata sanacije: granulat (crvena linija), i proviranje vode (plavo) - (Institut „Jaroslav Černi“ Beograd i „Stucky“ Ltd.).

U dubokim istražnim bušotinama u Crnogorskom primorju konstatirana je skaršećnost u mezozojskim krečnjacima i na dubini preko 2.000m ispod površine mora. No ipak, za izgradnju brana i formiranje akumulacija najveći značaj ima neogeni i kvartarni krš, a naročito aktivni krš koji se i sada razvija.

U karstnim terenima se ispituje još i stabilnost padina i podloge na kojoj će se fundirati objekti. To se čini za uvjete intaktnog terena, zatim u uvjetima iskopa, te kasnije za vrijeme eksploatacije. Kao specifičan problem javlja se i mogućnost proloma iznad velikih krških šupljina, odnosno kaverni i pećina u zoni iznad fundiranja stope objekta. Na primjer, pri izgradnji nasute brane Slano u Nikšićkom polju, u lijevom boku tokom otvaranja kamenoloma za nasipanje tijela brane, naišlo se na ogromnu pećinu ispod oslonca brane, kroz koju se gubilo 2-3m<sup>3</sup>/s vode u vrtačku retenziju prije injektiranja.

Interesantno je spomenuti da je tijelo brane Grabovica, na rijeci Neretvi u Bosni i Hercegovini, sa strojarom locirano iznad kaverne ispunjene glinovito-pjeskovito-šljunkovitim



materijalom. Naime, u vodotoku, bliže desnoj obali, utvrđen je rasjed uzduž kojega je formirana kaverna. Kaverna je utvrđena fazi prvih inženjersko-geoloških istraživanja 1958. godine. Stvarne dimenzije kaverne utvrđene su tek u fazi izgradnje i to samo u temelju strojare, dok su saznanja o njezinom prostornom položaju ispod temelja brane zasnovana samo na osnovu podataka istražnog bušenja.

Posebna pažnja posvećuje se utvrđivanju stabilnosti na pregradnom mjestu i u obimu akumulacije. Kako se pregradno mjesto u krškim terenima odabira tako da, najčešće, bude u kanjonima i klisurama, to se u tim dijelovima najčešće javljaju odronjavanja stenskih masa. Na primjer, pri izgradnji brane „Mratinje”, na rijeci Pivi, vršeno je masovno preventivno kavanje nestabilnih kamenih blokova iznad brane kako ne bi ugrozili graditelje, a kasnije i eksploataciju objekta. Nažalost, i nakon četrdesetak godina od početka eksploatacije postoje problemi sa odronjavanjem. Odronjavanje stijenskih masa u akumulaciji u blizini pregradnog mjesta može da izazove pojavu prelivnih valova, a u samoj akumulaciji njezino zapunjavanje.

Osim navedenog, u krškim terenima dolazi i do pojave podzemnih udara i naglih prodora voda u ranije izolirane kaverne, pri deformacijama koje nastaju po dnu i rjeđe po obodu podzemnog dijela akumulacije. Takve deformacije se javljaju tokom punjenja, neposredno po punjenju akumulacije, ali i godinu do dvije nakon toga. Seizmološki instrumenti te potrese registriraju kao slabije, lokalne potrese. Ove pojave u literaturi se nazivaju „*pobuđena ili inducirana seizmičnost*”. Problem „pobuđene ili inducirane seizmičnosti” kod nas je prvi put bio predmet proučavanja na akumulaciji „Bileća” u Bosni i Hercegovini (Republika Srpska). Od početka punjenja akumulacije 01.11.1967. do 31.10.1980. godine registrirano je 11.413 potresa, koji su oslobodili energiju od  $1,392 \cdot 10^{17}$  erga. Najveći broj potresa desio se pri maksimalnom nivou vode u akumulaciji (1968/69 i 1969/70). Slične pojave registrirane su i tokom punjenja akumulacije „Piva” u Crnoj Gori. Odmah nakon punjenja akumulacije uočeno je intenziviranje seizmičke aktivnosti u cijelom području akumulacionog jezera. Intenzivna seizmička aktivnost bila je u periodu 1977-1979. godine, kada je registrirano preko 500 potresa s magnitudom od 1,5 do 4,1. Najjači registrirani potres od početka punjenja pa do danas u zoni brane i akumulacije imao je magnitudu 4,2, odnosno VI jedinica Merkalijeve skale, dok se potresi slabijih intenziteta registriraju i danas. Dosad o razvoju pojave „pobuđene ili inducirana seizmičnosti” ostalo je mnogo nejasnog. Može se pretpostaviti da formiranje akumulacije stvara pritisak koji izaziva preraspodjelu postojećeg naponskog stanja na području akumulacije i šire, a također dodatno utječe i na promjenu dinamike dubinskih podzemnih voda i plinova, te remećenje toplinskog polja. Sve to zajedno utječe na genezu tehnogenih potresa.

## 5. Kratak osvrt na mogućnost izgradnje brana i formiranja akumulacija u kršu

Izgradnja brana i formiranje akumulacija u krškim terenima bio bi uzaludan pokušaj i rasipanje finansijskih sredstava, ako bismo pokušali da to uradimo ma gdje u kršu, ako za to ne bi postojali posebni geološki uvjeti koji bi to omogućili. Prvi pokušaj da se gradi brana u kršu bio je učinjen prije Drugog svjetskog rata na rijeci Zeti, kod Slapa, u Crnoj Gori. Izgradnja brane je započeta 1938. godine, a završena u prvim poslijeratnim godinama 1949-1951 kada su završeni radovi na brani, dovodnom kanalu i strojari. Brana je betonsko-gravitacionog tipa visine 10m, a izgrađena je u skaršećnom rudisnom krečnjaku gornjokredne starosti. Akumulacija je formirana u koritu rijeke izgrađenom od šljunka, pijeska i gline. Krš je bio plitak, neposredno ispod aluvijona. U koritu rijeke, oko 100m uzvodno, nalazili su se ponori u lijevoj i desnoj dolinskoj strani – obali rijeke Zete. Obojena voda iz jednog ponora redovno se pojavljivala na većem broju izvora nizvodno od Slapa i na samom Slapu, što govori da su podzemni krški kanali povezani i razgranati. Brzina vode u krškim kanalima iznosila je 5cm/s. Ponori u koritu rijeke onemogućili su stvaranje akumulacije iako je brana niska. Bilo je neophodno poduzeti niz tehničkih mjera da se ponori zatvore. Pokušalo se sa plombiranjem ponora i prekrivanjem vodonepropusnim glinenim tepihom. U tome se nije uspjelo. Nakon dva mjeseca pojavile su se deformacije u glinenom tepihu, a kasnije i otvaranje ponora, koji funkcioniraju i dan-danas. To je bila opomena stručnjacima koji se



bave ovim problemima da se pri izgradnji brana u kršu mora oprezno prilaziti, a način rješenja vododrživosti prilagoditi hidrogeološkim uvjetima.

Do današnjih dana na prostoru bivše Jugoslavije izgrađeno je niz brana, vrlo velikih sa usporom od više desetina metara pa i preko 100m visine, kojima su formirane akumulacije u jako skaršćenim terenima, ali su zato postojali posebni – specifični geološki uvjeti. Navešćemo samo neke od njih:

- Kao prvi primjer navodimo zapažanje Prof. M. T. Lukovića davne 1954. godine (prije izgradnje brane „Grančarevo i formiranja akumulacije „Bileća“): „U dolini Trebišnjice je nađeno da bi se mogla stvoriti jedna veća akumulacija u obimu velike dolomitske antiklinale Lastva, koju Trebišnjica popreko presijeca. Dolomiti su zdravi i nisu skaršćeni“. U ovom slučaju poseban geološki uvjet čine manje vodopropusni dolomiti i njihov prostorni položaj.
- Kao drugi primjer, navodimo više akumulacija formiranih u Nikšićkom polju, čije je krečnjačko dno zastrto dovoljno debelim zastorom vodonepropusnih glina, što je bio poseban i dovoljan uvjet za formiranje akumulacija: „Slap Zete“, „Glava Zete“ i „Krupac“.
- Kao treći primjer navodimo dolinu Cetine gdje je izgrađena brana Peruča: „Proučavanjem doline Cetine našlo se da bi se kod Peruča mogla stvoriti značajna akumulacija vode, jer je dolina na desnom boku zatvorena verfenom, dolomitom i lemeškim slojevima, a na drugom boku podzemno dreniranje je upravljeno ka dolini. Piezometarski nivoi u skaršćenom krednom krečnjaku se na bokovima dolina penju znatno iznad visine zamišljenog uspora od oko 80m visine“ (Luković, T. M., 1954.).

Svako područje u kršu se odlikuje specifičnim geološkim uvjetima koje istraživanjima treba utvrditi. *Hidrotehnički objekt treba biti izveden u skladu s prirodnim uvjetima, a posebno sa specifičnim geološkim uvjetima lokalnosti, tako da u budućnosti može da živi zajedničkim životom s prirodnom tj. geološkom sredinom ili da su izmjene prirodnih procesa u nužnom, minimalnom obimu.* Za potrebe smanjenja rizika izgradnje hidrotehničkih objekata u kršu neophodna je izrada detaljnih geoloških podloga (strukturnogeološke, inženjerskogeološke i hidrogeološke karte u krupnoj razmjeri) kombinacijom različitih metoda istraživanja: terenska metoda kartiranja, metoda daljinske detekcije, neotektonska analiza, geofizičke metode (geoelektrične, seizmičke), traserske metode određivanja pravca i toka podzemnih voda uz maksimalno korištenje podataka istražnog bušenja i terenskih opita u bušotinama i istražnih iskopa. Težiti potpunom smanjenju rizika u krškim terenima je nemoguće, moguće je samo rizik svesti na razumnu mjeru. To ilustrira primjer brane Keban u Turskoj.

*Za potpunu eliminaciju rizika izgradnje brana i formiranja akumulacija u kršu potrebno je enormno povećanje obima istražnih radova što stručno i ekonomski ne bi bilo opravdano.*

## 6. Zaključci

U proučavanju krša i njegovih utjecaja na građenje raznovrsnih objekata, a prije svega brana i formiranje akumulacija, u našoj hidrotehničkoj praksi, postignuti su značajni rezultati:

1. Na krš se više ne gleda kao na teren sa mnoštvom nepoznanica i nepredvidljivih teškoća od kojeg treba bježati i na kome se ne mogu graditi brane ni stvarati akumulacije. Naprotiv, krški tereni se mogu koristiti i za izgradnju takvih objekata. O tome svjedoči jedna od prvih, u svijetu, visoka (123m) olakšana lučna brana „Grančarevo“ sagrađena u Dinarskom holokarstu.
2. Dosadašnja istraživanja su, međutim, potvrdila da krški tereni imaju dosta specifičnosti koje se mogu i moraju dobro upoznati za pravilnu ocjenu uvjeta građenja, odnosno za izbor mjesta građenja, te vrste i veličine objekta. Ne sagledavanje samo nekog od tih činilaca može dovesti u pitanje ispravnost izvedenih zaključaka.
3. Analizom solidno sakupljenih činjenica došlo se do stava da se o krškim terenima smiju praviti zaključci, ali ne i generalna uopćavanja, posebice ako se to čini s malim brojem činilaca i malo primjera. Međutim, do sada postignuti rezultati daju pravo da se ukaže na



4. stečena iskustva i učine izvjesne ocjene, uvažavajući i rezultate ranijih istraživanja, a naročito prof. M. T. Lukovića.
  - Osnovna odlika suvremene karstifikacije kod nas je produbljavaње krške erozije, najčešće samo do dna erozione baze, a rjeđe i ispod nje, ali mjestimično i vrlo duboko.
  - U terenima gdje su postpliocenska i kvartarna pa i recentna izdizanja veća, uzduž bočnih prslina i međuslojnih diskontinuiteta, karstifikacija nije uzela većeg maha. Stoga ima više primjera gdje su samo zatvaranjem ili izoliranjem ponora postignuti zadovoljavajući rezultati u formiranju akumulacija u kršu (na primjer, Buško Blato u slivu rijeke Cetine). Ali, ima dosta primjera gdje je to učinjeno sa dosta napora (ponor Krupac u Nikšićkom polju).
  - U većini krških terena područja bivše Jugoslavije duboke krške šupljine (kanali, kaverne, pećine i dr.) nisu raširene na ogromna pa ni velika prostranstva i mahom imaju velike zapremine. U suštini to je karstifikacija tektonskih zona, s jače naglašene samo dvije dimenzije.
  - U kontinentalom dijelu Dinarskog krša kretanje koncentrisanih podzemnih voda vrši se više ili manje kroz nezavisne kanale, dok su ostale mase krečnjaka i pogotovu dolomitita, slabije vodopropustljive ili praktično vodonepropustljive.
  - Usporedbom stupnja skaršćenosti po dubini konstatirano je na više lokalnosti 2-3 puta veća skaršćenost masa po dubini minimalnog nivoa izvora, nego ispod tog nivoa (Nikšićko Polje i dr.).
5. Za zaptivanje brana i stvaranje akumulacija u krškim terenima, zbog složenosti krša mora se računati s pojavom dosta problema i teškoća, no većinom takvih koji se uspješno mogu savladati. Uostalom to potvrđuju i do sada postignuti rezultati, jer je od oko 80 visokih brana na području bivše Jugoslavije preko 50% sagrađeno u krškim terenima i to potpuno uspješno.
6. Pri izučavanju svojstava krških terena treba primjenjivati raznovrsne metode kombinirano, jer se samo na taj način može doći do zadovoljavajućih rezultata. Naime, u tu svrhu treba koristiti pored morfoloških, hidrogeoloških i geotehničkih metoda i geofizičke metode, a prije svega geoelektrično sondiranje i refrakcionu seizmiku, naročito u procjeni ukupne poroznosti i dubine skaršćenosti stjenskih masa.

*„Ako bismo pokušali istaknuti ono što predstavlja najkrupniji problem u istraživanju krša, i što je najznačajnije pri proučavanju krških terena u cilju stvaranja akumulacija i izgradnji hidrotehničkih objekata, to bi nesumnjivo bila hidrogeološka ispitivanja s utvrđivanjem vodopropustljivosti stijena i pravca i načina kretanja podzemnih voda. Podzemna cirkulacija vode je dakle bit krša. Jedino u uvjetima krša su moguća gubljenja vode na kubike u sekundi, i katastrofalni prodori vode u tunele i druge podzemne radove” (M. T. Luković, 1961).*

## 7. Literatura

1. Božović, A., Budanur, H., Nonveiller, E., Pavlin, B. (1981): The Keban dam foundation on karstified limestone – a case history, Symposium on Engineering geological problems of construction on soluble rock, Istanbul, Turkey, IAEG, N° 24.
2. Božović, A. (1983): Indukovana seizmičnost, Mehanika stijena, temeljenje i podzemni radovi, Društvo građevinskih inženjera i tehničara, knjiga 1, Zagreb.
3. Vlahović, V. (1961): Geološki uslovi izgradnje karsnih akumulacija u Crnoj Gori i način rešenja vodopropusnosti istih, Savetovanje „Konsolidacija tla u karstu”, Beograd.
4. Janjić, M. (1966): Cavernenim karst, Extrait des „Memoires de association internationale des hydrogeologues” (Congres geologique international), Tome VI, Reunion de Belgrade (1963), „Naučnaknjiga”, Beograd.
5. Янић, М. (1980): Inženerno-geološki problemi stroitel'stva plotin i vodohranilišč v karstovыh rajonah, Akademiya nauk SSSR, Inženernaya geologiya, (otdelnyy ottisk), Moskva.



6. Luković, M. T. (1954): Geološke podloge naših vodojaža, Prvi jugoslovenski geološki kongres, Bled.
7. Luković, M. T. (1960): Neka opažanja o kretanju podzemnih voda u karstu Jugoslavije – Vesnik Zavoda za geološka i geofizička istraživanja, knj. I, ser. B, Beograd.
8. Luković, M. T. (1961): Geološki problemi građenja u karstu, Savetovanje „Konsolidacija tla u karstu”, Beograd.
9. Martać, D. (1996): Saniranje prodora vode ispod injekcione zavese na brani „Višegrad” pri punoj akumulaciji, Međunarodni naučni skup „Pravci razvoja geotehnike 1880-1921-1996”, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
10. Milanović, P. (1996): Rizik izgradnje hidrotehničkih objekata i akumulacija u karstu, Međunarodni naučni skup „Pravci razvoja geotehnike 1880-1921-1996”, Rudarsko-geološki fakultet, Beograd.
11. Milanović, P. (1999): Geološko inženjerstvo u karstu – brane, akumulacije, vodozahvati, tuneli, zaštita voda, Energoprojekt, Beograd.
12. Sunarić, D. (2017): Inženjerska geodinamika - teorija i praksa, Institut za vodoprivredu „Jaroslav Černi” i Akademija inženjerskih nauka Srbije, Beograd.