ISSN 0350-0519
UDK 626/627

BROJ 315-316
GODINA 54
JANUAR-APRIL
2022/1-2

vodoprivreda

0350-0519, Vol. 54 (2022) No. 315-316, p. 1-80

SDOH

SRPSKO DRUŠTVO ZA ODVODNJAVANJE I NAVODNJAVANJE

SADRŽAJ

Miodrag JOVANOVIĆ: Analiza hidrauličkog režima brodskih prevodnica 1

Petar MILANOVIĆ, Nikolay MAKSIMOVICH, Olga MESHCHERIAKOVA: Problemi brana i akumulacija u evaporitima 13

Dušan TRNINIĆ, Tomislava BOŠNJAK: Analiza malih voda na slivu Save do Zagreba u periodu: 1926.-2020. 31

Babić BRANISLAV, Ognjen GOVEDARICA, Aleksandar ĐUKIĆ: Elementi bilansa vodovodnih sistema – metodologija i terminologija..... 43

Damjan IVETIĆ, Miloš MILAŠINOVIĆ, Milan STOJKOVIĆ, Aleksandar ŠOTIĆ: Okvir za dinamičko modeliranje rada akumulacija u nepovoljnim operativnim uslovima 49

Zorica SRĐEVIĆ, Bojan SRĐEVIĆ: DEMATEL i AHP u analizi međuzavisnosti i preference kriterijuma u problemima odlučivanja u vodoprivredi 69

In memoriam: 79

CONTENT

Miodrag JOVANOVIĆ: Analysis of the hydraulic regime of ship locks 1

Petar MILANOVIĆ, Nikolay MAKSIMOVICH, Olga MESHCHERIAKOVA: Questions with dams and reservoirs in evaporates 13

Dušan TRNINIĆ, Tomislava BOŠNJAK: The Sava river basin low waters analysis for the period: 1926 – 2020 31

Babić BRANISLAV, Ognjen GOVEDARICA, Aleksandar ĐUKIĆ: Elements of water balance in water supply systems – methodology and terminology 43

Damjan IVETIĆ, Miloš MILAŠINOVIĆ, Milan STOJKOVIĆ, Aleksandar ŠOTIĆ: Framework for the dynamic modeling of the reservoir operation in adverse operating conditions 49

Zorica SRĐEVIĆ, Bojan SRĐEVIĆ: Use of DEMATEL and AHP in analyzing causality and preferences of criteria in water management related decision-making 69

In memoriam 79

VODOPRIVREDA

GOD. 54

Godina 2022.
BR. 315-316
(2022/1-2)

626/627

ISSN 0350-0519
COBISS.SR-ID 132119

IZDAVAČ I SUIZDAVAČ:
SRPSKO DRUŠTVO ZA ODVODNJAVANJE I NAVODNJAVANJE
AKADEMIJA INŽENJERSKIH NAUKA SRBIJE

Ovaj broj su finansijski podržali: Ministarstvo prosvete, nauke i tehnološkog razvoja, Hidroelektrane na Trebišnjici, Energoprojekt - Hidroinženjering, Zavod za vodoprivredu iz Bijeljine, Univerzitet u Beogradu - Građevinski fakultet, Republička direkcija za vode, JVP Vode Vojvodine

Rezimei i tekstovi koji su objavljeni u našem časopisu mogu se čitati i pretraživati na sajtu Narodne biblioteke Srbije i na sajtu časopisa Vodoprivreda (adresa http://www.vodoprivreda.net)

REDAKCIJSKI KOLEGIJUM
(sa oblastima koje pokrivaju):
Đorđević dr Branislav - Integralni sistemi i Hidroenergetika, predsednik Redakcijskog kolegijuma
Batinić dr Božidar - Hidraulika
Bonacci dr Ognjen - Ekohidrologija, Vodoprivreda, Hrvatska
Dašić dr Tina - Vodoprivredni sistemi, Hidroenergetika
Hadžić dr Emina - Komunalna hidrotehnika, Bosna i Hercegovina
Hovanj dr Lajoš - Komunalni hidrotehnički sistemi
Jovanović dr Miodrag - Regulacija reka
Kryžanowski dr Andrej - Hidrotehnički objekti, Slovenija
Milanović dr Petar - Hidrogeologija
Milašinović dr Zoran - Hidraulika objekata
Paunović dr Momir - Fauna voda
Petkovski dr Ljupčo - Brane i hidrotehničke građevine
Plavšić dr Jasna - Hidrologija
Prodanović dr Dušan - Hidraulika
Popovska dr Cvetanka - Hidrologija, modeliranje, Makedonija
Potkonjak dr Svetlana - Ekonomika vodoprivrede
Rajaković dr Ljubinka - Kvalitet vode
Ristić dr Ratko – Erozija i bujice
Savić dr Dragan - Hidroinformatika, United Kingdom
Savić dr Ljubodrag - Hidrotehnički objekti
Sekulić dr Goran - Vodoprivreda, Crna Gora
Stanić dr Miloš - Hidromelioracioni sistemi, Hidroinformatika
Stričević dr Ružica – Melioracija zemljišta
Tošić dr Radislav – Erozija i zaštita slivova, BiH

IZDAVAČKI SAVET
Bajčetić dr Ratko
Božić dr Mile
Janjić Darko
Milenković dr Slobodan
Milić Nataša
Nikolić Aleksandar
Pantelić Petar
Pejić dr Borivoj
Puzović Goran
Stišović mr Bratislav
Sudar Nedeljko
Vujović Duško

Slika na naslovnoj strani korica:
Akumulacija Zavoj (foto Žarko Nestorović)

UDK: 532.532/627.823.46
Originalni naučni rad

PROBLEMI BRANA I AKUMULACIJA U EVAPORITIMA

Petar MILANOVIĆ[1], Nikolay MAKSIMOVICH[2], Olga MESHCHERIAKOVA[3]
[1]Beograd, Srbija, petar.mi@eunet.rs;
[2]Perm State University, Perm, Rusija, nmax@psu.ru
[3]Perm State University, Perm, Rusija, olgam@gmail.com

REZIME

Karstifikacija je proces koji preoblikuje stenske mase podložne rastvaranju formirajući specifične morfološke forme na površini i specifičnu poroznos unutar stenske mase. Karbonati i evaporiti su najčešće stene podložne karstifikaciji. Zbog svoje izuzetne rastvorljivosti evaporiti su izuzetno ranjive stene. Kada su izloženi dejstvu vode njihove geotehničke i hidrogeološke karakteristike se drastično pogoršavaju. Zbog toga ne pretstavljaju poželjnu stensku masu za izgradnju brana i akumulacija. Akumuliranjem vode se ostvaruje najznačajniji uslov za početak procesa rastvaranja odnosno početak degradiranja stenske mase. Praksa je pokazala da zbog prisustva evaporita u području pregradnog profila ili akumulacije treba očekivati probleme sa gubljenjem vode ispod i oko brane, slabljenjem geotehničkih karakteristika steni u fundametu brane, formiranjem kolapsa u akumulaciji i na površini terena kao i degradiranje kvaliteta vode. Postoji veliki broj primera brana u evaporitima čiji opstanak je iziskivao dugotrajnu i skupu rehabilitaciju sa neizvesnim rezultatom, pa i neželjenim krajem. U mnogim slučajevima postojeće tehnologije, pre svega postupak injektiranja sa standardno korišćenim injekcionim masama, nisu dale očekivane rezultate. Ali postoje i primeri razvoja novih pristupa i tehnologija čija primena uliva nadu u mogućnost uspešnog delovanja u evaporitima ukoliko geološke karakteristike to dozvoljavaju. Zbog toga od izbora lokacije za izgradnju brane i akumuliranje vode u evaporitima zavisi njihov opstanaka. U svakom slučaju i najuspešnija rešenja zahtevaju specifičan pristup u njihovom održavanju tokom eksploatacije.

Ključne reči: Karst, evaporiti, brana, akumulacija, procurivanje

UVOD

Karst evaporita je rasprostranjen širom planete s tim što je dosta zastupljeniji na severnoj hemisveri u zavisnosti od rasprostranjenja ovih stenskih masa. Karstni proces u evaporitima se razvija u svim klimatskim uslovima od hladnog Arktika do aridnih i vlažnih tropskih predela, od najnižih pustinjskih predela pa do najviših planina. Najveći deo ovih stenskih masa je tokom geološkog vremena prekriven karbonatnim ili klastičnim formacijama (Ford i Williams, 2007). Takođe veliki njihov deo je uklonjen sa površine procesom rastvaranja tako da je samo manji njegov deo ostao na površini. Ove stene grade oko 25% kontinentalnih prostora a samo prisustvo gipsa je registrovano na području 35 država i regiona (Klimchouk i sar, 1996), dok Cooper i Calow (1998) nabrajaju 80 država kao proizvođače gipsa. Najveća područja sulfatnih stena su registrovana u Rusiji, Kini, SAD, Kanadi Iranu, Španiji i Britaniji. Prema proceni Gorbunove (1977) oko 5 miliona km^2 teritorije bivšeg SSSR grade sulfatne stene. U SAD depoziti gipsa su registrovani u 32 države i prekrivaju oko 35% -40% površina (Johnson, K.S. 2004).Prema Lu & Cooper (1996) najveće površine pod gipsom su u Kini čija starost se proteže od prekambrije do kvartara i uključuje marinski, lakustriski, termalni, metamorfni i sekundarni nastanak. Gips prekriva 5% teritorije Irana (Raeisi i sar, 2013) i 21% teritorije Španije (Mancebo Piqueres i sar, 2013).Haloidne stene, pre svega halit (so), na području bivšeg SSSR-a prekrivaju više od 2,3 miliona km^2 (Korotkievich, 1970).

Na mnogim branama i akumulacijama u svetu koje su izgrađene u terenima koji sadrže evaporite su registrovani ozbiljni problemi tokom izgradnje, prvog punjenja ili docnije tokom njihovog korišćenja. Brojne su brane u SAD, Španiji, Kini, Rusiji, Alžiru, Iranu, Iraku, Venecueli, Argentini, Nemačkoj, Gvatemali, Tadžikistanu, Gruziji i još nekim državama koje su

imale ozbiljne probleme a neke od njih su teško oštećene pa i srušene. U mnogim slučajevima problemi sa stabilnošću objekata ili velikim gubicima nisu mogli biti sprečeni ni po cenu dugotrajnih i skupih sanacionih radova. Punjenje akumulacija je uvek imalo za posledicu intenziviranje procesa rastvaranja, odnosno karstifikacije, zbog veštačkog povećanja hidrauličkog pritiska, što je prouzrokovalo razvoj karstnih kanala i kaverni, ispod i oko temelja brana, i mnoge neželjene posledice pa i kompromitovanje projekta.Zbog toga su neka pregradna mesta napuštana i pre početka izgradnje.

Dosadašnja iskustva su pokazala da svaka brana i/ili akumulacija koja je izgrađena u geološkim formacijama koje sadrže evaporite može da očekuje jedan od četiri najčešća problema: velike gubitke, ugroženu stabilnost brane ili bokova akumulacije, formiranje kolapsa u području brane i oko akumulacionog prostora i ugroženi kvalitet vode u akumulaciji i nizvodno od nje.

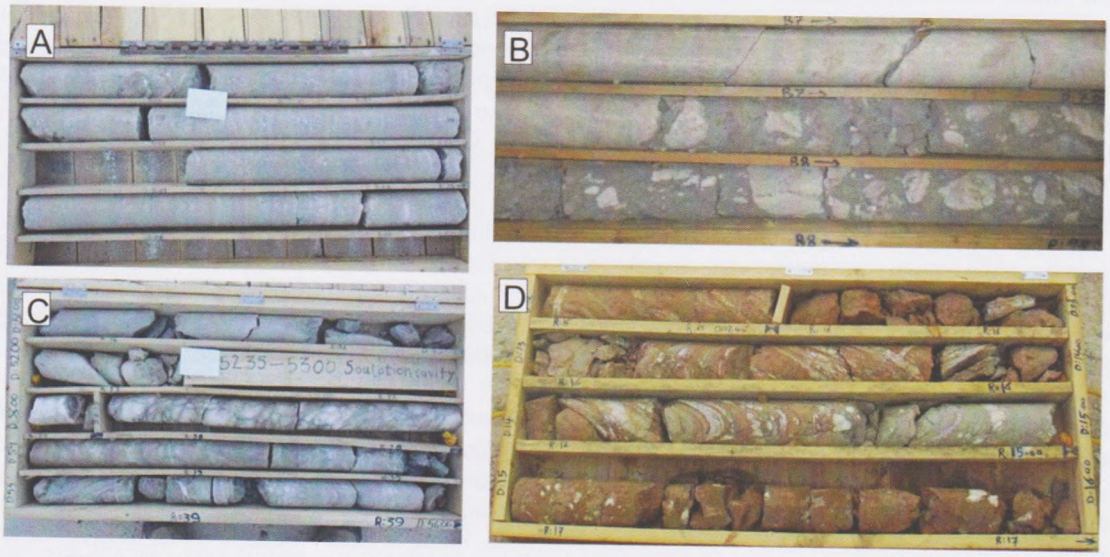
U svetu je registrovano više od 85 brana koje su izgrađene u stenskim masama koji sadrže evaporite. Veliki broj njih je izložen jednom od nabrojanih destruktivnih procesa od relativno prihvatljivih gubitaka pa do velikih oštećenja ili rušenja. U velikom broju slučajeva degradacija stenske mase procesom rastvaranja traje godinama.

U pojedinim slučajevima, nakon detaljnih istraživanja ili tokom početnih radova, zbog prisustva eveporita odustalo se od predloženih lokacija: pregradni profili Mangum (USA); Saint Bom i Rian (Francuska); i Alter Stolberg (Južni Harz, Centralna Nemačka), ili je pregradni profil pomeren uzvodno duž istog toka kao što je to slučaj sa branom Cedar Ridge (SAD).

KARAKTERISTIKE EVAPORITA

Najčešće stenske mase evaporita koje su registrovane na lokacijama brana i akumulacija sadrže kalcijum sufatne minerale pre svega gips i anhidrit ali ima slučajeva gde je to halit (kamena so). U pojedinim slučajevima i ređi sulfatni minerali mogu da budu značajnije zastupljeni (tenardit, glauberit, mirabilit, epsomit) a takođe i hloridi silvit i karnalit.

Gips je kalcijum-sulfat sa vodom, $CaSO_4x2H_2O$.Nastaje najčešće evaporacijom obaranjem iz prezasićenog jonskog rastvora; hidrotermalno; u pustinjskim oblastima takođe evaporacijom (pustinjske ruže); kristalizacijom iz hladnih vodenih rastvora u sonim ležištima a može da nastane iz anhidrita primanjem vode. Gips može da budeveoma rastvorljiv u vodi i loš je provodnik toplote. U području brana i akumulacija gips jeregistrovan u oblikumasivnih formacija (Slika 1, A) ali i u formi komada različite veličine u glinovito peskovitim i laporivitim naslagama (Slika 1, B), ili pak u formi dobro cementirane breče (Slika 1,C). Često je registrovan u različitim sedimentima u formi proslojaka različite debljine (Slika 1, D). Ukoliko je prisutanneki od ovakvih oblika na na profilu brane ili u području akumulacijeproblemi sa vododrživošću,a često isa stabilnošću objekata,se znatno komplikuju.



Slika 1. Najčešći oblici pojavljivanja gipsa u području pregradnih profila (foto. P. Milanović)

Česte su i pojave gipsa u obliku tankih kontinuiranih laminacija u raznim sedimentnim (Slika 2).

Slika 2. Laminacije gipsa u području pregradnog profila brane Nargesi u Iranu (foto W. Riemer)

Anhidrit je takođe sulfat kalcijuma, CaSO4. Stvara se u sonim ležištima kao mineral evaporita. Javlja se u zrnastom kompaktnim masama ili u kristalima. Primanjem vode anhidrit prelazi u gips.

Gips i anhidrit su podložni rastvaranju. Intenzitet rastvaranja zavisi od više karakteristika stene i rastvarača: od litoloških karakteristika stena, temperature rastvarača, brzine rastvarača i hemijskih karakteristika rastvarača. Prema Lu & Zhang (2006) intenzitet rastvaranja može da varira u ekstremnom rasponu od 0,09 – 3.000 milimetara godišnje. U vodi koja sadrži NaCl rastvorljivost raste (Ford i Wiliams, 2007). Proces rastvaranja anhidrita je, generalno, 20 puta sporiji, ali i tu ima značajnijih odstupanja.

Kamena so (halit) je monomineralna stena natrijum hlorid (NaCl). Nastaje isparavanjem morske vode koja sadrži natrijum hlorid. Apsolutno čista so je retka u prirodi. So je nestišljiva, mehanički slaba i plastična. Javlja se u formi pojedinačnih ili višestrukih međuslojnih tankih laminacija, kao slojevi različite debljine ili kao kompaktna masa. Debljina formacija kamene soli varira od tankih laminacija do masa debljine više od kilometra. Često se javlja u formi plastičnih dijapirskih tela koja mogu da razore formacije istaložene preko njih. Kamena so je 1000 puta rastvorljivija od krečnjaka i 180 puta rastvorljivija od gipsa (Ford i Williams, 2007). U običnoj meteorskoj vodi, na temperature 25°C, rastvorljivost soli je 360 *g/l*.

PROCES KARSTIFIKACIJE U EVAPORITIMA

Intenzitet procesa karstifikacije u evaporitima zavisi pre svega od intenziteta rastvaranja. Formiranje novih karstnih kanala je daleko češće nego u karbonatima. Početni oblici procesa karstifikacije prikazani su na Slici 3.

Slika 3.Inicijalna karstifikacija u masivnom i tektonski dezintegrisanom gipsu

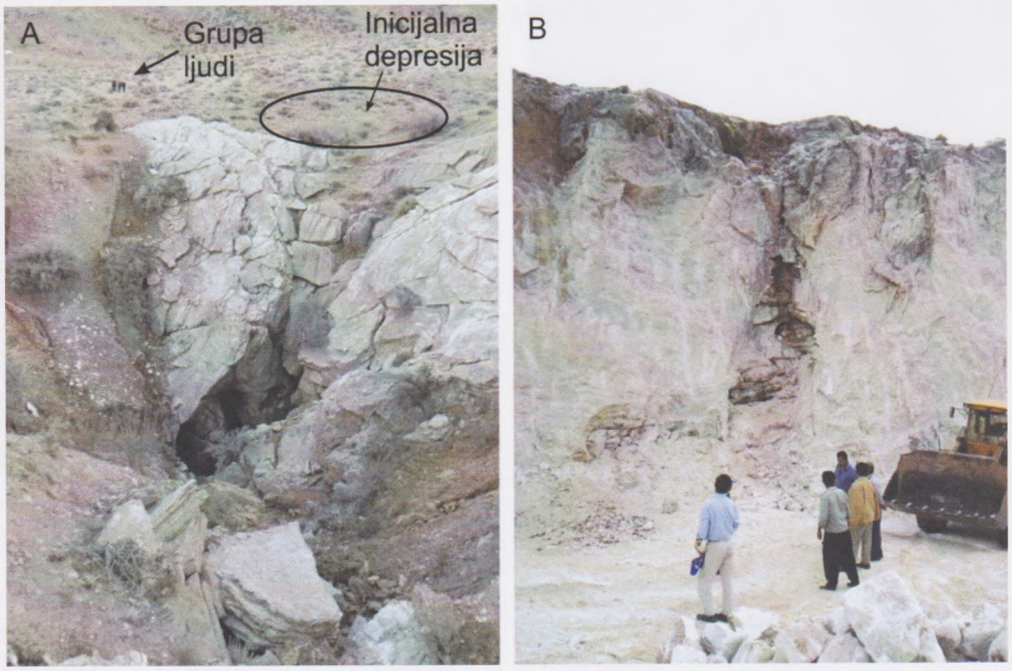
Inicijalna karstifikacija češće zahvata kompaktne mase gipsa nego delove koji su tektonski dezintegrisani. Razlog treba tražiti u vezivu koje povezuje matriks nastao tektonikom i kojiosim „pretaloženog“ gipsa sadrži i slabije rastvorljive ili nerastvorljive komponente.

Inicijalni proces počinje polako duž pukotina, anajčešće na presecima više pukotina. Tu se formiraju depresije u kojima se zadržava voda tj. formiraju se vrtače gde dolazi do koncentracije rastvarača,vode(Slika.4).

Na slici 4 su prikazana dva primera razvoja karstnog procesa u različitim evaporitima. Na fotografiji slika 4 – A, na prirodnom profilu, prikazan je proces karstifikacije u gipsu. Depresija na površini terena omogućila je dotok i zadržavanje voda koja je duž pukotina započela inicijalni proces rastvaranja da bi sa proširenjem pukotina tečenje postalo turbulentno. Uz proces rastvaranja aktivira se i proces erozije i formiranje kavernoznog prostora neposredno ispod površine. Proces rastvaranja pomaže da se formiraju nestabilni blokovi odvoje od osnovne stene što je ubrzano istovremenim delovanjem korozije i erozije. Stenska masa iznad kaverne gubi oslonac i počinje „klizanje“ duž površine oblika levka (vrtača/kolaps).

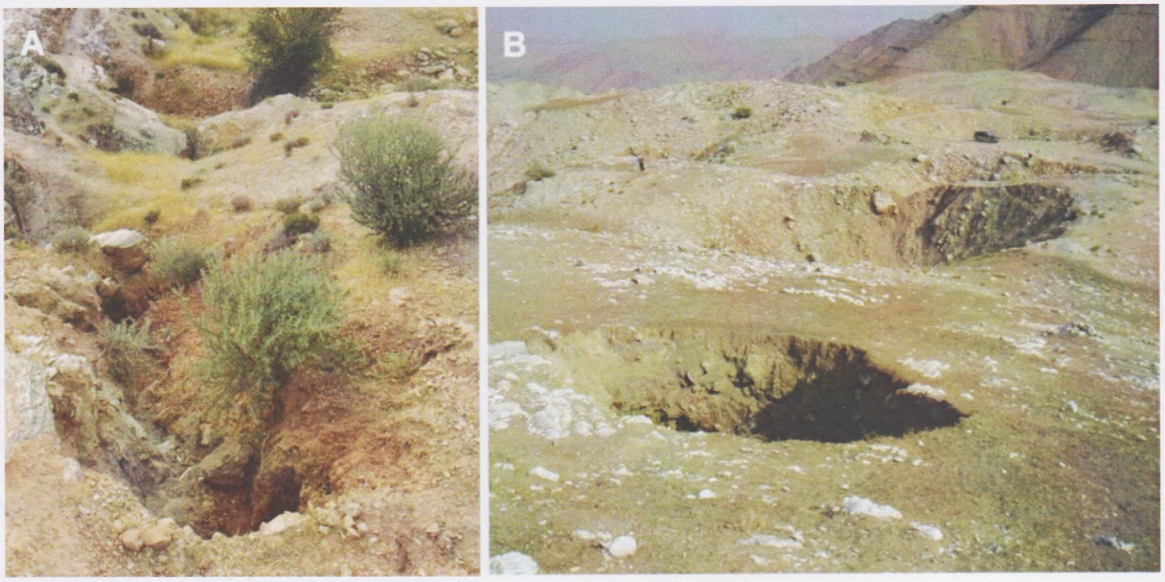
Na slici 4- B, na profilu koji je otvoren eksploatacijom u rudniku soli procesom karstifikacije (rastvaranja) formirana je na površini vrtača odnosno područje

koncentracije rastvarača. Istovremeno sa karstifikacijom na površini razvija se mreža karstnih kanala i povećava njihova propusna moć. Kod soli proces rastvaranja i formiranja karstnih kanala je daleko značajniji nego proces erozije.



Slika 4. Iran. Proces karstifikacije, A – u gipsu i B - u soli (foto P. Milanović)

Zbog malog nadsloja iznad kaverni koje se formiraju ispod površine, istovremenim delovanjem rastvaranja i erozije,dolazi do njegovog prolamanja što ima za posledicu formiranje kolapsa različitih dimenzija (Slika 5). U pojedinim slučajevima debljina nadsloja nije dovoljna da izdrži težinu čoveka.



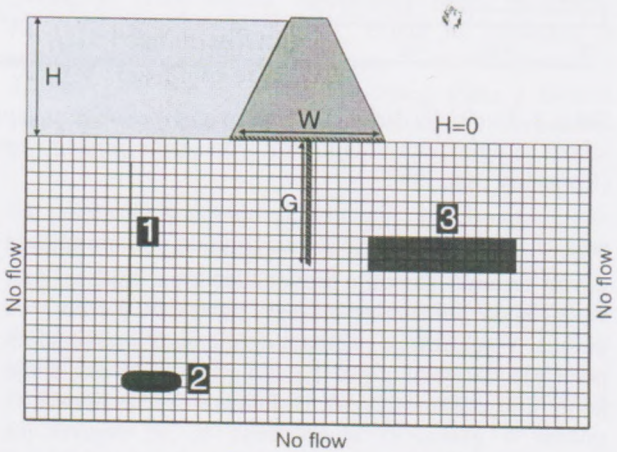
Slika 5. Kolapsi u gipsu u području (A)brane Nargesii (B)akumulacije Gotvand, obe u Iranu (foto P. Milanović)

Slika 6. Karstne kaverne u gipsu. A – Otvorena kaverna u području akumulacije Nargesi, i B – tektonski degradiran gips sa jasnim indikacijama o postojanju karstnih kanala neposredno ispod površine terena (foto P. Milanović)

Na slici 6, A- prikazane su kaverne otvorene na površini, nastale uglavnom rastvaranjem ina slici 6, B – indikacije o prisustvu karstnog sistema u području akumulacije i plitko ispod površine koje se teško uočavaju tokom geološkog kartiranja.

MODEL RAZVOJA KARSTNOG PROCESA ISPOD BRANE

Jedno od prvih pitanja kada se radi o branama u karstu je prognoza dugotrajnog uticaja pritiska vodene mase na razvoj karstnog procesa ispod brane i injekcione zavese. Načinjen je pokušaj se prognozira vremena koje je potrebno da se karstni proces razvije do ispod donje konture injekcione zavese i time omogući gubljenje vode. Postoji vrlo malo informacija baziranih na egzaktnim merenjima koja mogu da posluže za tu analizu. Sigurno je da kad su u pitanju karbonati, pre svega krečnjak, to je dugotrajan proces, verovatno više decenijski, ali se znatno brže odvija u evaporitima. Pokušaj da se modelira ovaj proces načinili su Drybrodt i sar. (2001), Dreybrodt i Gabrovšek (2002) i Romanov i sar. (2003). Razvijen je dvo-dimenzionalni matematički model za ispucale rastvorljive stene (krečnjak i gips) na kojima je fundirana brana. Ovde je prikazan deo koji se odnosi na proces karstifikacije u gipsu pod velikim hidrauličkim pritiskom. Model čini idealizovano pregradno mesto sa uskom dolinom ispod koje su stene podložne karstifikaciji, u ovom slučaju gips (Slika 7). Modelirano područje je dvo-dimezonalni presek širine 1 m upravan na pravac brane. Po vertikali on zahvata 375 m a po horizontali 750 m. Brana je locirana u centru. Područje je podeljeno pukotinama na blokove 7,5 x 7,5 x 1 m. Širina pukotina je 0,02 cm (Slika 7).



Slika 7. Područje modela pregradnog profila.
1. Otvorena pukotina u krečnjaku; 2. Karstni kanal; 3. Područje veoma rastvorljivih stena (gips); H – nivo akumulacije; W - nepropusnitemelji brane; i G – injekciona zavesa (Romanov i sar. 2003)

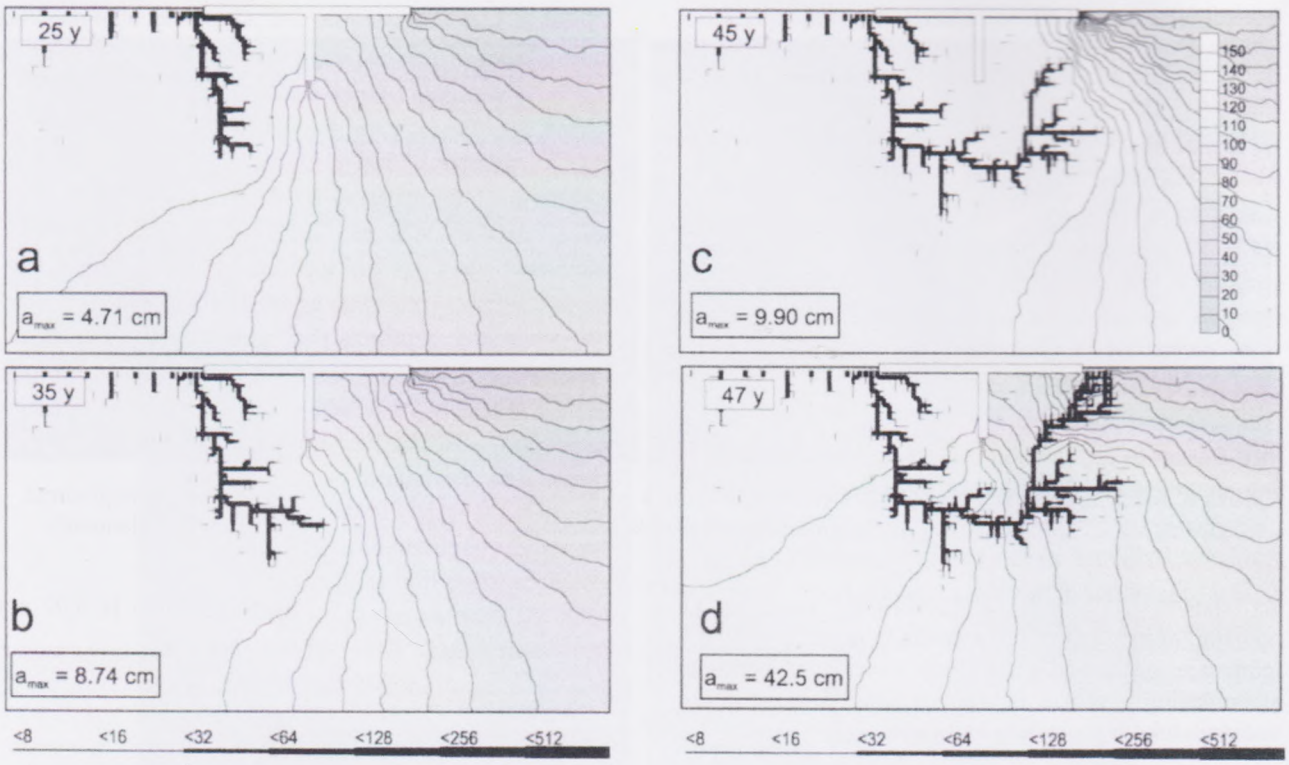
Analizirana su dva scenarija:

(A) H = 159 m; W = 262 m, G = 97 m i

(B) H = 150 m; W = 82 m m, G = 187 m.

gde je H-visina brane; W-širina nepropusne površine fundiranja; i G-dubina injekcione zavese.

Vizualizacija rezultata modela je prikazana na slici 8.



Slika 8. Evolucija širine i napredovanja pukotina u gipsu. Zbog velike brzine rastvaranja gipsa podzemni tok prema izlazu se uglavnom odvija kroz jednu koncentrisanu zonu. Širina pukotina od 0,02 cm je data bar kodom ispod slike (Romanov i sar. 2003)

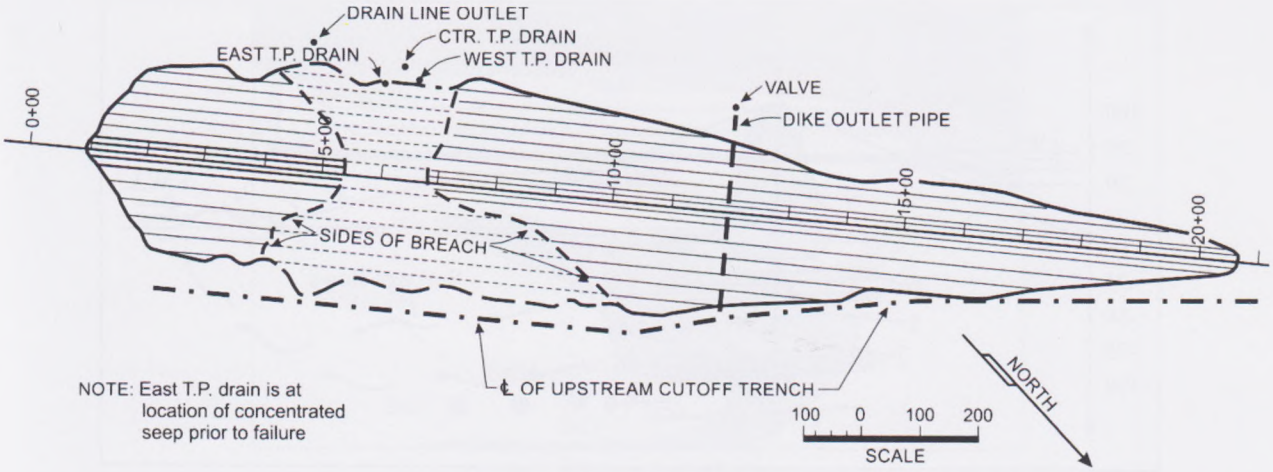
Prema ovim analizama, u krečnjaku je, za formiranje novog sistema karstnih provodnika kroz koje se gubi voda ispod injekcione zavese potrebno 90 do 100 godina. Vizuelizacija rezultata dobijenih ovim modelom pokazuje da će u gipsu karstni proces dostići donju konturu injekcione zavese na dubini 97 metara posle 35 godina a gubici iz akumulacije bi se pojavili na nizvodnim izvorima posle 45 do 47 godina.

ODABRANI PRIMERI PROBLEMA BRANA I AKUMULACIJA U EVAPORITIMA

Kratak prikaz nekoliko primera koji slede ilustruju geološku kompleksnost evaporita kao sredine za izgradnju velikih objekata a pre svega brana i akumulacija. Primeri upozoravaju da se pri izboru sredine koja sadrži rastvorljive stene treba očekivati suočavanje sa geološkom sredinom koja u kontaktu sa vodom, zbog velike rastvorljivosti, gubi bitne hidrogeološke i fizičko-mehaničke karakteristika koje su neophodne za stabilnost brane i vododrživost akumulacije.

Rušenje brane **St. Francis** u Kaliforniji smatra se najvećom katastrofom američkog graditeljstva u dvadesetom veku sa najmanje 432 žrtve. Brana je izgrađena 1924 – 1926. Fundirana je u području starog klizišta u škriljcima sa interkalacijama gipsa. Brana je izgrađana bez i jednog podatka o geološkim karakteristikama terena (Rogers 2007 i Rogers i Hasselmann 2013).

Brana **Quail Creek** (Utah, SAD) je fundirana u stenskoj masi koju grade dolomiti, alevroliti sa sadržajem gipsa, gips i peščari. Brana je izgrađena 1985 i odmah su registrovani gubici. Oni su postepeno povećavani da bi u 2002. dostigli 340 *l/s*. I pored intenzivnog injektiranja da bi se sprečili gubici deo brane je kolapsirao 1989. (Slika 9). Širina kolapsa je oko 100 m. Poplavni talas koji je nastao kolapsiranjem dela brane napravio je veliko štetu ali nije bilo ljudskih žrtava (Payton i Hansen, 2003).



Slika 9. Brana Quale Creek, plan. Područje kolapsa brane koji se dogodio 01. januara 1989. (James i sar. 1989)

Lučna betonska brana **Anchor** u Vajomingu (SAD) je 66 m visoka a fundirana je u peščarima i karstifikovanim karbonatnim formacijama. Dno akumulacionog prostora čine dolomiti i crvene laporovite stene sa gipsom. Više od 50 kolapsa je registrovano u akumulacionom prostoru pre izgradnje brane. Godinu dana nakon punjenja u akumulaciji, oko 350 m uzvodno od brane, formiran je kolaps prečnika 200 i dubine 20 m. Akumulacija nikad nije napunjena osim male bare na njenom dnu. Nekoliko desetina novih kolapsa se dogodi svake godine. Prema Jarvisu (2003) ovo je „udžbenički primer gde ne treba graditi brane".

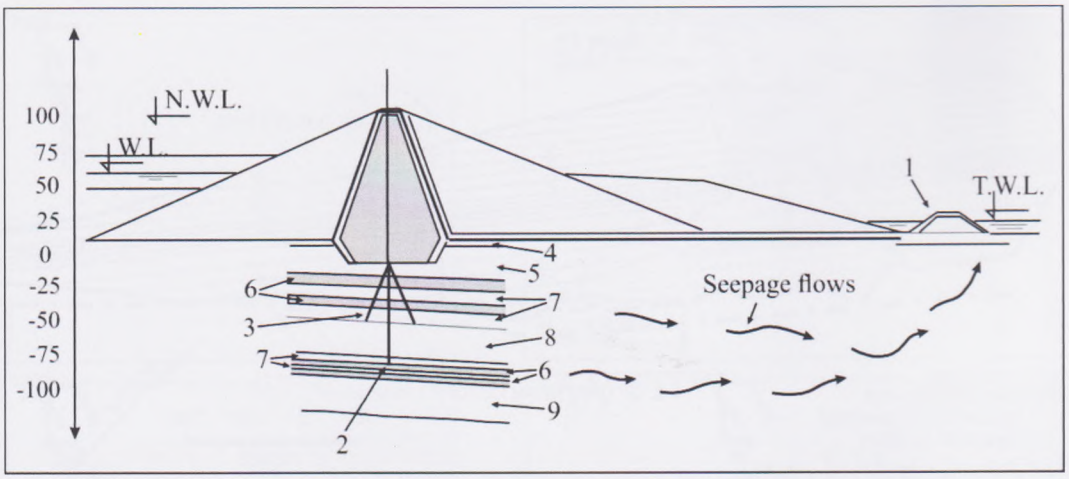
Nasuta brana **McMilan** na reci Pecos u Novom Meksiku (SAD) visine 18 m fundirana je na dolomitima, gipsu i anhidritu sa crvenim alevrolitom i glinom. Tokom izgradnje nisu registrovane kaverne. Nakon 12 godina rada dogodio se kolaps u levom boku i akumulacija je ostala bez vode. U zavisnosti od nivoa akumulacije registrovani su gubici od 0,28 m^3/s, za nivo 5 m, a za nivo 8,3 metara gubici su bili do 2,8 m^3/s. Na osnovu analize (James i Lupton, 1978) u periodu od 1893. do 1942. rastvaranjem gipsa formirano je oko 50 miliona m^3 karstnih kanala i kaverni.

Jedan od najpoznatijih i još uvek aktuelnih problema je slučaj brane **Mosul** u Iraku. Mosul je nasuta brana visine 113 m, dužine 3,65 km sa akumulacijom zapremine 11,11 milijardi m^3. Proces rastvaranja i gubici su registrovani u toku i posle prvog punjenja akumulacije. Najznačajniji podaci su publikovani u radovima Anagnosti (1987), Guzina i sar. (1991) i u seriji povezanih članaka pod zajedničkim nazivom „Misterija brane Mosul, najopasnije brane na svetu" autora Adamo i sar. (2015). Brana je fundirana u stenskoj masi koja se sastoji od naizmenično deponovanog gipsa, slojeva brečastog gipsa i slojeva anhidrita u smenjivanju sa laporcima i kavernoznim krečnjakom (Slika 10).

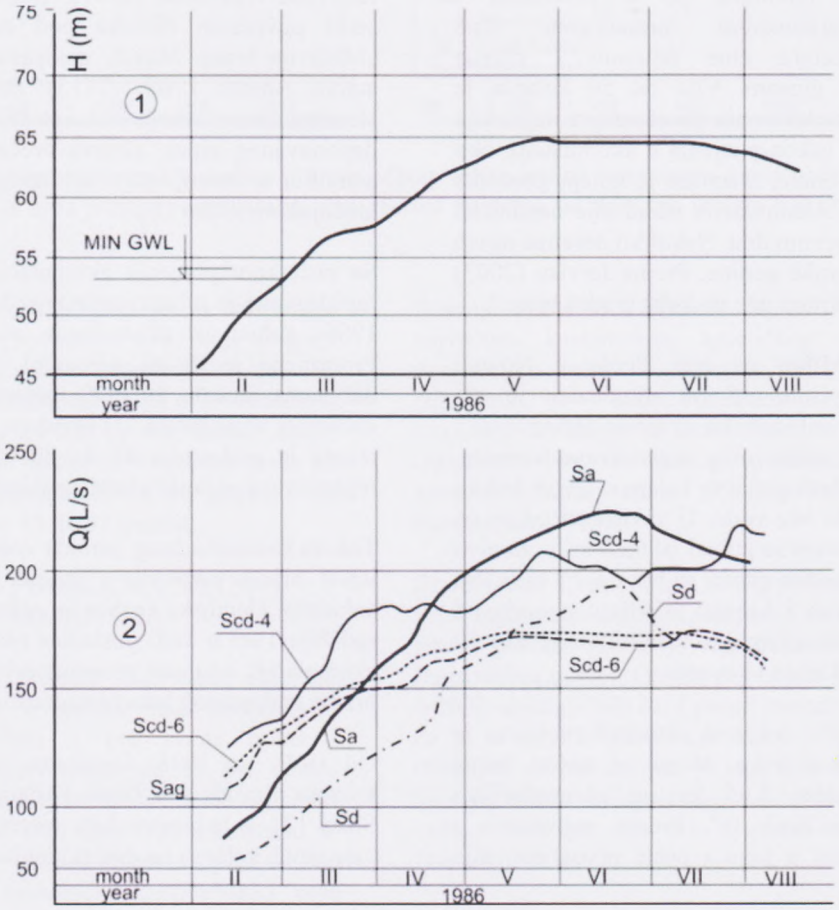
Sa početkom punjenja akumulacije u februaru 1986. registrovano je procurivanje kroz temelje brane. U junu 1986. gubici iz akumulacije su dostigli 1400 *l/s*. Procenjeno je da su verovatni putevi ove vode na dubinama između 60 i 70 metara. Merenjem TDS u uzorcima vode (Slika 11) utvrđeno je da voda rastvori i iznese iz podzemlja 42 do 80 tona gipsa dnevno, a registrovana je pojava kolapsa (Guzina i sar, 1991).

Tokom šestomesečnog perioda voda je, iz stenske mase ispod brane, rastvorila i iznela 13.000 tona gipsa i anhidrita. Hemijske analize su pokazale da je povećanje sadržaja TDS u vodi posledica oscilacija nivoa vode u akumulaciji, odnosno promene pritiska od koga zavisi i brzina podzemnog toka (Anagnosti, 1987).

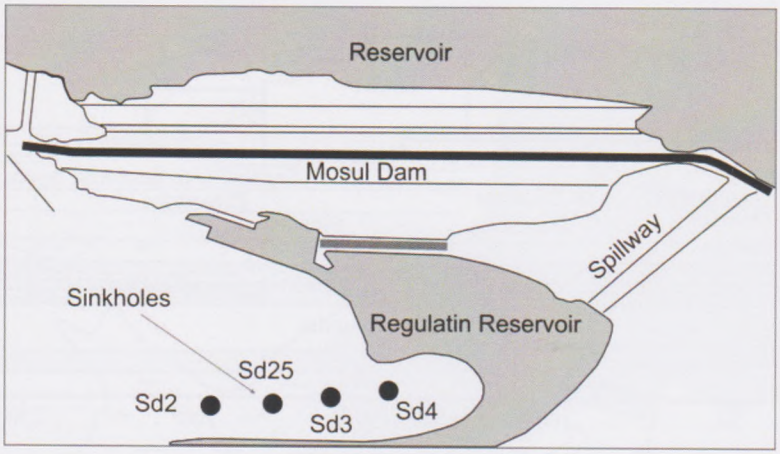
Od 1992. do 1998. formirana su četiri nova velika kolapsa nizvodno od brane (Adamo i Al-Ansari, 2016, Slika 12), a batimetrijskim merenjima detektovano je više novih kolapsa na dnu akumulacije.



Slika 10. Brana Mosul, Irak. Uprošćeni profil upravan na osu brane
1. Predbrana; 2. Duboka injekciona zavesa; 3. Pijezometar; 4. Rečni aluvium; 5. Laporovita breča; 6. Gips/breča gipsa; 7. Laporac/laporovita breča; 8. Kavernozni krečnjak; 9. Krečnjak (Guzina i sar. 1991)



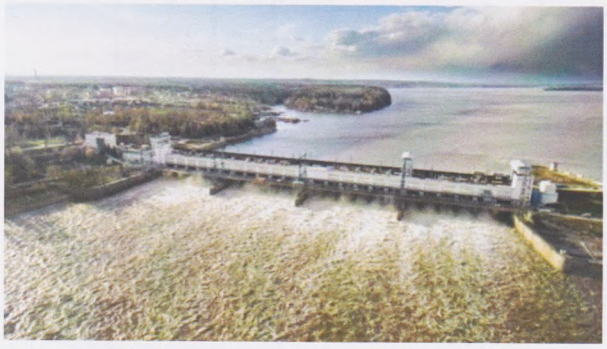
Slika 11. Brana Mosul, Irak. 1. Nivo akumulacije; 2. Izdašnost izvora sa provirnom vodom (Guzina i sar. 1991)



Slika 12. Brana Mosul, Irak. Kolapsi nizvodno od brane (Adamo i Al-Ansari, 1916)

U periodu 1986 – 2015 utrošeno je 95.657,43 tone različitih injekcionih masa (Adamo i sar, 2015). Prema ovim autorima „masovno" injektiranje nije zaustavilo proces rastvaranja gipsa i anhidrita. To izaziva veliku zabrinutost jer bi rušenje brane ugrozilo Bagdad (638 km nizvodno) i veoma naseljeno područje između.

Brana **Kama** na reci Kami (Rusija) je betonska gravitaciona struktura 25 m visoka i 2,5 km dugačka (Slika 13).

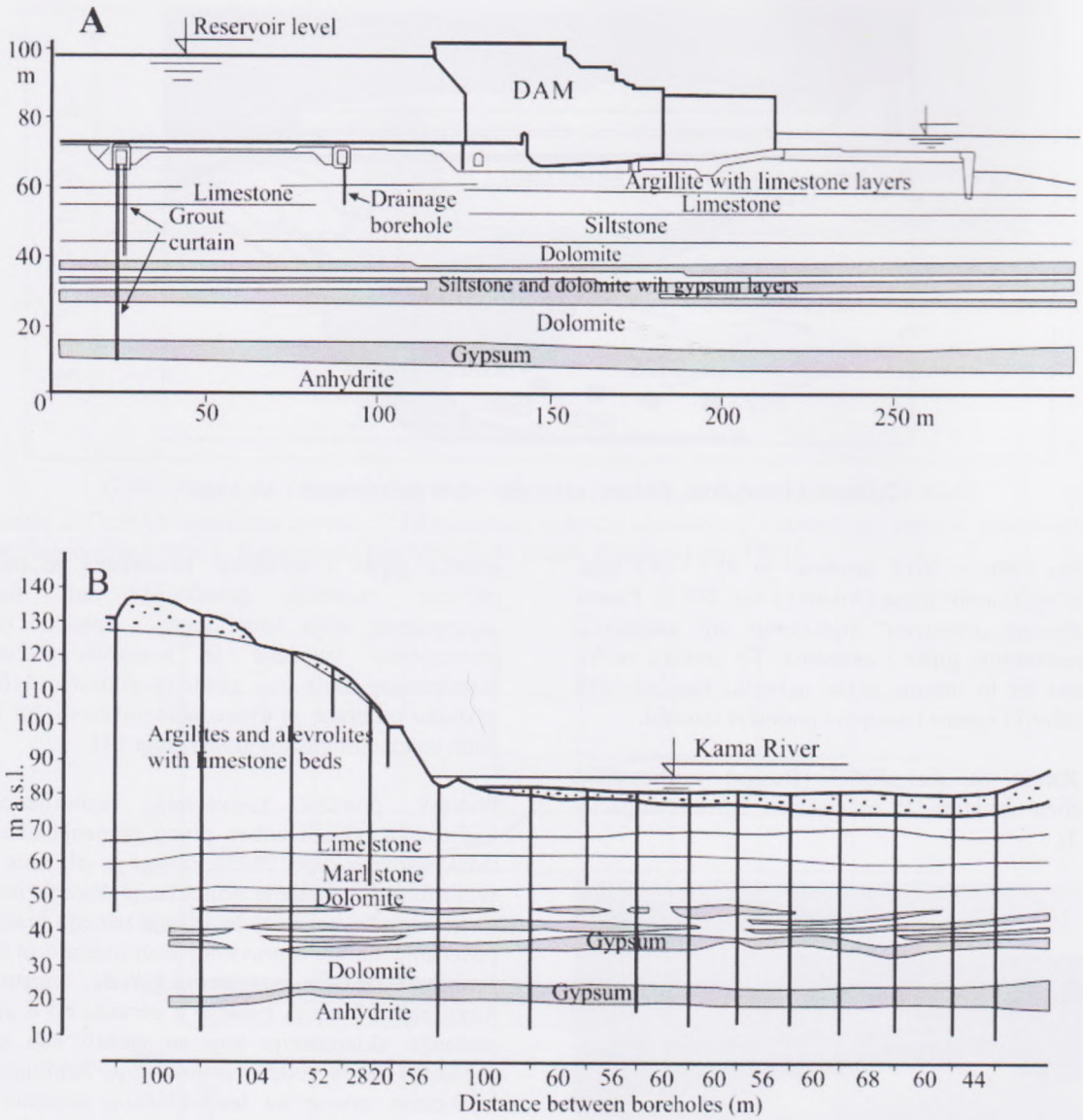


Slika 13. Brana Kama, Permski region, Rusija (Foto E. Tyurin)

Fundirana je na geološkoj formaciji koju čine sekvence: argilita, peščara, gipsa, dolomita i anhidrita (Gorbunova i sar. 1991; Lykoshin i sar. 1992 i Maksimovich N.G. 1983 – 2009). U fazi projektovanja razmatrane su različite tehnologije za ostvarenje željene vodotrživosti: stalno zamrznuta zavesa, 10 metara široka do donje granice gipsa i anhidrita; istraživana je mogućnost primene različitih hemikalija radi formiranja nepropusnog sloja iznad gipsa i konačno (što je i primenjeno) izvedena je konstrukcija uzvodnog nepropusnog sloja koji prekriva područje 110 metara uzvodno od brane sa dvorednom zavesom duž uzvodne ivice vodonepropusnog sloja (Slika 14).

Početak procesa rastvaranja (karstifikacije) je registrovan odmah nakon prvog punjenja akumulacije (Maksimovich 2006, 2009). Zavesa je vrlo brzo izgubila svoju funkciju. Kada je akumulacija dostigla nivo od 22 metra registrovani su gubici ispod temelja brane. Naglo povećanje sulfata u provirnoj vodi ukazalo je na veliko povećanje procesa rastvaranja.Takođe, registrovano je formiranje 11 novih kolapsa u periodu od 6 godina na području akumulacije koji su nastali kao posledica oscilacija nivoa vode u akumulaciji. Zaključeno je da injekcione zavese na bazi običnog cementa nemaju efekta u stenskoj masi koja sadrži evaporite.

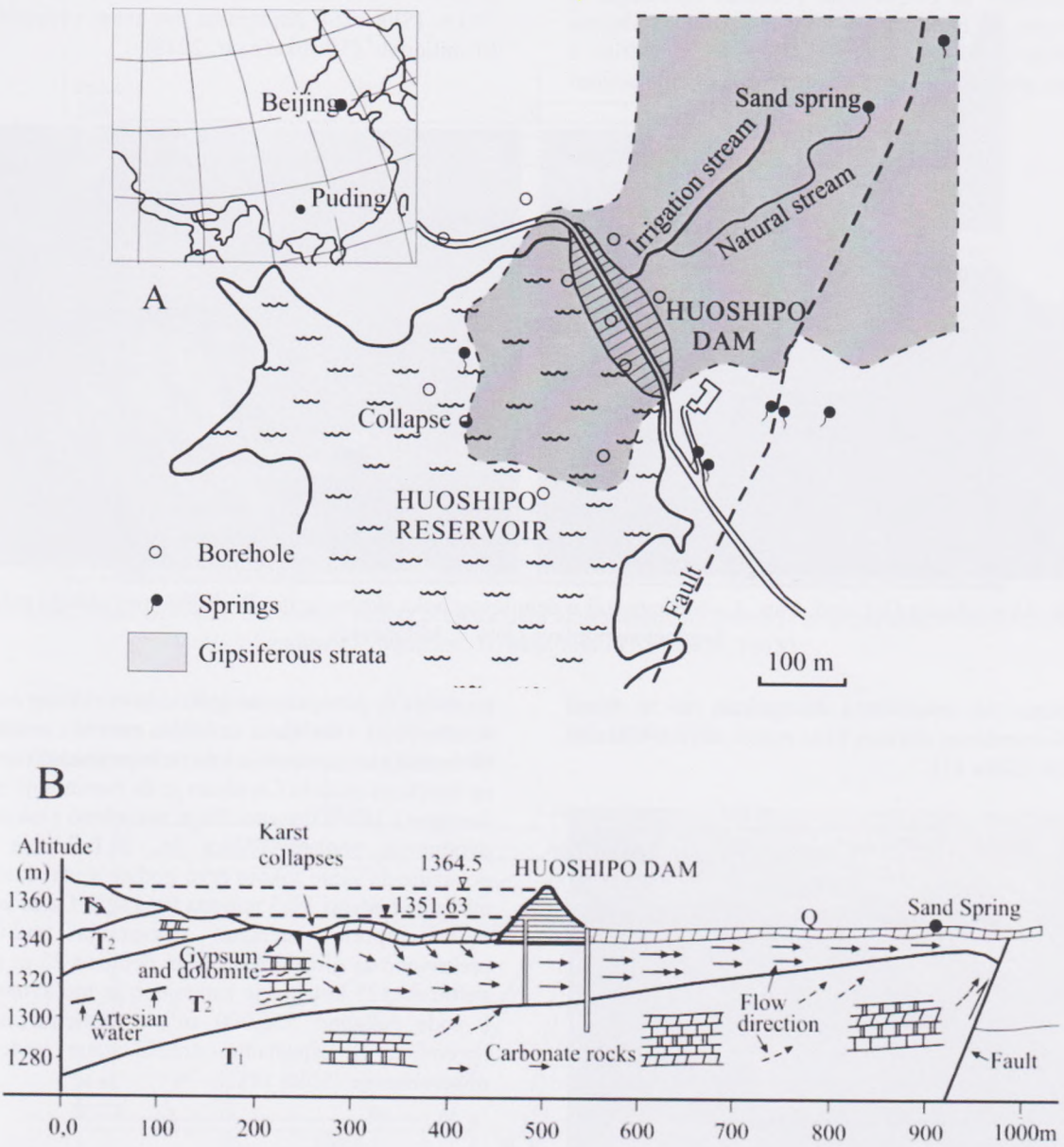
Radi poboljšanja karakteristika injekcione zavese za primenu u stenama sa sadržajem gipsa ispod brane Kama razvijena je hemijska injekciona masa sa karakteristikama gela i penetracionim mogućnostima sličnim vodi. Ova injekciona masa (oxaloaluminosilicate) se sastoji od dve komponente: natrijum silikata čvrstine 1,19 g/cm^3 i učvršćivača (Maksimovich 2006). Nakon primene ove hemijske injekcione mase prilikom dodatnih injekcionih radova u području brane Kama gubici su znatno smanjeni.



Slika 14. Brana Kama. A. Profil upravan na osu brane; b. profil duž ose brane (Maksimovich, 2006)

Akumulacija **Bratsk** na reci Angari (Rusija) formirana je izgradnjom betonske gravitacione brane visine 124.5 m i dužine 4.417 m. Deo akumulacije se nalazi u kambrijskim dolimitima, krečnjacima, anhidritu i gipsu). U prirodnim uslovima registrovane su brojne karstne pojave uključujući vrtače i do 60 m u prečniku i 25 m dubine, kao i brojne pećine i jame (Koziryeva i Trzhtinski 2004). Tokom prvog punjenja akumulacije (1963 - 1966) registrovan je oko 200 novih kolapsa po km^2 sa dijametrom između 2 – 30 m i dubine 5 -28 m.Nastanak ovih kolapsa se tumači reaktiviranjem paleokarstnih formi zbog oscilacija akumulacije. Neke od novih jama, koje su formirane u gipsu blizu akumulacije, duboke su do 30 m sa prečnikom 2 m. Takođe registrovan je veliki broj klizišta. Zbog ovih pojava veliki broj kuća je oštećen, a velike površine terena su postale neupotrebljive za poljoprivredu.

Akumulacija Huoshipo u Kini (Provincija Guizhou) je formirana u karstifikovanim krečnjacima sa 48 proslojaka gipsa. Visina ove nasute brane je 23 metra. Pregradni profil grade karstifikovani krečnjaci i gips (Slika 15).

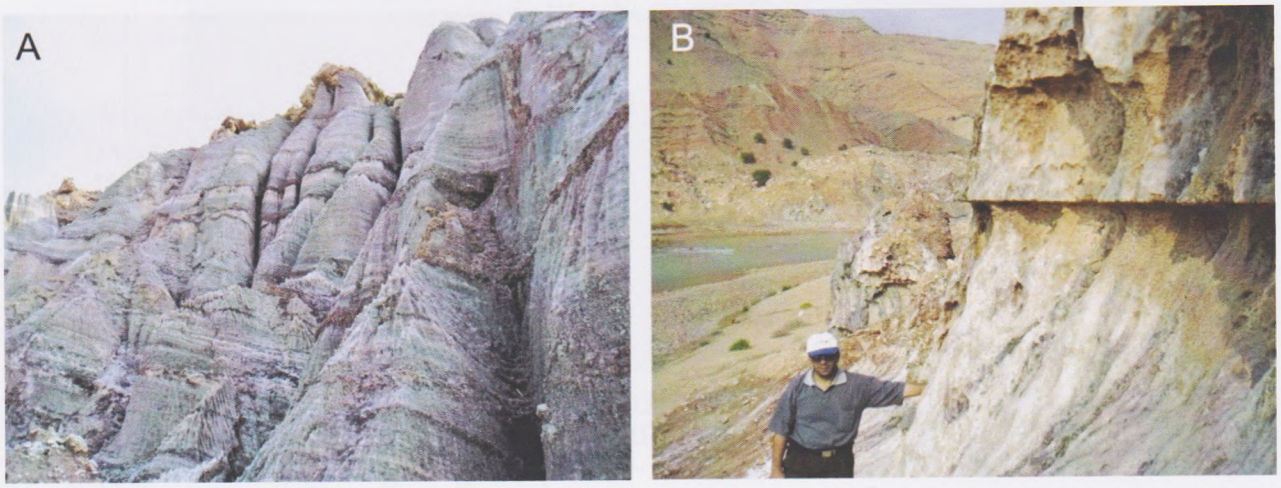


Slika. 15. Brana Huoshipo. Kina. A. Plan pregradnog profila i dela akumulacije. B. Profil na pravcu Sand Spring – kolaps (Lu i Cooper 1997)

Tokom izgradnje brane otkrivena je kaverna prečnika 60 – 70 cm. Tokom prvog punjenja registrovano je procurivanje oko 237 *l/s*. Voda sa karakteristikama arteskog izvora isticala je na izvoru oko 400 m nizvodno od brane. Prilikom svakog pražnjenja akumulacije registrovan je veliki broj novih kolapsa udaljenih oko 100 m od brane. Kolapsi su zapunjeni kamenom drobinom i prekriveni geomembranom. Voda u akumulaciji je sadržala 29 – 38 *mg/l* sulfata a na nizvodnom izvoru oko 200 *mg/l*. Sa dodatnim geotehničkim radovima (injekciona zavesa, geomembrane, glineni tepih) gubici su smanjeni na približno 80 *l/s* ali nisu potpuno eliminisani.

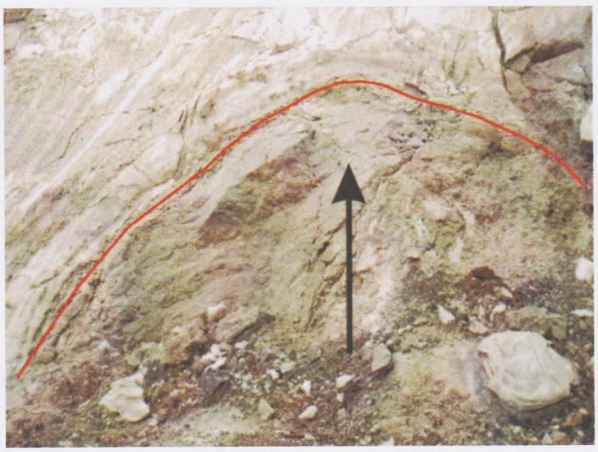
Sa izgradnjom nasute brane **Gotvand** u Iranu na reci Karun, visine 185 m,akumulacija je došla u

direktnikontakt sa evaporitima (Gasaran formacija) 4 km uzvodno od brane. Masa koja se sastoji od slojeva soli debljine 15 m sa interkalacijama anhidrita i slojevima plastične gline je u kontaktu sa akumulacijom u dužini cca 3 km. Ukupna debljina evaporita je oko 120 m (Slika 16). Zapremina ove mase evaporit je oko 61 milion m^3 (Mashkat i sar, 2018).



Slika 16. Akumulacija Gotvand, Iran. A - Naslage soli u delu levog boka akumulacije; B –Efekat rastvaranja soli tokom dvodnevne poplave (foto P. Milanović)

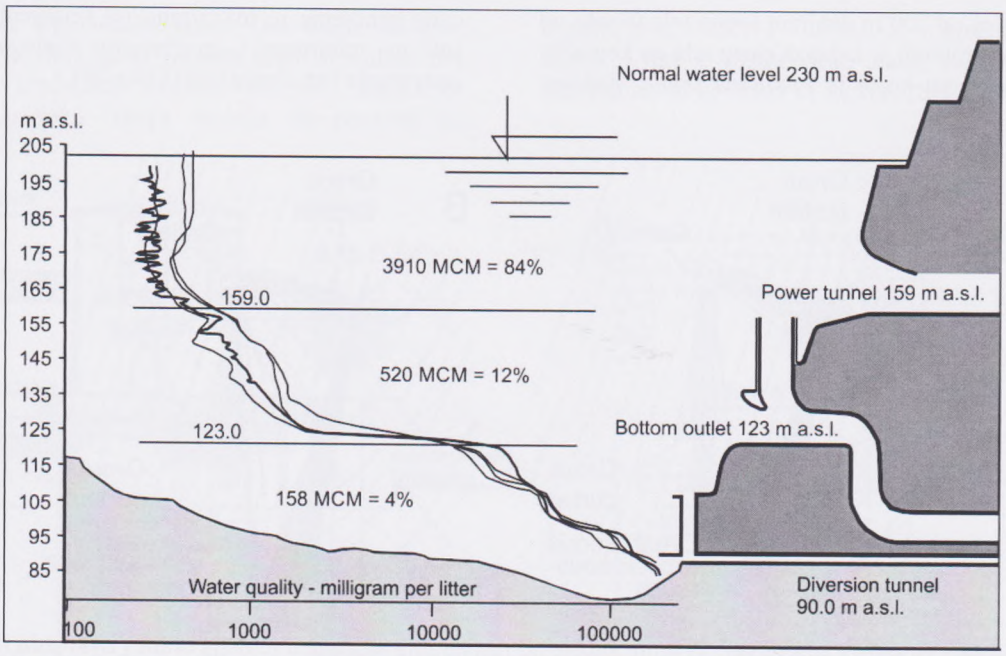
Mestimično, se masivna i kompaktna so u formi dijapirske strukture utiskuje kroz gornje slojeve Gasaran formacije (Slika 17).



Slika 17. Iran, akumulacija Gotvand, lokacija Anbal. Dijapirsko utiskivanje sone mase (foto P. Milanović)

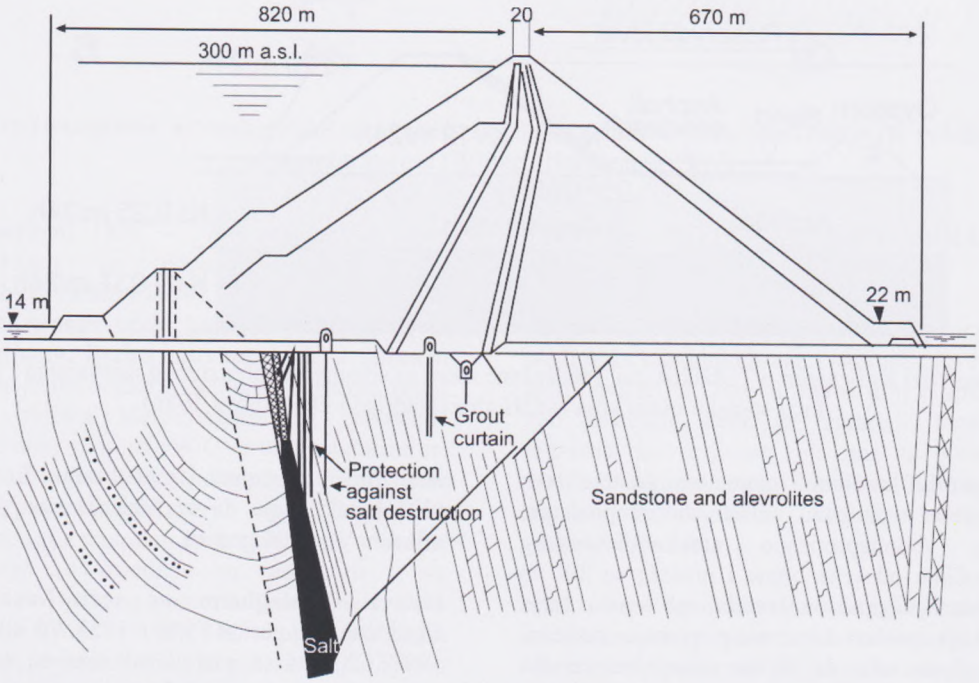
Pošto je voda ove akumulacije namenjena za energetiku, kontrolu poplava, navodnjavanje i vodosnabdevanje postavlja se pitanje njene upotrebljivosti zbog enormnog sadržaja soli. Obavljena su brojna terenska istraživanja i laboratorijska ispitivanja kao i eksperimenti rastvaranja na fizičkom modelu.Utvrđeno je da rastvaranje može da dostigne i 10 cm dnevno. To je potvrđeno i tokom jedne dvodnevne poplave (Slika 16, B).Približna analiza pokazuje da samo tokom prve godine voda akumulacije može da rastvori 11,5 miliona tona soli. Da bi se koliko toliko usporio intenzitet rastvaranja područje je prekriveno sa glinenim tepihom debljine 25 m i rip-rap zaštitom. 123 kolapsa je zapunjeno sa mešavinom gline i vode (ukupno 555.000 m^3) a temeljni ispust je opremljen za ispuštanje stratifikovane vode velike mineralizacije (Slika 18).

Akumulacija je napunjena 2012. Na slici 18 prikazani su rezultati merenja tokom 4 godine. Uočava se jasna stratifikovanost u zavisnosti od koncentracije soli. Sadržaj soli u gornjem sloju od cca 50 m se iz godine u godinu smanjuje pa ova voda može da se koristi za navodnjavanje dok se prezasićena voda akumulira na dnu akumulacije.



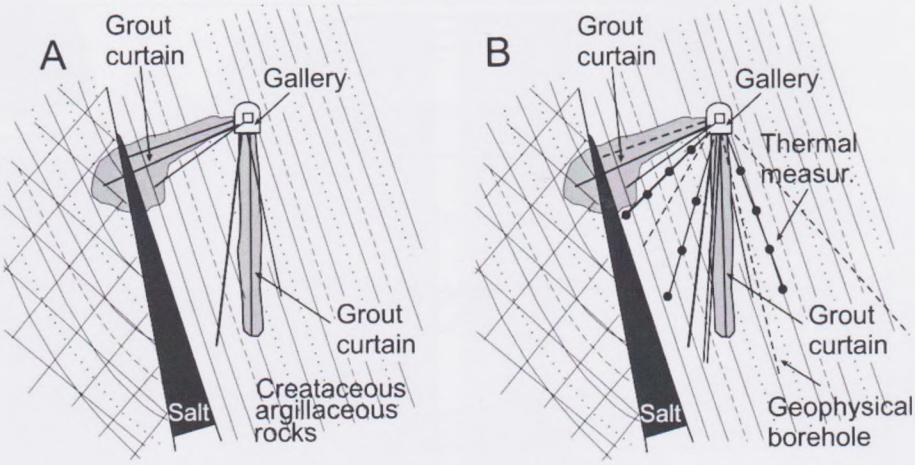
Slika 18. Iran, brana Gotvand. Shematski prikaz preseka dela akumulacije uz branu sa zonama stratifikacije za različite godine (T. Meshkat, D. Mahjoob i E. Ebtekar, 2018)

Kamena nasuta brana **Rogun** na reci Vakhsh u Tadžikistanu, visine 335 m i dužine 1.300 m je fundirana na terigenim krednim formacijama koje leže preko jurskih gipsonosnih argilita u kojima postoji sloj soli (Slika 19).



Slika 19. Brana Rogun, Tadžikistan. Geološke karakteristike pregradnog profila i shematski predstavljene mere zaštite od rastvaranja soli (Osadchi i Bahtiyarov, 1975)

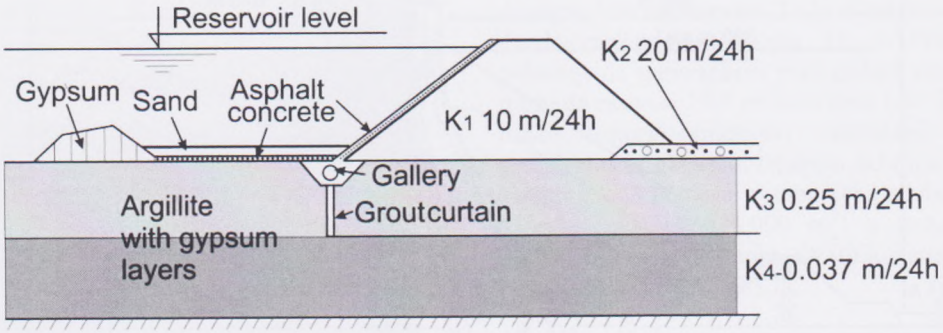
Na dubini većoj od 200 m debljina sonog tela je više od 10 m. Ključni problem je izdanak ovog tela na kontaktu brane sa stenom na kojoj je fundirana brana. Rešenje ovog problema je fokusirano na smanjenje rastvaranja soli na minimum i sprečavanju transporta produkta rastvaranja van sonog tela (Slika 20).



Slika 20. Brana Rogun, Tadžikistan. Rešenje zaštite od rastvaranja soli ispod temelja brane (Lykoshin i sar. 1992)

Jednoredna injekciona zavesa se sastoji od injekcionih bušotina nizvodno od sonog tela. Da bi se formirao slani ekran izbušen je red bušotina za injektiranje zasićene slane vode. One su izvedene iz dve galerije koje su urađene posebno za ovu namenu.

Brana **Niži Kafirnigan** na reci Kafirnigan u Tadžikistanu (nasuta brana visine 70 m) je fundirana na argilošistima sa čestim slojevima gipsa debljine do 35 cm (Slika 21).

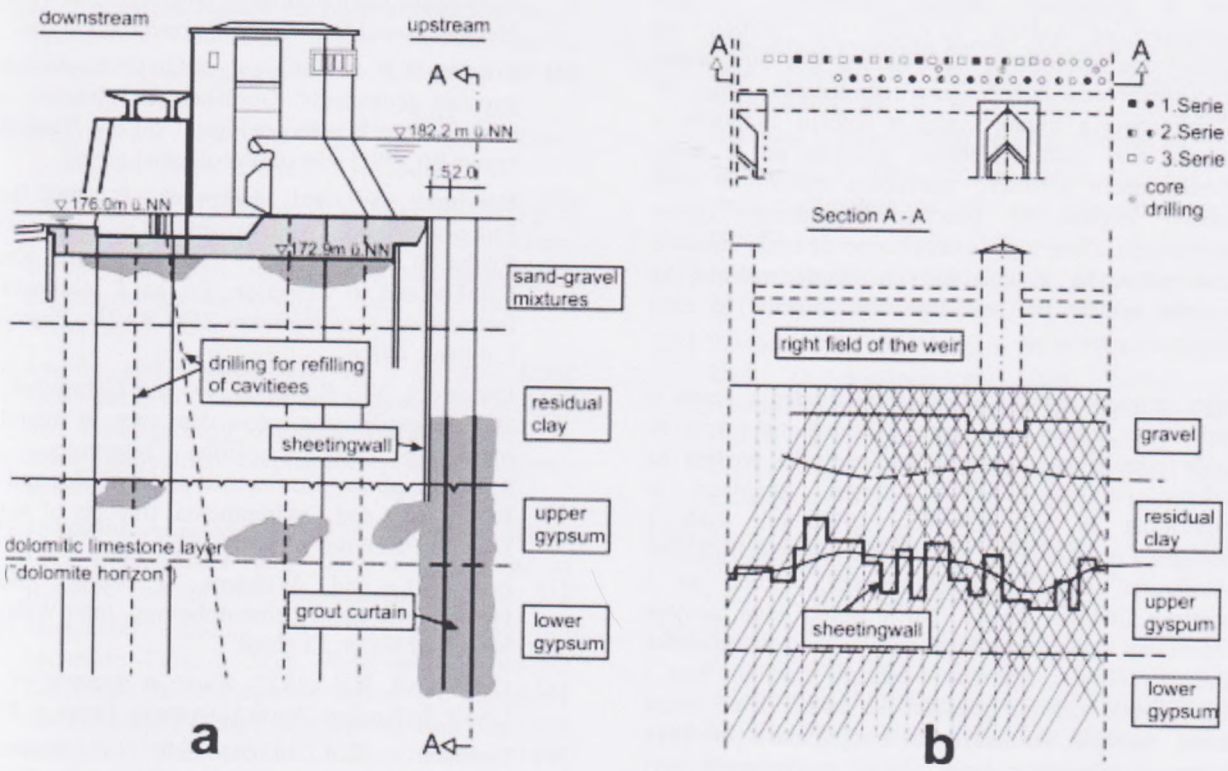


Slika 21. Brana Niži Kafirnigan u Tadžikistanu. Predložene mere za smanjenje intenzivnog rastvaranja i gubljenja vode kroz stensku masu koja sadrži gips (Nadriga i Denyanova 1986)

Predložene protivfiltracione mere se sastoje od: injekcione zavese kroz zonu velike vodopropusnosti; horizontalnog vodonepropusno asfaltno-betonskog tepiha koji počinje od vrha brane i proteže se 200 m uzvodno i nasipa od gipsa uz uzvodni rub tepiha. Ideja je da voda koja prolazi kroz nasip postaje zasićena rastvaranjem gipsa tako da joj se smanji rastvarački potencijal. Na taj način njen kapacitet karstifikacije je znatno smanjen pa čak i eliminisan. Detaljnom analizom, uključujući i modeliranje, Lebedev i Lehov (2011) zaključuju da će funkcija nasipa od gipsa biti efikasna oko 100 godina.

Ustava **Hessingheim** na reci Neckar, Nemačka, izgrađena je u period 1949 – 1958. (Wittke i Hermening 1997).Objekat se sastoji od ustave, hidroelektrane i prevodnice uz desnu obalu, a uspor je 6,2 m. Pregradni profil grade 3 – 6 m peska i šljunka koji su deponovani

iznad gline sa frgmentima gipsa. Ovi sedimenti čine povlatu za dva sloja gipsa između kojih se nalazi sloj dolomitičnog krečnjaka. Registrovane su i laminacije soli. Pre i u toku iskopa temelja na površini su registrovane vrtače i kolapsi, a u krečnjaku kaverne visine 1 do 2 metra. Kao mera zaštite urađena je dijafragma do kontakta sa gipsom (Slika 22).



Slika 22.Ustava Hessigheim. **a.** Stratigrafske sekvence i zaštitne geotehničke mere ispod ustave. **b.** položaj bušotina za injekcionu zavesu (Wittke i Harmening 1997)

Pošto su u periodu 1950 – 1984 registrovani novi kolapsi preduzeti su dopunski rehabilitacioni geotehnički zahvati (1988 i 1994). Utvrđeno je prisustvo dva nivoa podzemnih voda koja su razdvojena sa rezidualnom glinom. Brzina provirne vode u gornjem gipsanom sloju je decimetar u sekundi. Kaverne ispod prevodnice i objekta hidroelektrane su zapunjene gustom cementnom masom (W/C = 0,45+stabilizator) kroz bušotine razmaka 4 m. Bušotine su prošle kroz krečnjake radi eventualnihkaverni ispod. Injekciona zavesa je izvedena uz uzvodnu stranu ustave. Vertikalne i kose bušotine su izvedene na rastojanju 1 m. Injektiranje je obavljeno sa pontona. Korišćena je ređa injekciona masa (W/C = 0,8). Od ukupno utrošenih 10.600 t injekcione mase6.600 t je potrošeno na ispunu kaverni. Prognozirano je da će ovi radovi efikasno funkcionisati narednih 30 – 40 godina.

PROCENA RIZIKA GRAĐENJA BRANA U EVAPORITIMA

Zbog svojih geoloških i geotehničkih karakteristika kao sredine za izgradnju brana i akumulacija evaporiti imaju lošu reputaciju. Osnovni uzrok koji evaporite karateriše kao riskantne stene za izgradnju brana je njihova izuzetna rastvorljivost koja ima za posledicu gubitak vode iz akumulacija, drastično ugrožava stabilnost objekta i degradira kvalitet vode, često do neupotrebljivosti.

Kad u steni ispod temelja brane, koja sadrži evaporite, počne proces rastvaranja karstni kanali se proširuju a tokovi kroz njih postaju turbulentni. Pošto se njihov položaj ne može odrediti, kontrola nad njima je izuzetno teška. Kao posledica ovog procesa geotehničke

karakteristike geoloških formacija drastično gube svoje prirodne karakteristike. Nosivost stenske mase u području temelja se smanjuje, proces rastvaranja degradira injekcionu zavesu, bokovi akumulacija i okolni teren postaju nestabilni, formiraju se kolapsi a voda u akumulaciji postaje opterećena velikom koncentracijom sulfata ili soli. Za razliku od registrovanja gubitaka u karbonatima gde su početni gubici opterećeni iznošenjem sedimenata i lako su uočljivi (pojava mutne vode) u slučaju evaporita u početnoj fazi voda je obično prozirna pa je teško vizuelno uočiti prisustvo rastvorene materije u vodi odnosno registrovati početak degradiranja stene rastvaranjem. Zbog toga je neophodno da svaki zahvat u njima počne sa sistematskim uzimanje uzoraka za hemijske analize pre izgradnje objekta kao i u toku njegove eksploatacije.

Brojni primeri ukazuju da je rizik građenja brana u evaporitima znatno veći nego u karbonatima koji su takođe poznati kao nepredvidiva geološka sredina za građenje velikih objekata. Brojni problemi u evaporitima sa vododrživošću, kvalitetom vode i stabilnošću objekta često su završavali sa katastrofalnim posledicama tehničke i ekonomske prirode pa i gubicima ljudskih života. No i pored toga postoje primeri koji ukazuju na mogućnost da se uz kompleksne istražne radove i pravilno odabranu lokaciju kao i odgovarajuće zaštitne geotehničke mere rizici mogu znatno smanjiti do mere koja opravdava sredstva uložena u tehnička rešenja. Tu je najznačajniji prvi korak a to je izbor lokacije brane i akumulacije. Bez obzira na idealne geomorfološke karakteristike pregradnog profila prihvatljivi mogu da budu samo oni čije geološke karakteristike omogućuju da se uz primenu savremene tehnologije može obezbediti bezbedno funkcionisanje objekata. I u tom slučaju treba računati sa tim da opstanak velike većine objekata u evaporitima zahteva posebnu pažnju i povremene geotehničke intervencije tokom čitavog perioda njihove eksploatacije.

LITERATURA

[1] Adamo, N., Al-Ansari, N., Issa, E.I., Sissakian, V.K. and Knutson, S. 2015. Nystery of Mosul dam themoust dangerous dam in the world: Karstification and sikholes. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, vol. 5 no. 3, Scienpress Ltd., pp. 33-45.

[2] Al-Ansari, N., Issa, E.I., Sissakian, V.K. and Knutson, S. 2015. Mystery of Mosul dam the moust dangerous dam in the world: Foundation treatment during construction. Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering, vol. 5 no. 3, Scienpress Ltd., pp. 47–58 and 71–77.

[3] Anagnosti, P. 1987. Prediction and control of seepage in soluble grounds. IX European Conference,International Society of Soil Mechanics and Foundation Engineerig, Dublin.

[4] Cooper, A.H. and Calow, R.C. 1998. Avoiding gypsum geohazards: Guidance for planning and construction. British geological survey. Technical report WC/98/5 overseas geological series.

[5] Dreybrodt, W. and Gabrovšek, F. 2002.Basic Processes and Mechanisms Governing the Evolution of Karst. Evolution of Karst: FomPrekarst to Cessation, Ed. by F. Gabrovšek. Institutzaraziskovanjekrasa ZRC SAZU, Postojna-Lubljana. 448 p.

[6] Dreybrodt, W., Romanov, D. and Gabrovšek, F. 2001. Karstification below dam sites: A model of increasing leakage from reservoirs. 8th Multidisciplinary Conference on Sinkholes and the Engineering and Environmental Impacts of Karst. Luisville, Kentucky, U.S.A.

[7] Ford, D. and Williams, P. 2007. Karst Hydrogeology and Geomorphology. John Wiley & Sons, Chchester, England.

[8] Gorbunova, K.A. 1977. Karst in gypsum of the USSR. In Russian. Perm University, Perm, p. 83.

[9] Gorbunova, K.A, Maximovich, N.G, Kostarev, V.P., Andreichuk, V.N. 1991. Tectogenic impact on the karst in Perm Region, Newsletter, UNESCO, IGCP Project 299. Guilin, China. P. 85.

[10] Guzina, B.J., Sarić, M., and Petrović, N. 1991. Seepage and Dissolution at foundations of dam during the first impounding of the reservoir. Commission Internationale Des Grandes Barages, Vienne.

[11] James, A.N. and Lupton, A.R.R. 1978. Gypsum and anhydrite in foundations of hydraulic structures. Geotechnique. Vol. 3, 249-272.

[12] Jarvis, T. 2003. The Money Pit: Karst Failure of Anchor Dam, Wyoming. pp. 271–278. *In*: K.S. Johnson and J.T. Neal (eds.). Evaporite karst and engineering/environmental problems in the United States: Oklahama Geological Survey Circular 109.

[13] Johnson, K.S. 2004. Problems of dam construction in areas of gypsum karst. Karstology – XXI century: theoretical and practical significance. Proceedings of the International Symposium. Perm, Russia.

[14] Johnson, K.S. 1998. Evaporite karst in the United States. Karbonates and Evaporites 12 (1); 2 – 4.

[15] Klimchouk, A., Forti, P., Cooper, A.1996. Gypsum karst of the World: a brief overview. In: Gypsum Karst of the World, Ed. By Klimchouk, A., Lowe, D., Cooper, A., Sauro, U. International Journal of Speleology, Volume 25. Chapter II.1. Published by Societa Speleologica Italiana. L'Aquila, pp159-181.

[16] Korotkevich, G.V. 1970. The Salt Karst, Leningrad, Nedra, 256 p. (Na ruskom).

[17] Lebedev, A.L., i Lekhov, A.V. 2011. Modelling of chainage permeabilitz in a gypsiferous fracture-porous rock mass. Geologz, Engineering-geology, Hydrogeologz, Geocrylogy, No.1 (Na ruskom), Moskva, 63-74.

[18] Lu, Y., and Cooper, A.H. 1997. Gypsum Karst Geohazards in China. In The Engineering Geology and Hydrogeology of Karst Terranes. Ed. F.B. Back and J.B. Stephanson. A.A. Balkema, Roterdam.

[19] Lykoshin, A.G., Molokov, L.A. and Parabutchev, I.A. 1992. Karst and Dam Engineering. in Russian."Gidroproekt", Moskva. (In Russian).

[20] Manchebo Piqueras, J.A., Sanchez Perez, E., Menendez-Pidal, I. 2011. Water seepage beneath dams on soluble evaporate deposits: a laboratory and field study (Caspe dam, Spain). Bull Eng Geol Environ (2012) DOI 10.1007/s 10064-0379-2. Springer-Verlag.

[21] Maximovich, N.G. 1986. Investigation of interaction of gypsum and potassic solution as consequence of chemical grouting beneath Kama Dam foundation. In Russia. Regional Geology SSSR. MGU, No. 7 pp 76-83.

[22] Maximovich, N.G. 1987. Evaluation of dam foundation at soluble rocks, Comprehensive investigations of geology and hydro-ecology of the Kama Dam Reservoir Na ruskom). Perm, pp 114-121.

[23] Maximovich, N.G. 2006. Safety of dams on soluble rock (The Kama hydroelectric power station as an example). Book 212 pages. Publisher "Garmonia", Perm Russia.

[24] Maksimovich, N. & Meshcheriakova, O. 2018. The experience of the dam construction on gypsum-bearing rocks (in territory of the former USSR). International Symposium KARST 2018 Expected the Unexpected, Trebinje.

[25] Meshkat, T., Mahjoob D., i Ebtekar. E. 2018. Evaluation evaporite karstic challange in Gotvand dam reservoir. U Proceedings of International Symposium, ed. S. Milanović i Z. Stevanović, Beograd, Centar za hidrogeologiju karsta, 89 – 96.

[26] Milanović, P. 2004, 2005 and 2010. Gotvand Dam project. Problem of salt and gypsum. Mission reports.

[27] Milanović, P., Maksimovich, N., Meshcheriakova. 2019. Dams and Reservoirs in Karst. Springer

[28] Payton, C.C. and Hansen, M.N. 2003. Gypsum karst in southwestern Utah: Failure and reconstruction of Quail Creek Dike/Evaporite karst and engineering/environmental problems in the United States. K.S. Johnson and J.T. Neal (eds.). Oklahoma Geological Survey Circular 109.

[29] Raeisi, E., Zare, M., Aghdam, J.A. 2013. Hydrogeology of gypsum formations in Iran. J. Cave and Karst Stud. Iran 75. pp 68-80.

[30] Rogers, J.D. 2007. The 1928 St. Francis Dam Failure and its Impact on American Civil Engineering. American Society of Civil Engineers.

[31] Rogers, J.D., and Hasselmann, K.F. 2013. The St. Francis Dam Failure: Worst American Engineering Disaster of the 20th Century. AEG Shelmon Specialty Conference: Dam Failures and Incidents. Denver: Association of Environmental and Engineering Geologists.

[32] Romanov, D., Gabrovšek, F. and Dreybrodt, W. 2003. Dam sites in soluble rocks: a model of increasing leakage by dissolution widening of fractures beneath a dam. Engineering Geology 70. Elsevier, pp 17-35.

[33] Witke, W. i Hermeningen, H. 1997. Grouting of cavernose gypsum rock underneath the foundation of the wier, locks and powerhouse at Hessigheim on the River Neckar. Proccedings of the 19th Congress of the ICOLD, Florence, Q75, R.44, 613-626.

QUESTIONS WITH DAMS AND RESERVOIRS IN EVAPORATES

by

Petar MILANOVIĆ[1], Nikolay MAKSIMOVICH[2], Olga MESHCHERIAKOVA[3]
[1] Beograd, Srbija, petar.mi@eunet.rs;
[2] Perm State University, Perm, Rusija, nmax@psu.ru
[3] Perm State University, Perm, Rusija, olgam@gmail.com

Summary

Karstified rock masses can be declared as extreme geological formation and construction of dams and reservoirs in that environment cannot be treated as a routine undertaking. Particularlyexceptional, sometimes highly problematic, is the construction of dams and reservoirs in rock formations that include even minor proportions of evaporite rock deposits. In practice, every dam and/or reservoir that is constructed in geological formations containing evaporites will face at least one of the three principal problems: seepage losses, instability of dam foundation and reservoir banks and water pollution. Number of dams and reservoirs have been affected by gypsum and salt dissolution problems and failed to retain water up to their design levels due to extensive leakage, some of them collapsed catastrophically, others were abandoned, and some reservoirs suffered severe pollution of the stored water with solutes. The most common and most frequent problems are subsidences caused by groundwater abstraction, and leakage beneath the dam due to solution channels forming in this rock. There are numerous examples of dams founded mostly in gypsum that have needed long time and costly rehabilitation. Particularly important are examples of dam failures due to the conventional grouting technologies proving to be inadequate despite the high quality of remedial works undertaken. As a consequence of the solubility of evaporites, the watertight resistance of grouting structures can quickly become reduced or eliminated by post-grouting processes. The technical losses including losses of human lives have caused increasing concern with building large structures in these environment.

Key words: Karst, evaporite, dam, reservoir, seepage