

Inženjerske karakteristike vapnenaca i evaporita

Student: Ivan Babić

Broj indeksa: R1

Kolegij: Inženjerska geologija

Siječanj, 2009, Zagreb

SADRŽAJ

1. Geološki rizici	1
2. Istraživanje zadataka i problema	2
3. Površinski iskapi i transportni putevi	5
4. Vodeni rezervoari i odlaganje otpada	6
5. Temelji za mostove i građevine	7
6. Brane i rezervoari	8
7. Tuneli i podzemni radovi	9
8. Građevni materijali	10
9. Slučajevi u povijesti	11
9.1. Propadanja i skori slučajevi površinskih urušavanja poviše kaverni	11
9.1.1. Rudnik zapadni Driefontein	11
9.1.2. Urušavanje mosta Tarron springs	11
9.1.3. Zračna luka Palermo, Sicilija	11
9.2. Problemi s krškim vapnencem u građenju TVA brana	12
9.2.1. Kentucky brana	12
9.2.2. Brana velikih slapova	14
9.3. Konstrukcije i sportski objekti poviše krškog mramora	15
9.4. Žbukana zavjesa na brani El Cajon, Honduras	15
9.5. Problemi s gipsom ispod rezervoara	17
9.6. Onečišćenje krških rezervoara Mount Gambier, Australia	17

POPIS SLIKA

Slika 1. Dolina Vajont, Italija	1
Slika 2. Presjek odrona terena, dolina Vajont	2
Slika 3. Pojavljivanje vrtača na terenu	3
Slika 4. Zemljano-penetracijski radar	4
Slika 5. Brana velikih slapova	14
Slika 6. Brana El Cajon, Honduras	

1. Geološki rizici

Razvijen krški krajolik apsorbira skoro svu vodu koja padne na njega. Dakle, velike količine vode se skupljaju na tlu, ponekad ovo unapređuje klizanje tla tako da se podiže razina podzemne vode u formacijama sklonijima klizanju. Najveća katastrofa odrona tla modernog vremena iz 1963. godine je odron tla u Vajont dolini u Italiji (slika 1). Bila je dijelom potaknuta ovim mehanizmima; prvotno ispunjavanje rezevoara do 267 m visoke brane podigla je razinu podzemne vode na njezinim bokovima dovoljno da inicira odron ogromnih količina vapnenačkog škriljca i pješčenjaka. Te naslage zauzimaju ekstremitete bore te naslage podsjećaju i najviše točke planine Toc, te se ponovno ponavljaju spljoštene na dnu doline. Otkriveno je da brzina kretanja naslaga može biti usporena držeći rezervoar vode na odgovarajućoj visini.

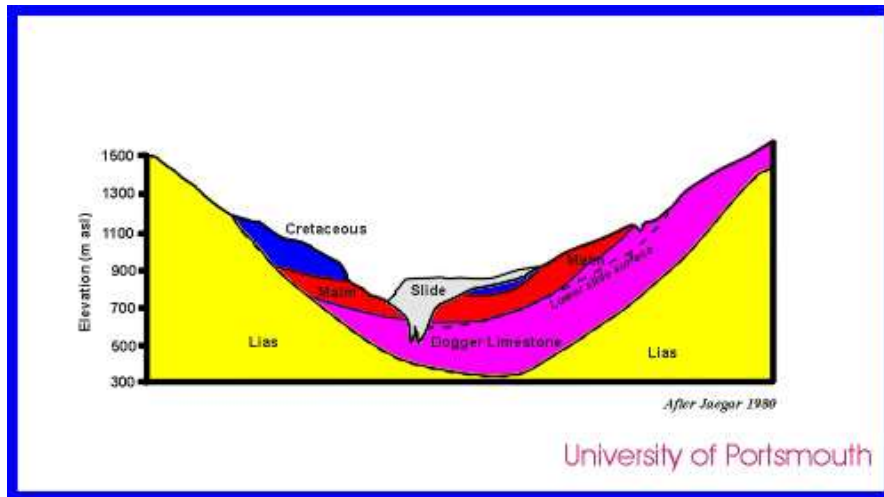


Slika 1. Dolina Vajont, Italija

Nažalost inženjeri nisu uzeli u obzir da se vapnenac ispod Dogger formacije nastavlja ispod planine Toc i apsorbira padaline iz velikog krškog područja od izdanaka na vrhu s jedne i druge strane. Infiltracija iz ove zone upijanja će destabilizirati formacije. Bilo je nemoguće kontrolirati razinu podzemne vode na napredujućoj kliznoj masi s obzirom na podizanje rezervoara od brzog punjenja kišnicom na planinu Toc. 250 milijuna m³ stijene

koja se srušila niz padinu 1963. podudara se točno s tim, u skladu s gornjom graničnom tenzijskom pukotinom prethodne klizne mase (Slika 2).

Poginulo je 2000 ljudi u poplavi koja je uslijedila kada je jezero istisnuto iz korita od brzog odrona. Plimni val prelio je branu i poplavoio grad Longarone i čak sedam sela ispod jezera.



Slika 2. Presjek odrona terena, dolina Vajont

Odron u Vajontu bio je posebna tragedija i možemo se samo nadati da se takvo što neće ponoviti. Opasnost od urušavanja vrtača nije iste razine ali je većeg trenutnog značaja za nas, jer se inženjerski radovi i izgrađuju na krškom terenu. Posebno je važno istražiti i okarakterizirati temeljnu stijenu kritičnih objekata, gdje boravi veliki broj ljudi, poput javnih zgrada ili gdje urušavanje može izazvati veće posljedice, poput nuklearnih elektrana, odlagališta otpada i brana. Rješavanje rizika vrtača zahtijeva ne samo adekvatno poznavanje geologije nego i kontrolu razine podzemne vode.

2. Istraživanje zadataka i problema

U regijama gdje su poznate pojave vrtača sav trud se mora uložiti da se pronađu napredujuće vrtače. Problem u kršu je još aktualniji zato što je osnovna stijena skrivena i

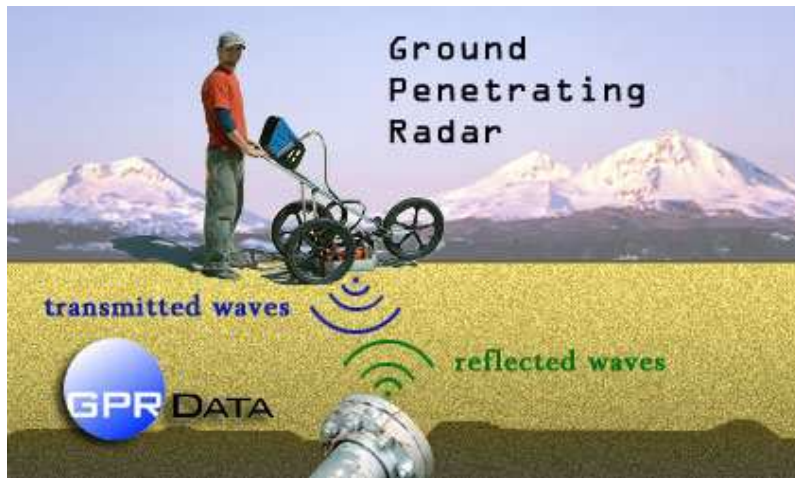
stoga je za buduća urušavanja potrebno samo pokretanje tla. Vrtače se često pojavljuju na niskim točkama terena posebno kada izgleda da se sve nalaze na jednoj liniji (Slika3).



Slika 3. Pojavljivanje vrtača na terenu

Primjer istraživačkih tehnika za istraživanje incipijentnih vrtača ispod plitkih opterećenja (do 10 m) su opisali Wilson i Beck. Brojne bušotine se koriste da bi se ustanovila površina osnovne stijene, SPT (standardni penetracijski test) u tim bušotinama može otkriti prisutnost mekanog tla. Geofizičke tehnike danas se uspješno koriste posebno za pronalazak plitkih oblika ispod pješčanih opterećenja. Metode koje su izuzetno efektivne su: zemljano penetracijski radar (glineni slojevi nisu važni) i elektromagnetska kondukcija. Down-hole ispitivanja se također uspješno primjenjuju za dokumentaciju tečenja vode prema glinenoj rupi.

U gustim vapnencima šupljine su važne za stabilnost površine, mogu biti pronađeni pomoću prethodnih tehnika. Cooper i Ballard su uspješno pronašli šupljine u dubini koristeći cross-hole zemljano-penetracijski radar koji istražuje volumen stijene razmaknute između dvije bušotine, razmaknute od 6 do 10 metara, također su imali uspjeha i sa drugim geofizičkim tehnikama te su napravili vodič za biranje među tehnikama ovisno o uvjetima na terenu (Slika 4).



Slika 4. Zemljano-penetracijski radar

Problem pronalaska kaverni povećava se kako se kaverne gube u dubini i kada im se smanjuje veličina ili kada se dijelom ili kompletno ispune s debrisom. U opasnim situacijama inženjeri moraju locirati šupljine na više od 100 m dubine. Nije moguće proširiti istraživanje u uskim mrežama do takvih dubina pa postoji mogućnost na nailaženje na šupljine koje ostaju neriješene, posebno za rezervoare vode i transportne radove. Regionalne studije i korelacije su izuzetno važni za postavljanje takvih objekata. Neravnost na površini vapnenaca i dolomita predstavljaju zapreke za inženjere. Potrebno je znati točne informacije o dubini do stijene da se može procijeniti količina preoterećenja glavnih slojeva koje se oslanjaju na stijenu. Temelje se dubokim stupovima koje se na dubokim temeljima opiru o stijenu.

Visoka topivost gipsa i opasne posljedice njegovog doticaja s vodom zahtijeva da se gips locira na mjestu gdje se istražuje. Uslojeni gips pripada stratigrafskoj sekvenci koja može biti ustanovljena putem bušenja i samog pregledavanja presjeka bušotine na površini. Stoga pronalazak slojeva gipsa nije misterij, ista je stvar i sa stijenama soli. Veći problem u vezi s gipsom je njegovo prelaženje u anhidrit. Budući da je anhidrit materijal koje se potencijalno širi, inženjeri moraju znati gdje se nalazi. U Francuskoj je kamion anhidrita nezajući ostavljen na željezničkom nasipu ispod konstrukcije; hidratizacija je povećala volumen anhidrita koji je poslije ozbiljno oštetio nasip.

Problemi stratigrafske i strukturalne kontrole na krškim formacijama određuju se na terenu. Otkrivanje stijena koje sadrže pukotine čini se kao neadekvatna metoda, ali je koristan vodič za inženjere za rezervoar ili kanal u kršu. Istraživanje je potrebno za

određivanje granice podzemne vode u svrhu određivanja granica vodenih rezervoara. Dubina podzemne vode mora biti određena u relaciji s dubinom vodenih rezervoara, ako je granica vode preko dubine rezervoara, prsten oko rezervoara trebao bi zadržati vodu bez ozbiljnijeg curenja, ako nije, rezervoar može ozbiljno curiti ili neće, ovisi o lokalnim uvjetima i udaljenostima. Za razliku od cijeđenja kroz kontinuirane pore, kretanje vode kroz krške otvore zahtijeva samo malu razliku potencijala i duge izlazne rute.

3. Površinski iskopi i transportni putevi

Plitki usjeci za transportne puteve i građevne zahvate su problematični radi prisutnosti krša. Varijacija tvrdoće od intaktnog vapnenca do mekog vapnenca komplicira operacije. Blokovi koji nekad popunjavaju izložene šupljine su vrlo teški za obradu. Glina uzrokuje često odronjavanje stijena i klizanje. I nazubljena stijena na dnu usjeka stvara nejednake uvjete u temelju za strukture koje se grade u usjeku.

Isušivanje velikih površina iskopima izaziva još problema. Ispumpavanje drenirane vode ako je to moguće, može uzrokovati nova urušenja kaverni. U većem kontekstu ispušavanje vode s iskopa će spustiti razinu podzemne vode te je moguće ubrzanje propadanja pojedinih vrtača. Žbukanje s jeftinijim Portland cementom radi odvajanja tokova vode nije praktično zbog velikih brzina vode u tokovima, jer materijal može erodirati prije nego se žbuka stisne. U tom slučaju skuplje kemijske žbuke možda budu uspješnije u rješavanju tog problema.

Ministarstvo prometa Tennessee je otkrilo da $\frac{3}{4}$ od 70 urušenih vrtača koje su se razvile od 1978. do 1988. su na neasfaltiranim cestama. Voda koja se izlila je pokrenula urušavanja infiltracijom u postojeće vrtače u gustom vapnencu. Problem je riješen asfaltiranjem svih cesta i pridala se pozornost dreniranju, da se spriječi istjecanje vode na neasfaltirane površine.

Stari krš tropskih i suptropskih područja stvara forme koje se još i nazivaju „super krš“, karakteriziraju ih stožasti vrhovi, diskontinuirane oštre podjele i špilje oblika „pilotske kabine“ i potopljena dna na nejednakim dubinama. Kosine su vrlo stepanaste i stjenovite, i iskopi moraju imati usjeke sa strane kosine na nestabilnim temeljima velike

frakturiranosti. Punjenja u kavernama imaju gradaciju od grubih komada stijene na dnu do finijih veličina na vrhu, koja služe filtriranju da spriječe erodiranje materijala u vrtače. U regiji Liupanshui, u Kini je tzv. kineski krš (stožasti vrhovi koji strše), projektiranje etaža je vrlo otežano a većina radova se događa na donjim, nižim etažama, gdje sol pokriva stijene. Površina temeljnog tla ispod soli je vrlo oštra, stvarajući vrlo teške uvjete za iskapanje.

4. Vodeni rezervoari i odlaganje otpada

Tokovi otvorene vode na krškom terenu imaju malu ili nikakvu filtraciju u podzemlje. Međutim, puknuće kanalizacijske cijevi može onečistiti vodene rezervoare. Uzroci onečišćenja u urbanim sredinama može biti curenje tekućine s polja ili benzinskih crpki. Nezatvoreni septički sistemi su potencijalna opasnost. Slučaj nesreće jezera Glady u Floridi demonstrira kako se brzo voda može kretati kroz vapnenac. Jezero je imalo površinu od 80 ha (0,8 km²), ispod kojeg su do 20-30 metara ležali slojevi pijeska, gline i školjaka ispod krškog vapnenca. Vrtača se formirala 2. godine nakon što je sagrađeno jezero i drenirala je četvrtinu njegove površine u manje od 20 ha. Uzorci podzemne vode iz bunara 860 m udaljenih od jezera su sadržavali organizme pristigle iz jezerske vode. Žitelji su morali koristiti vodu u bocama dok popravak nije završio.

Voda koja je došla iz vapnenca je saturirana vapnom. To ne stvara neke velike probleme, jer gdje se ne može koristiti tvrda voda, mogu se upotrijebiti omekšivači vode. Voda iz vapnenca uzrokuje nakupljanje kamenca na cijevima, što se mora odstraniti ili naposljetku zamijeniti cijevi.

Stijene soli su vrlo važan materijal za odlaganje opasnog otpada. Otvori se mogu izvesti jeftino topljenjem stijene soli na mjestu baze bunara, voda se pumpa unutra a čestice soli se izbacuju vani, sve dok nema sigurne i dovoljne dimenzije. U takvim otvorima otrovna tvar se može odložiti relativno sigurno. Manjak pukotina u stijenama soli osigurava da neće doći do curenja, premda vlada kontinuirano proučava mogućnost nuklearnog otpada u stijenama soli.

5. Temelji za mostove i građevine

Prva opasnost je mogućnost da postojeća šupljina može biti ispod strukture građevine i da se sruši nakon što je građevina u pogonu. U aktivnom kršu, opasnost od novih vrtača se također mora razmotriti. Građevine koje se podupiru brojnim temeljnim stopama moraju imati bušotine ispod svake stope da se istraže opasnosti od potencijalnih šupljina. Šupljina se pronađe kada bušaća cijev propadne na određenu dubinu kroz stijenu.

Geofizičke metode su od velike pomoći i jeftinije su nego bušenje kao najbolje, geofizika može smanjiti broj bušotina koje nam trebaju, ali neke bušotine su neophodne. Dubina istraživanja ispod svake stope treba biti određena prema razmaku između stopa i razmaku između vrtača. Moraju se izraditi neke dublje bušotine na širem terenu za mogućnost nailaska na veće šupljine na većim dubinama.

Istraživanje kaverni za građevne temelje je u svrhu statičke analize rizika. Mehanika stijena i tla se može upotrijebiti za analizu premošćenja kapaciteta prirodnih slojeva koji prelaze preko stijene. Na primjer Capozza (1979. god.) je koristio numeričko modeliranje za izračun opasnosti urušavanja površine na sloj konglomerata koji je bio poviše kaverne u krškom vapnencu. Analiza je odredila granične veličine kaverne koja bi bila opasna za građevine na površini i razmak bušotina je izabran tako da sve kaverne te veličine ili veće budu pronađene.

Nepravilni vrhovi stijena česti u vapnencima, mogu uzrokovati ozbiljne probleme na temeljima velikih, teških građevina. Teški tereti se koncentriraju na dio temelja naslonjen na vrhove, koji se mogu slomiti ako su potaknuti topljenjem u isto vrijeme. Da bismo pružili ujednačenu krutost temelja ispod ekstenzivne strukture potrebna nam je poduprta greda između stopa. Stupovi koji sijeku inklinirani dio temeljne stijene mogu kliziti po njenoj površini prije nego se zabije u kamenu podlogu. Takvi stupovi tada otkližu u tlo i postaju skoro beskorisni.

Swiger i East (1959. god.) su opisali poteškoće u temeljenju teške parne elektrane na nazubljnom vapnencu od Silurian Niagara formacija blizu Chicaga. Vrhovi su podijeljeni otopljenim pukotinama i na nekim mjestima vertikalnim kavernama, od kojih se mnogi protežu 40m ispod površine do tvrde slane stijene Macguoket formacije koja se proteže ispod vapnenca.

Za vrijeme ledenog doba, neki vrhovi su pukli od prelaska ledenih pokrova. Razlomljeni vapnenac, debris je pronađen u glini varirajući od tvrdog do vrlo mekog.

Poslije skidanja što je više moguće naslaga sa stijene i označavajući izložene kamene površine, određeno je da je jedna od dvije vertikalne pukotine razvučenija i otopljenija od druge. Ova informacija je vodila druga istraživanja s brojnim bušotinama. Svaki stijenski vrh je namjenjen da pridrži teške terete i da primi bar dvije bušotine, da osigura kvalitetu stijene i osigura da nije došlo do oštećenja stupova.

Ovaj slučaj ističe mogućnost ozbiljnih ograničenja nosivosti u krškom vapnencu uz prisutnost gline.

Temelji za stupove se često biraju za oslonac struktura kada su slojevi tla slabi i stišljivi pa je potrebno prenijeti pritisak dolje na temeljnu stijenu.

Kada je ova stijena krški vapnenac li dolomit nastaju brojni problemi. Prvi je problem potreba da stup uđe u stijenu prije nego otkliže niz njezinu površinu. Prisutnost stijene i blokovi koji plutaju na breči ili na „terra rossa“ mogu dati lažne podatke da je zona oslonca pronađena. Kada se stup upori u takvu stijenu ili na one stijene koje su poviše kaverni, može doći do prodiranja kroz stijenu uzrokujući velike posljedice. Bušenje bušotina za stupove je komlicirano jer dolazi do prodiranja bušaće vode u šupljine.

U slučaju mladih kalkarenita, postoje teškoće u postizanju dovoljnog kapaciteta težine od temelja stupova. Ti porozni materijali su slabo povezani što uzrokuje oštećenje stupova i pucanje veza u stijenama. Stupovi ne razvijaju adheziju sa stijenom i imaju malu nosivost ispod njenih temelja.

Posebna briga mora biti poduzeta kad je gips prisutan u temeljnoj stijeni ispod temelja. Gips u zemlji ima karakteristiku da se isteže. Moćenje može srušiti strukture kao i da odvoji gips od tla.

6. Brane i rezervoari

U dodatak za probleme pri temeljenju koji su spomenuti za teške strukture na topivim stijenama, razina vode na takvim stijenama podiže ozbiljnu brigu da bi rezervoari mogli gadno curiti, čak do točke neuporabljivosti. To curenje se može javiti kao rezultat

otkrivanja vode u otvorenom kanalu koji je nestao tijekom istraživanja. Također može biti od punjenja uzrokovanih s novim podzemnim tokom.

U slučaju gipsa i stijena soli postoji dodatna mogućnost razvitka novih kaverni, skupa s rušenjem površine i cijedenjem. Stabilnost temelja brane na vapnencu može biti u opasnosti radi gline u temelju ili radi slabe krške temeljne stijene.

U slučaju brana, postoji dodatna opasnost od razvitka visokog tlaka u porama stijena. Usprkos tim brigama, mnogo je uspješnih brana i rezervoara na vapnenačkom terenu. Postoji također broj kompletnih grešaka sa suhim rezervoarima. I tu je mnogo slučajeva u kojima cijena i izdržljivost konstrukcije je povezana s problemima otkrivenima na poslu.

7. Tuneli i podzemni radovi

Vapnenci i dolomiti su obično odlične stijene za podzemna otvaranja kao dokaz njihovog kapaciteta da formiraju stabilne otvore velikih dimenzija. Problem s podzemnim radovima u vapnencu su vezani uglavnom uz krš, gdje se događaju: iznenadna prodiranja vode, nestabilni krovovi u glini, jalova stijena i klizanje blokova po muljnoj ravnini.

Evaporitne stijene, s druge strane su sposobne prezentirati ekstreme u tunelskim uvjetima.

Masivne stijene soli su idealne, ali tanki slojevi soli mogu biti otopljeni što vodi do nestabilnih struktura i depozita rezidualne breče. Sol na krajevima doma može sadržavati organski materijal u obliku bitumena, nafte ili plina koji stvaraju plinske izboje koji prodiru u tunel. Teren od gipsa sadrži raznolike strukture s cijevima, breče nepravilnih slojeva i praznina. Mala snaga materijala uzrokuje stezanje tunela na umjerenim dubinama. Vodeni tuneli koji prolaze kroz gips ili sol moraju biti apsolutno bez procurivanja jer bi topljenje stvorilo nestabilne otvore koji bi mogli uništiti tunel.

Mladi kalkarenit i kalcirudit se ponašaju drugačije na dubinama ispod 300m. Na plitkim dubinama ponašanje je plastično i krto, kao i većina čvrstih stijena. Poviše 15Mpa neke postaju potpuno plastične. Tuneli na dubinama većima od ove razvijaju kalavo stanje u zidovima, podovima i krovu, i tunel se steže unutra. Kreda se može iskapati i bez eksploziva upotrebljavajući posebne uređaje, kombajne.

Kada se probija tunel kroz bilo koji tip stijene uključujući sve navedene slučajeve, pojavljivanje zona s bliskim pukotinama obično zahtjeva potrebu za dodatnim podupiranjem. Čak i u kredi u koju je skoro masivna stijena, stijene padaju i voda ulazi na mjestu gdje se nalaze veći diskontinuiteti u tunelu.

Mogućnost da se anhidrit promjeni u gips povećava se pažnja i povećava se pritisak na obloge. Širenje anhidrita u zapadnom Texasu, opisao je Brune. Dokazao je da prisutnost ekspanzionističkog pritiska od najmanje 3,5 Mpa a moguće i više.

Tuneli kroz anhidrit moraju biti zaštićeni od takvih pritisaka sprečavajući da voda dođe u anhidrit s dobrim drenažama vode iz alkalnih stijena. Vodeni tuneli koji prolaze kroz anhidrit trebaju biti smješteni unutar snažnog čeličnog oklopa.

8. Građevni materijali

Vapnenci i dolomiti se često koriste kao agregati i za Portland cement i za bitumenski beton. Njihovi razbijeni komadi daju dobre oblike i dobru granulaciju i njihovo pojavljivanje je često u ekonomskim dobivanjima. Sadržaj od više od 15% ovih materijala popravlja kvalitetu agregata. Također agregati iz betona mogu reagirati s alkalima iz cementa što može biti destruktivno i ekspanzivno. Gips nije dopušten u agregatima za beton jer usporava vezivanje cementa.

Podzemne vode evapornih terena bogate sulfatnom i sulfitnom kiselinom mogu oštetiti beton. Beton otporan na sulfatnu kiselinu zahtijeva veliki udio željeza, da bude koristan. Agregati dolomita se koriste za konstrukcije cijevi jer imaju dobru otpornost na koroziju. Mramor i neki vapnenci se koriste za dekorativne svrhe na pročeljima zgrada. Mora se paziti da se ne sijeku ploče pretanko kada se nastoje slomiti i opustiti pod stresom od deformacija građevinskih struktura.

9. Slučajevi u povijesti

9.1. Propadanja i skori slučajevi površinskih urušavanja poviše kaverni

Vrtače koje su stvorene ispod struktura nekad proizvedu dramatično inenadno totalno uništavanje. Na sreću, to je dosta rijetko ali uvijek oprez s kojim trebamo računati, posebno u područjima s ubrzanim padom razine podzemne vode. Evo dva primjera:

9.1.1. *Rudnik zapadni Driefontein*

Produbljenje ovog Južnoafričkog rudnika je povećalo brzinu opadanja podzemne vode, što je uzrokovalo da se glavni površinski tok u regiji isuši. Mjerenja gravitacije provedena u mjestu za nove tri elektrane je upućivala da se kaverna razvila po diskontinuitetima ispod mjesta. Bušenje 117m dubokih bušotina do rezidualnih tala, temelj je napravljen s 171 bušotinom dubine 9-15 m, površinsko tlo je asfaltirano da se spriječi infiltracija kišnice u udaljenosti od 60m u krugu elektrane.

Jednog ranog jutra prosinca 1962. godine, bez upozorenja cijela elektrana i 29 ljudi je nestalo u vrtači. Zgrada i osoblje nisu nikad pronađeni, nakon što je prestala nada za spašavanje, rupa koja je bila 55m promjera i više od 30m dubine je zatrpana da stabilizira još pokretno tlo.

9.1.2. *Urušavanje mosta Tarron springs*

1969. godine u Floridi, most je uništen iznenada od vrtače koja je progutala tri temeljna dijela mosta i dio ceste. Promet nije imao vremena stati i jedna osoba se utopila dok su drugi bili ozlijeđeni. Dijelovi mosta na četiri čelična stupa su propali kroz pješčani aluvij u porozni vapnenac.

9.1.3. *Zračna luka Palermo, Sicilija*

Za svako urušavanje, tu je mnogo slučajeva koji su skoro završili tragično. Možda nijedan više veličanstven od piste zračne luke u Palermu. 1970.godine tijekom održavanja piste aerodroma, radnici su slučajno otkrili kavernu od 12 000 m³ volumena koja se nalazila samo 2 metra ispod asfalta. Šupljina se širila preko cijele širine piste

zračne luke točno na mjestu gdje slijeću avioni. Bila je razvijena u cementiranom vapnencu i formacijama dolomitnih breča. O tome se moralo voditi računa pri gradnji aerodroma, ali je nekako to mjesto preskočeno i asfaltirano. Nakon što su ručno uklonjeni stalaktiti i stalagmiti koji su rasli odozgo i odozdo i nakon što je debris izvađen s tla, šupljina je napunjena s cementom kroz rupe bušene kroz asfalt.

Iako je to bilo urušavanje u ekonomskom smislu, čudno preživljavanje putnika u Južnoafričkom vlaku 1975. godine, uzrokovano vrtačom, također se ubraja u slučajeve koji su mogli završiti tragično. Propadanje vrtače nakon spuštanja razine podzemne vode u dolomitima u Far West Rund, doveo je do zatvaranja glavne željezničke pruge za putnički promet. Nakon akcije popravka i čekanja od oko godine dana, linija je proglašena sigurnom i ponovno otvorenom.

Zadnji događaj u ovoj kronici dramatičnih događaja je pojavljivanje vrtače 20 metara široke i 7 m duboke ispod željeznice blizu Bank-a- Vozač je uočio rupu prekasno da bi zaustavio vlak. Tri vagona su upala s tračnicama i dva putnička vagona su ostala visjeti poviše vrtače, putnici su pobjegli iz vlaka neozlijeđeni. Željeznička linija je ostala u upotrebi samo za prijevoz dobara, dok je prijevoz putnika bio preusmjeren. Konstantno održavanje, istraživačko bušenje, 24-satne patrole su izvodile željeznice, ironično, vrtača se pojavila samo osam dana nakon što je linija bila otvorena i za putnički prijevoz.

9.2. Problemi s krškim vapnencem u građenju TVA brana

Vlast u dolini Tennessee je napravila 21 veliku branu vapnenčanoj kamenoj podlozi u krški uvjeti su otkriveni na mnogima. Detaljni opis geologije ovih projekata je napisan u izvrsnoj knjizi *Geology and Foundation Treatment*.

Problematika temeljenja za neke novije projekte je sumirana Soderberg (1988.). Svi su slučajevi interesantni ali su 2 izabrana Kentucky brana i Brana velikih stlapova.

9.2.1. *Kentucky brana*

10 potencijalnih mjesta za Kentucky ranu su razmotrena i najbolji od njih kojemu je dopušten razvitak na zahtjevanoj dubini je prihvaćen. Kamena podloga, vapnenac Mississippi je prekriven s oko 30 metara aluvijalnih sedimenata. Krški oblici nađeni na

ovom mjestu su razvijeni na erozijskoj površini. Budući da se proširivalo na maksimalnoj dubini od 95 metara ispod površine na donjoj dubini od 1,5 km. Topljenje je djelomično intenzivno kad god su slojevi promjenili inklinaciju, zbog bliskih frakturiranja tih mjesta efektivno podjeljeno u temeljnoj stijeni u bloku. Fort Payne vapnenac, čvrsta stijena je prekrivena s rezidualnim tлом 65 metara debljine, dok na drugom mjestu je rezidualno tlo 18 metara debelo i prekriveno je s poroznom spužvastom glinom dobivenom iz potpunog otapanja Warrior vapnenca. Gledajući sve ovo rezidualno tlo i aluvij su bili problem za razvijanje ovog mjesta. Prilikom pregledavanja terena kamene podloge, otkriveno je da ima kaverni u gornjih nekoliko metara. I u bazi iskapanja je kontrolirano s stratigrafijom, da je vađenje nastavljeno dok nisu došli do određenog stratigrafskog nivoa. Kaverne velike širine su se razvijale duž pukotina budući da su pukotine bile vezane za određene slojeve.

Šupljine su nastajale po određenim ravninama slojeva. Šupljine dubine 65 metara i širine 16 metara su otkrivene, djelomično popunjene s rezidualnom glinom. Šupljine su kontinuirane po nalazima stijena i mnoga produženja put dolje i iznad granice iskopavanja. Topljenje po ravninama slojeva je intenzivno pa imaju malu količinu nestabilnih minerala. To izgleda ima veliku kontinuiranost i podslojevi veliku zaslugu u temeljenju.

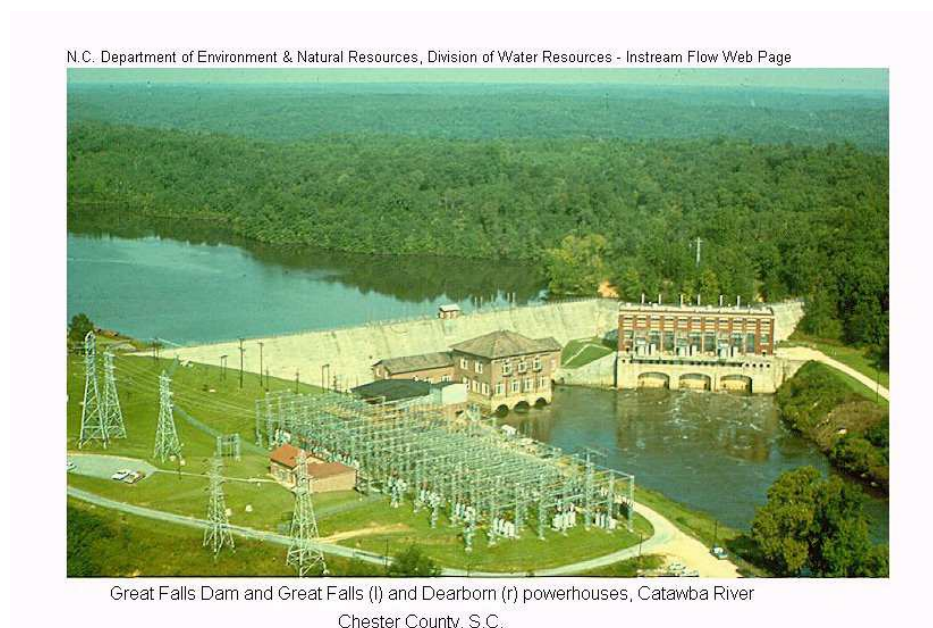
Velike šupljine su otvorene sa površinskim iskopima. Tada su te špilje začepljene i podignut je betonski zid. Zato je 36-48 rupa je probušeno da oslobode prostor rudarima koji su čistili ispunjeni materijalima. Poslije je taj prostor popunjavan s betonom i bušotine velikih promjera su se nastavile bušiti do nižih dubina sve dok se nije napravio kontinuirani zid koji dijeli brane prema osi.

Na najvećoj šupljini bušotine su bušene po kružnom planu da stvore podzemni luk. U nekim većim šupljinama bilo je nemoguće bušiti bušotine bez prethodnog asfaltiranja. Da dodadmo velike količine dodatnog asfalta završilo bi se kroz manje bušotine. Sveukupno više od 50 komada dijamantne krune ušenja i 2,3 km calyx bušotina je izbušeno. Volumen asfalta uglavnom, cement i voda, utoršeno je više od 20 000 m³.

9.2.2. Brana velikih slapova

Razvitak snage velikih slapova vraća nazad vodu u kopitastu krivinu Collings rijeke do tunela hraneći elektranu preko podjele 240 metara širine (slika 5).

Curenje iz rezervoara se razvilo po toj podjeli. Put curenja je kroz otopljene kanale ispod rezervoara, 14 metara debljine vapnenca. Curenje je svake godine raslo do 1925. godine, kada je brana napravljena 11 metara u vis, što je uzrokovalo pad od samo 4 do 6 metara. Usprkos tome $9,6 \text{ m}^3/\text{s}$ curenja je „zarobilo“ 10% kapaciteta elektrane i povećalo se za 1% po godini. Curenje je napravilo spektakularne kaskade na zidovima stijena.



Slika 5. Brana velikih slapova

Istraživanje rezervoara u to vrijeme pokazalo je dapoštoje 96 jesta izlaska, pomoću florescentne boje je korištena da prati puteve curenja. Izlasci vode su bili smješteni koncentrirani duž vrha antiklinale i na ravninama slojeva su se ispresjecali putevi pukotina. Istjecanje je zaustavljeno s asfaltom a rupe su začepljene s cementnim asfaltom. Taj asfalt program je dodjeljen za gornji dio Fort Payne formacije budući da je bilo jasno da donji dijelovi nalaza ne provode vodu.

9.3. Konstrukcije i sportski objekti poviše krškog mramora

Kampus Santa Cruz sveučilišta California je sagrađen na napunjenim morskim povišenim površinama zemlje ispod kojih su bile metamorfne stijene, uključujući proširujući gusti mramor. Mramor se okršio još prije 700 000 godina i krški uvjeti su očigledni od nazubljene površine i česte pojave depresija u kampusu. Asfaltiranje da se dobiju površine za igranje tijekom gradnje kampusa 1964-1965 je sakrila neke od tih pojavljivanja. U planiranju gradnje novog olimpijskog bazena, 16 bušotina je izbušeno u stijenu ispod mjesta, koja je otkrila mrežu otopljenih kanala na dubini od 15 metara ispunjenih s mekim saturiranim muljem. Budući da je kampus u seizmičkoj zoni, nije bilo interesantno istraživati te strukture, budući da su one otporne na potrese. Strana geološka studija je napravljena da zabilježi vrtače i cijelo mjesto je obuhvaćeno s 100 metara izvan kampusa. Otkrivene su srušene vrtače dubine i do 24 metra ispunjene s mramorom poviše kojeg se nalaze morske povišene površine zemlje do dubine od 8 metara. Skoro 100 bušotina je izvedeno, 72 u području bazena po točnoj mapi podzemne geologije.

Poprečni krajevi bazena su temeljeni na stijeni, ali dubina stijene i sredini bazena je bila 24 metra, s 20 metara mramornih naslaga, ima max. rupe u širini od 1,3 metara.

Strukturno projektiranje je dozvoljavalo premošćivanje ne više od 3 metra širine ispod bazena, na primjer u slučaju potresa cijelo područje bazena je bilo prezatrpano i zapunjeno s kompaktnim srušenim stijenama. Baza iskopa je da se prvo prijeđe s vrlo teškim uređajem za trešnju u cilju rušenja bilo kojih nestabilnih šupljina u tlu. Da bi se spriječilo curenje iz bazena iskopi bazena su pokriveni s geotekstilnom membranom ispod koje je bio kolektorski sistem.

9.4. Žbukana zavjesa na brani El Cajon, Honduras

Uski usjek kroz antiklinalu u krednom vapnencu tvorio je topografski dobro mjesto za 238 m. visoku, usku lučnu branu (Slika 6). Površina vapnenca je nastala u postkredno vrijeme, a krš se razvio dok su se miocenske vulkanske stijene zakopale u teren. Okršavanje je lokalizirano po četiri glavna diskontinuiteta. Kako se i moglo očekivati, krš je koncentriran na vrhu vapnenca točno ispod kontakta sa vulkanskim stijenama.



Slika 6. Brana El Cajon, Honduras

Istraživačke bušotine su otkrile da se kaverne proširuju. Ispucana površina penje se postepeno od 1% - 3% o da se sa svake strane korita rijeke. Mjesta oko brane se štite, tako da se pumpa visoko tlačna žbuka u injektirajuće rupe, po jednoj ili dvije linije, čineći tako određenu zavjesu. Da bi to mjesto zatvorili sa konvencionalnim vertikalnim zavjesama potrebno je uspješno izvesti teško dubinsko bušenje.

Prisutnost vulkanskih stijena samo 200 m. uzvodno gdje slojevi kanjona postaju blaži postoji mogućnost da se odvoji podzemni tok s povezivanjem žbukane zavjese sa vulkanskim tлом. To zahtjeva poseban oblik zavjese (oblik kade) čije je dno okrenuto uzvodno. Zavjesa je napravljena sa povezivanjem brojnih podzemnih galerija da presjeku vulkansko tlo i žbuku između njih. Galerije se onda pune betonom, ispod brane galerije leže jedna ispod druge stvarajući vertikalni zid. Nizvodno galerije nestaju i veza bušotina žbuke je horizontalna, stvarajući horizontalni zid. Bilo je potrebno 514 km. bušenja i 14 km. galerija za sve to izvesti., površina žbukane zavjese je oko 530 000 m² i trebalo je dvije i pol godine za izradu.

Dok su se galerije izrađivale otkriveno je mnogo špilja, koje su očišćene i betonirane. Jedna velika kaverna je otkrivena (oko 10 000 m³) tijekom istraživanja to je riješeno premještenjem pozicije „kade“ na drugo mjesto.

9.5. Problemi s gipsom ispod rezervoara

McMillan rezervoar, Novi Meksiko je napravljen 1893 god., ilustrira opasnost od topljena i kolapsa koji se može dogoditi kada je voda prisutna u formacijama gipsa. Lijeva strana rezervoara je greben od gipsa. Nedugo nakon što je rezervoar izgrađen, greben je počeo pucati, te su se javljale vrtače. 1909 napravljen je nasip paralelno s grebenom da izolira greben od vode iz rezervoara, to je u početku bilo neuspješno i nasip se morao produžiti. Curenje se je nastavilo, iako ne ozbiljno.

Burne je opisao problem na koji je naišao u blizini Cordell, Oklahoma. To je mala struktura visoka samo 11 m. koja je morala zadržati vodu iz rezervoara u slučaju kriznih situacija. Nakon što je nastupila poplava formirala se vrtača u bazenu i zarobila većinu vode, ta vrtača je rasla, a pojavljivale su se i druge. Istraživanje je potvrdilo postojanje šupljina ispod rezervoara od 6-7 m. I volumena 2000 m³. Popravak svega bi došao mnogo više nego cijena originalne konstrukcije.

9.6. Onečišćenje krških rezervoara Mount Gambier, Australia

Mount Gambier, grad od nekakvih 20 000 ljudi u južnoj Australiji leži djelom na trijaskom vapnencu ispod čega su slojevi gline i depoziti pješćenjaka i konglomerata. Glina ispod vapnenca čini vodenu barijeru i zadržava vodu poviše. Drugim riječima vodeni pritisak u pješćenjacima odgovara imaginarnoj vodenoj površini. Vapnenac na površini je porozan i okršen. Pa voda prolazi i kroz pore i kroz mrežu otopljenih pukotina i podzemnih galerija.

Na početku 20 stoljeća brojne tvornice sira i klaonice su odbacivali svoj otpad u postojeće kaverne pa je krški rezervoar i danas relativno zagađen. Kišnica se također drenirala kroz više od 350 drenažnih bunara, to je pridonijelo zagađenju, jer je kišnica koja je prolazila kroz krški vapnenac bila zagađena. Voda za piće se više ne uzima sa krškog vapnenačkog rezervoara nego iz dubljih slojeva pješćenjaka.