

SEIZMIČNOST POBUĐENA AKUMULACIJAMA

Aleksandar BOŽOVIĆ

REZIME

Seizmičke pojave pridružene punjenju akumulacija beleže se i proučavaju od 30-tih godina prošlog veka i bile su predmet kontroverznih rasprava. Naime, uzročna veza između efekata usporavanja novih akumulacija i pratećih seizmičkih pojava tumačena je ili osporavana na razne načine.

Međutim, opažanjem pratećih seizmičkih pojava tokom i posle punjenja novih akumulacija (preko stotinu prihvaćenih slučajeva) došlo se do ubedljivih tumačenja ove pojave i zaključaka o njihovoj prirodi. Preovlađuje mišljenje da je pobuđena seizmičnost odgovor već kritično napregnutih postojećih raseda na dodatno opterećenje i propagaciju porinih pritisaka koji nastaju tokom punjenja akumulacije i posle toga. Pa je stoga potrebno uzimati u obzir mogućnost pojave pobuđene seizmičnosti prilikom projektovanja svake visoke brane.

U ovom radu je izložena fenomenologija pobuđene seizmičnosti i procena rizika koji mogu nastati usled njene pojave, kao i prikaz karakterističnih slučajeva.

Ključne reči: akumulacije, pobuđena seizmičnost

1) UVOD

Problem seizmičkih fenomena pridruženih punjenju akumulacija razmatra se u inženjerskim krugovima i u široj zainteresovanoj javnosti od 1930 godine, kada su takvi fenomeni povezani sa punjenjem akumulacije Lake Mead (SDA) bili primećeni i razmotreni. Sledio je potom niz značajnih slučajeva sa visokim magnitudama i značajnim oštećenjima. Godine 1970 UNESCO je organizovao grupu eksperata radi razmatranja tog problema pa je održan niz sastanaka i dva simpozijuma. Tokom 13-tog Kongresa ICOLD-a (New Delhi, 1979, Q.51) taj problem je postavljen i diskutovan. U međuvremenu (a i do današnjeg dana), objavljen je niz publikacija i knjiga na ovu temu koja je i danas od

znatnog interesa, naročito kada se planiraju nove brane. U 1997 američko društvo za visoke brane (USSD) objavilo je značajan izveštaj, sumirajući sadašnje stanje poznavanja problema.

Skup fenomena koji se u ovom tekstu označava kao "Seizmičnost pobuđena akumulacijama" imao je različite nazive u raznum publikacijama i na različitim jezicima. Naziv "Indukovana seizmičnost" bio je (a i sada je) često korišten. Međunarodna komisija za visoke brane zvanično je prihvatila definiciju "Seizmičnost pobuđena akumulacijama" (RTS - Reservoir Triggered Seismicity) kao izraz koji najbolje odgovara prirodi pojave.

2) POJAVE POBUĐENE SEIZMIČNOSTI I RAZVOJ NJIHOVE PROCENE I INTERPRETACIJE

Prvi dokumentovani slučaj pobuđene seizmičnosti vezan je za akumulaciju Lake Mead (realizovanu izgradnjom brane Boulder, visoke 220 m), praćen od 1930 godine. Izvesno vreme to je ostao usamljen slučaj (iako je verovatno da je bilo i drugih SPA slučajeva, naročito na mikroseizmičkom nivou, koji su prošli neopaženo). Ali već krajem šezdesetih godina broj SPA pojava se umnožio a neke od njih su bile praćene ozbiljnim posledicama (Koina, Indija; Hsinfengkiang, Kina; Kremasta, Grčka) tako da je došlo do oštrog povećanja interesa za ovu pojavu.

Od samog početka, pojava je tretirana kao kontroverzna. Izvestan broj stručnjaka je smatrao neubedljivim da oslobađanje ogromnih energija, koje odgovaraju zemljotresima visokih magnituda, mogu nastati kao posledica relativno malih promena stanja napona na seizmogenim dubinama, usled punjenja akumulacije. U isto vreme, stvarno naponsko stanje (koje uključuje gravitacionu i tektonsku komponentu) i reološke osobine zemljine kore na tim dubinama, bile su i ostaju uglavnom nepoznate.

Problem je ipak ostao predmet trajnog interesa i studija, uglavnom zbog environmentalnog impakta i skopčanog rizika. Sa druge strane, broj brana koje su pokazivale pojave pobuđene seizmičnosti rastao je sa ukupnim brojem brana a osmatranje pobuđene seizmičnosti takođe se poboljšavalo sa vremenom. Tako je problem suštinski razjašnjen i danas preovlađuje shvatanje da je pobuđena seizmičnost fizički odgovor dela zemljine kore na punjenje akumulacije, kada se za to steknu izvesni specifični uslovi. Radi se o pobudi seizmičnosti, za koju su već nastali izvesni prirodni uslovi. A to znači da je uzročni rased koji može proizvesti oslobađanje seizmičke energije već napregnut do kritične granice tako da dodatni teret i propagacija pornih pritisaka usled punjenja rezervoara, može pobuditi oslobađanje seizmičke energije. Ovakva definicija ujedno znači da pobuđivanje usled punjenja akumulacije ne može povećati seizmički potencijal i seizmički rizik, ukoliko je seizmički potencijal na mestu brane valjano procenjen. To bi se moglo zamisliti ukoliko bi dejstvo težine vode u akumulaciji bilo u stanju da bitno poveća oslobađanje seizmičke energije. Međutim porast ukupnog energetskog potencijala usled punjenja akumulacije je praktično beznačajan u poređenju sa ukupnim oslobađanjem seizmičke enerije. U regionima visoke istoriske seizmičnosti, postoje izgledi da se kontrolni zemljotres može pouzdano odrediti na bazi dostupnih podataka. U regionima niske istoriske seizmičnosti, može se desiti da upravo neotektonske studije potrebne za određivanje aktivnih raseda koji mogu biti pobuđeni, definišu kontrolni zemljotres, koji ne bi mogao biti predviđen ukoliko se u obzir uzmu samo raspoloživi istorijski podatci.

Prethodni stav jasno podvlači osnovni zahtev za pojavu pobuđene aktivnosti: postojanje aktivnog raseda napregnutog blizu granice sloma, raspoloživog za efekte pobuđivanja.

Iz prethodnog izlaganja sledi da za slučaj korektno određenog projektnog zemljotresa, pobuđena seizmičnost ne može izazvati povećanje seizmičkog rizika za branu koja je u pitanju. Međutim seizmički rizik se zaista može povećati za postojeće konstrukcije u zoni uticaja akumulacije ili za pridružene objekte brane, ukoliko nisu projektovane da prihvatljivo podnesu kontrolni zemljotres.

Prethodno izlaganje pokazuje da seizmičnost pobuđena akumulacijama predstavlja koncept od stalnog interesa za projektovanje i osmatranje brana.

3) UČESTALOST SEIZMIČNOSTI POBUĐENE AKUMULACIJAMA

Ukupan broj SPA slučajeva teško je znati sa sigurnošću, usled teškoća u dobijanju podataka dovoljne pouzdanosti i zbog kompleksnosti same pojave. Ipak, broj prihvaćenih slučajeva raste sa vremenom. U 1983 USGS (Geološka služba Sjedinjenih Država) objavila je banku podataka o SPA, navodeći 66 prihvaćenih slučajeva (Perman, Packer, Coppersmith i Kneupfer, 1983). Gupta u svojoj knjizi (1992) navodi sličan broj slučajeva. USSD u izveštaju o SPA (1997) pokazuju 39 slučajeva akumulacija koje se često navode povodom nastalih pojava SPA (Ova lista je reprodukovana kao Tabela1).

Interesantan skupni prikaz dat je u grafiku rasturanja (prema stanju 1982 godine, Beacher and Keeney 1982) prikazanom na slici 1. Preuzet je iz publikacije USSD [31].

Ako proverimo broj SPA sa magnitudama 6,0 i većih, nalazimo četiri slučaja, od kojih su tri skopčana sa značajnim oštećenjima brane i okolnih konstrukcija (Koina, Kremasta i Hsingfengkiang). Prema Svetskom registru brana, ukupan broj brana viših od 100 m je nešto iznad 400. Ako povežemo slučajeve visokih magnituda dobijamo učestalost 4/400 a to nije zanemarljiva vrednost.

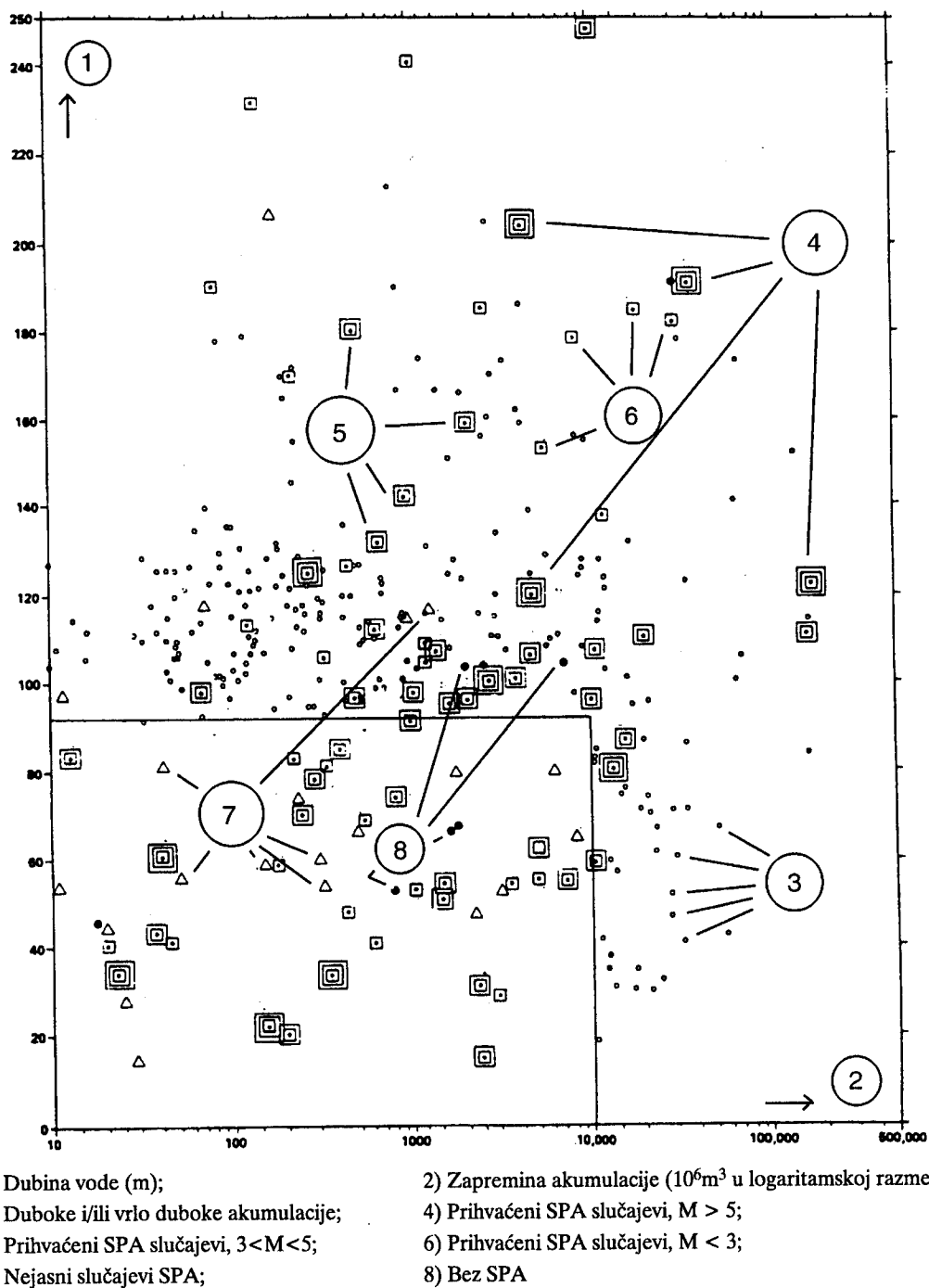
Kako je ranije izneseno, seizmički potencijal na određenoj lokaciji određen je tektonskim uslovima i ne prelazi tu granicu u SPA slučajevima. Međutim vremenska sekvenca seizmičkih pojava može biti promenjena i to može da utiče na analizu rizika. Ipak, savremene visoke brane treba da se uspešno odupru bar magnitudi 6,5 u slučaju lokalnih zemljotresa (nije bilo magnituda većih od 6,3 u dosada poznatom fondu SPA pojava) bez kritičnih oštećenja. Međutim razne građevine u blizini brane a i neke od pripadnih konstrukcija brane mogu biti izložene značajnom riziku usled SPA pojava, pa treba da u tom smislu budu proverene.

AKUMULACIJE ČEŠĆE CITIRANE KAO SLUČAJEVI SPA

Akumulacija	Zemlja	Dubina m	Zapremina	Magnituda ili Intenzitet	Primedba
Akosombo	Ghana	109	148,000	MMI V	1
Almendra	Spain	185	2,649	3.2	1
Aswan	Egypt	90	160,000	5.2	3
Benmore	New Zealand	96	2,040	5.0	3
Blowering/Taibingo	Australia	142	2,559	3.5	3
Camarillas	Spain	43	37	4.1	3
Canelles	Spain	132	678	4.7	1
Capivara	Brazil	60	10,500	4.4	1
Cenajo	Spain	97	472	4.2	4
Danjiangkou	China	97	16,000	4.7	4
El Grado	Spain	85	400	MMI IV	1
Eucumbene	Australia	106	4,761	5.0	3
Furnas	Brazil	111	22,950	MMI V	4
Grandval	France	78	292	MMI V	1
Hoover	USA	191	36,703	5.0	3
Jocassee	USA	107	1,431	3.8	3
Kariba	Zambia	122	160,368	6.25	2
Kastraki	Greece	91	100	4.6	2
Khoa Laem	Thailand	80	7,000	4.5	2
Koyna	India	100	2,780	6.3	3
Kremasta	Greece	120	4,750	6.3	3, 5
Kurobe	Japan	180	199	4.9	1
Manicouagan 3	Canada	96	10,423	4.1	2
Marathon	Greece	60	41	5.75	4
Monteynard	France	125	275	MMI VII	4
Mossyrock	USA	124	1,957	4.3	4
Nurek	Tajikistan	285	11,000	4.5	2
Oroville	USA	204	4,400	5.7	2 or 3
Paraibuna/Paraitinga	Brazil	102	4,740	3.2	4
Piastra	Italy	84	13	MMI V	4
Preve Di Cadore	Italy	98	69	MMI V	4
Porto Columbia/ Voltagrande	Brazil	50	3,760	5.1	4
Pukaki	New Zealand	108	10,500	4.6	4
Shenwo	China	75	790	4.8	4
Swift	USA	116	932	5.0	4
Srinagarind	Thailand	133	17,745	5.9	3
Vouglans	France	112	605	4.4	4
Hsingsfengkiang	China	105	13,896	6.0	3
Zhelin	China	62	7,170	3.2	4

- Primedbe: 1. Bez lokalne seizmičke studije
 2. Seizmička studija raspoloživa pre i posle usporavanja
 3. Seizmička studija raspoloživa posle usporavanja
 4. Nepoznat status seizmičke studije
 5. Glavni SPA idar dublji od 20 km

Tabela 1. Lista često citiranih SPA slučajeva
 (prema USSD, Reservoir Triggered Seismicity. 1997) [31]



Slika 1. Dijagram rasturanja SPA slučajeva (prema USSD, Seizmičnost pobuđena akumulacijama, 1997) [31]

4) OSOBINE SEIZMIČNOSTI POBUĐENE AKUMULACIJAMA

Istraživači SPA pojava formulisali su početkom sedamdesetih godina, niz osobina koje su skupčane sa pojavama seizmičnosti pobuđene akumulacijama.

U osnovi, SPA je pojava seizmičnosti koja se javlja jednovremeno sa efektima punjenja akumulacije. Seizmički potencijal uzročnih raseda koji daju SPA pojave, pripremljen je i postoji veoma dugo vreme pre epizode pobude o kojoj govorimo i veličina tog potencijala je nezavisna od pojave pobude. Međutim vremenski gledano, SPA pojave su vezane za punjenje akumulacije, što možda utiče i na amplitudno-frekventni sastav pri oslobađanju pobuđene seizmičke energije. U slučajevima ovako kompleksnih prirodnih pojava nije moguće odrediti oštro definisane uzročne veze i jasna pravila po kojima se odvijaju. Samo se razvojni pravci mogu razaznati i manje ili više uspešno interpretirati.

Pobudni činioci stavljanja akumulacije pod uspor su dodata težina usporene vode i propagacija pornih pritisaka iz akumulacije. Glavna razlika između pomenutih uticaja je u tome što dodatna težina izaziva dodatne napone odmah posle aplikacije, dok propagacija pornih pritisaka zahteva vreme, ponekad godine, dok se ne postigne pun efekat.

Usled nemogućnosti da se direktno slede zbivanja u žarištu u njihovoj punoj kompleksnosti, razumljivo je što je niz osobenosti istaknut i sortiran, uglavnom u cilju dijagnostičke interpretacije.

U većem broju SPA slučajeva osmotreni intenziteti oštro opadaju sa rastojanjem od epicentra, koji se obično gomilaju oko akumulacije. Ova okolnost, kao i činjenica da u izvesnom broju SPA slučajeve prate teluriski zvuci, ukazuju na pliću aktivnost.

U najvećem broju slučajeva aktivnost počinje uskoro posle stavljanja pod uspor i raste sa vodostajem u akumulaciji, a po pravilu se obnavlja posle iznenadnih promena nivoa akumulacije.

Postoji trend koji ukazuje da duže vreme koje protekne između početka punjenja akumulacije i maksimalnog pobuđenog potresa povlači za sobom i veći intenzitet tog potresa. Ova tendencija nije posve jasna. Međutim novije interpretacije (Simpson et alia, 1988) tumače da brzo pobuđeni efekti nastaju usled dodate težine vode

dok je odložena pobuda skupčana sa dejstvom pornih pritisaka, kojima treba duže vreme za propagaciju. U nekim slučajevima, veće magnitude se pobuđuju na većim dubinama akumulacije, što se uklapa u navedeni trend.

Primećeno je takođe da je odnos magnituda maksimalnog pobuđenog potresa i najvećeg pratećeg potresa veći nego u slučajevima koji nemaju veze sa punjenjem akumulacija.

Bilo je predloženo da se u dijagnostičke svrhe koristi "b" vrednost iz odnosa učestalost/magnituda ($\log N = a - bM$), pri čemu veća "b" vrednost ukazuje na pobuđenu seizmičnost. Međutim ovakva upotreba "b" vrednosti je kontroverzna.

Smatra se da je više SPA pojava povezano sa uzročnim rasedima normalnog tipa ili sa rasedanjem duž pravca pružanja, nego u slučaju reversnih raseda. Postoje pouzdane mehaničke postavke koje podržavaju ovo mišljenje.

Dok napred pobrojane osobenosti pretstavljaju interes i treba ih dalje rasvetliti, ne može se tvrditi da SPA događaji imaju bazično različit mehanizam sloma u odnosu na tektonske događaje. U osnovi, svaki zemljotres je izazvan pomakom duž uzročnog raseda, bio on pobuđen ili čisto tektonski. Stoga i ne treba očekivati bitne razlike između ovih događaja.

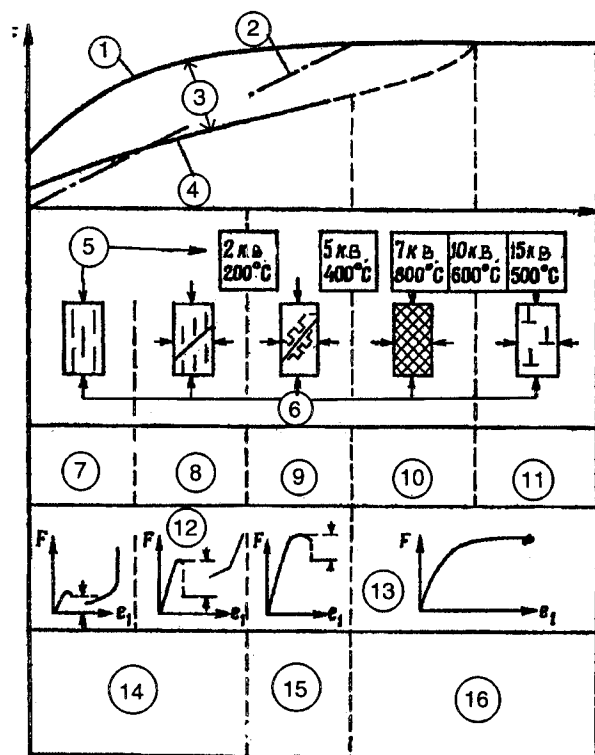
5) MEHANIZAM SEIZMIČNOSTI POBUĐENE AKUMULACIJAMA

5.1) Reologija materijala zemljine kore

Seizmičnost pobuđena rezervoarima iskazuje se obično relativno plitkim zemljotresima. Emisija seizmičkih udara zavisi od reoloških osobina zemljine kore i od njene interakcije sa tektonskim silama, kako za slučaj čisto tektonske seizmičnosti tako i u slučaju seizmičnosti pobuđene akumulacijama, pošto je u oba slučaja presudni faktor tektonska priprema događaja.

Glavna teškoća u osaznavanju fokalnog mehanizma seizmičkih emisija energije leži u činjenici da nam reologija materijala zemljine kore na seizmogenim dubinama, nije poznata na osnovi direktnih merenja. A slabi su izgledi da će se takva merenja moći preduzimati u predvidljivoj budućnosti, ukoliko su uopšte moguća. Stoga je pri modeliranju i analiziranju zbivanja u žarištima potresa, jedini izvodljivi pristup upotreba (uz

ekstrapolaciju) rezultata laboratorijskih merenja, pod visokim triaksijalnim naponima i pri visokim temperaturama. Postoje rezultati niza ovakvih opita (Brace, Beyerlee, Stesky, Handin i drugi). Jedna predstava reoloških osobina seizmogenih delova zemljine kore, bazirana na opisanom pristupu, data je od strane Nikolajevskog (1982) i pokazana je u ovom izveštaju kao slika 2. Treba shvatiti da ova predstava ima ekstrapolovani i kvalitativni karakter, ali je sasvim pogodna da se uoči slika verovatnog ponašanja materijala zemljine kore na seizmogenim dubinama.



- 1) Anvelopa sloma; 2) Suvo trenje; 3) Zona dilatancije; 4) Granica elastičnosti; 5) Granit; 6) Mehanizam sloma; 7) Vertikalne frakture; 8) Kose frakture; 9) Lokalizovane deformacije; 10) Pseudo-plastičnost; 11) Plastičnost; 12) Pad napona; 13) Bez naponskog pada; 14) Krti lom; 15) Oblast proklizavanja; 16) Plastični lom

Slika 2. Kvalitativna predstava reoloških osobina zemljine kore na seizmogenim dubinama (Nikolajevski, 1982) [22]

Gornji deo zemljine kore sastoji se generalno od krtih i ispucalih stena, sve do granice Moho. Takođe se smatra da voda (a možda i vodena para) cirkuliše u pukotinama i prslinama. Ovo poslednje je važna

osobina, koja se potvrđuje prisustvom vode u dubokim rudnicima i tunelima, ali je bez potvrde direktnim merenjima na seizmogenim dubinama. Smatra se ipak da je takva cirkulišuća voda prisutna do dubine od 20 km, a to je dovoljno za naša razmatranja. Neki istraživači smatraju da voda i para može cirkulisati sve do granice Moho (Nikolajevski, 1982). Ispod granice Moho temperature i pritisak rastu a stenoviti materijal prelazi u plastično stanje, što znači u vodonepropusnu sredinu. Postoje mnoga odstupanja od ovako uproštene slike, ali je od primarnog interesa činjenica da se seizmički fenomeni realizuju u krtom i ispucalom delu zemljine kore u kojoj cirkuliše voda i da se ovakve pojave gase u dubljij plastičnoj masi.

Kako je u slici 2 prikazano, razlike u reološkom ponašanju materijala kore zavise od odnosa (p/t) normalnih i smičućih napona i od temperature. U donjem delu slike 2 pokazana je granica elastičnog ponašanja materijala kore a u gornjem delu anvelopa sloma koja ograničava oblast. Između ove dve krive je oblast u kojoj nastaje parcijalan slom materijala kore, poznat kao fenomen dilatancije. Prirodno, ovo je samo šematska predstava. Ustvari kada napon u stenama pređe otprilike plovinu čvrstoće i pri umerenim ograničavajućim pritiscima u steni se javlja značajna dilataciona deformacija - dilatancija. Ovakva formulacija je uvedena krajem 19. veka (Reynolds, 1985) i primenjivala se prvo na granularne materijale izložene prinudnim deformacijama. U slučaju materijala zemljine kore, dilatancija nastaje kada smičući naponi dovedu do ireverzibilne zapreminske deformacije, izazivajući značajan neelastični porast frakturacione poroznosti materijala.

U slici 2 se može videti da su pri manjim ograničavajućim naponima, nastale prsline subvertikalne a deformacije imaju kontinualni karakter.

Pri većim ograničavajućim naponima javljaju se kose glavne prskotine a deformacija se vrši skokovito, uz pojavu pada napona.

Pri naponima i temperaturama iznad 2 kilobara i 400°C, javlja se lokalizacija frakture. Ona je praćena uzastopnim proklizavanjima i parcijalnim padovima napona. Poznata je kao "stick-slip" fenomen, kada postoji kočenje i reaktivacija proklizavanja duž frakture sloma.

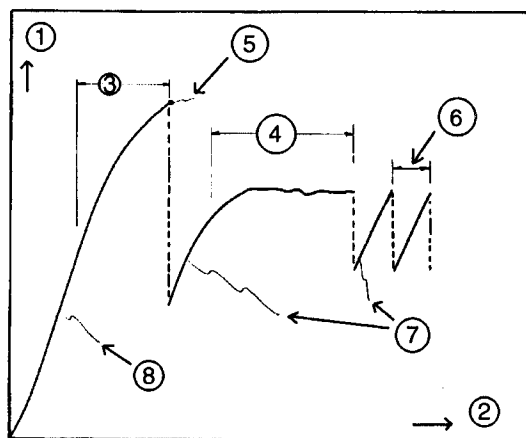
Ovakva reološka slika ograničena je pritiskom od 5 kilobara i temperaturom od 400°C. Posle ove granice

nastupaju plastične deformacije i jednolično tečenje, što znači da su dalje seizmičke pojave onemogućene.

Opisane pojave odvijaju se u prisustvu vode koja cirkuliše kroz prskotine a to znači u prisustvu pornih pritisaka koji uslovljavaju efektivne napone i regulišu čvrstoću na smicanje.

Izložena kvalitativna reološka slika je naznačena i podržana uspešnim laboratoriskim ispitivanjima (W.F. Brace, 1974; C. Kisslinger, 1976; Beyerlee, 1976; Handin et al., 1963; Stesky et al., 1976). Specijalni interes za ovu materiju predstavljaju opiti sa simuliranjem pritisaka i temperatura koje preovlađuju u gornjem delu zemljine kore, što znači nekoliko kilobara i nekoliko stotina Celziusovih stepeni.

Kvalitativno predstavljanje pojava dobijeno putem ovih opita dato je i sl. 3. U vidu se imala simulacija seizmičkih udara. Seizmički udar odnosno energetska emisija je posledica iznenadne nestabilnosti u zemljinoj kori, gde se uzročni naponi i deformacije lagano akumuliraju tokom dugog perioda. Na sl. 3 data je evolucija triaksijalnog opita pritiska pod pritiscima i temperaturama odgovaraju seizmogenim slojevima zemljine kore.

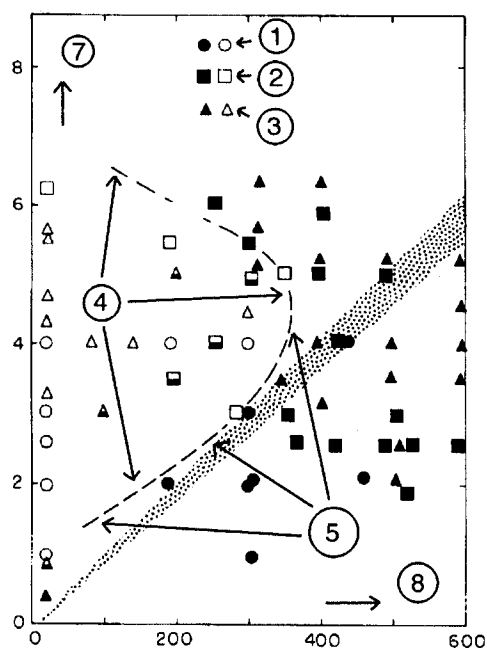


1) Smičući napon; 2) Skraćivanje; 3) Rast pukotina, dilatacija; 4) Stabilno klizanje; 5) Frakturacija; 6) Proklizavanje; 7) Rased zakočen; 8) Elastično ponašanje

Slika 3. Generalizovano ponašanje stene pri konfiniranoj kompresiji a pod uslovima koji vladaju na seizmogenim dubinama (prema F.W. Brace, 1974) [6]

Posle početne zone linearnih deformacija nastaje dilatancija sa porastom frakturisanja. Zatim nastaje krti lom duž kose frakture uz odgovarajući pad napona. To predstavlja prvi, glavni udar, koji može biti praćen stabilnim klizanjem (zavisno od naponsko /temperaturne kombinacije) ili sukcesivnim proklizavanjem (stick-slip fenomen). Pošto seizmički udari, praktično bez izuzetka nastaju po postojećim rasedima, ovaj drugi deo opita je značajan pošto će sekvenca naknadnih seizmičkih udara u najvećem broju slučajeva slediti stick-slip model.

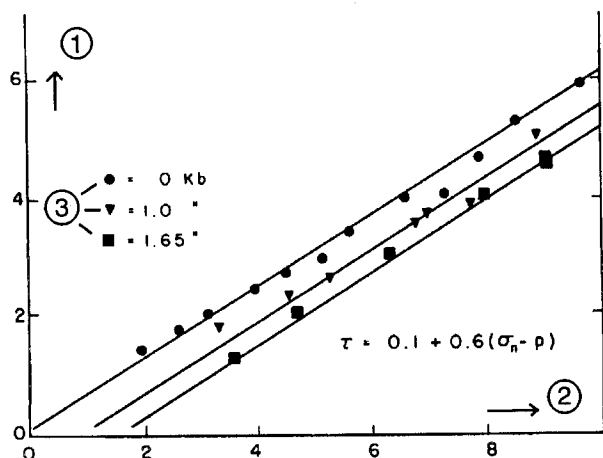
Rezultati detaljnog laboratoriskog ispitivanja uslova koji kontrolišu nastajanje sukcesivnog proklizavanja dati su u sl. 4. Vidi se da sukcesivno proklizavanje nastaje pri relativno visokim pritiscima a pri relativno nižim temperaturama. Ceni se da pod uslovima koji preovlađuju u zemljinoj kori, pojava uzastopnog proklizavanja može da se javi do dubina od 20 km.



1) Prerezani granit; 2) Rased u granitu; 3) Rased u gabru; 4) Proklizavanje; 5) Stabilno klizanje; 6) Temperatura °C; 7) Naponi Kb

Slika 4. Stanje klizanja pod uslovima trenja u funkciji pritiska i temperature (Prema Brace i Beyerlee, 1970; Stesky et al., 1974) [30]

Od daljeg interesa je provera da li princip efektivnih napona važi za slojeve na seizmogenim dubinama. Rezultati laboratorijskih opita (slika 5) potvrdili su očekivano ponašanje pod visokim pritiscima (Beyerlee, 1976).



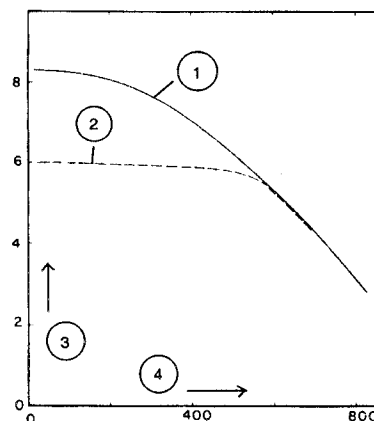
- 1) Smičući napon (Kb); 2) Normalni napon (Kb);
3) Porni pritisak

Slika 5. Otpornost na trenje peščara pod promenljivim pornim pritiscima (Beyerlee, 1966, prema Brace, 1974) [6]

Jedna od interesantnih posledica dilatancije jeste (ukoliko je gradijent pomeranja tokom dilatancije dovoljno visok) da prouzrokuje pad pornih pritisa pa ukoliko proviranje ne može da zasiti i održava pod pritiskom novonastale dilatancione prskotine, dolazi do pojačanja stene usled porasta efektivnih napona. Naravno to je prolazni fenomen koji može odigrati ulogu u pojavi brzinske anomalije i njenog kasnijeg nestanka (v. slučaj brane Hsingfengkiang).

Čvrstoća materijala zemljine kore takođe je zavisna od temperatura koje vladaju na seizmogenim dubinama. Opšta posledica porasta temperature je sniženje smičuće čvrstoće kore i njenih karakteristika trenja. Sl. 6 pokazuje rezultate opita na granitima pod visokim pritiskom i temperaturom. Vidi se da u zoni od interesa za SPA pojave, porast temperature praktično nema uticaja na trenje a ima sasvim ograničen uticaj na

napon sloma. To praktično znači da porast temperature od nekoliko stotina stepeni neće imati bitnog uticaja na ponašanje materijala zemljine kore (naravno imajući u vidu granit i slične materijale, formirane pri visokim temperaturama).



- 1) Linija loma; 2) Linija trenja; 3) Max smičući naponi; 4) Temperatura °C

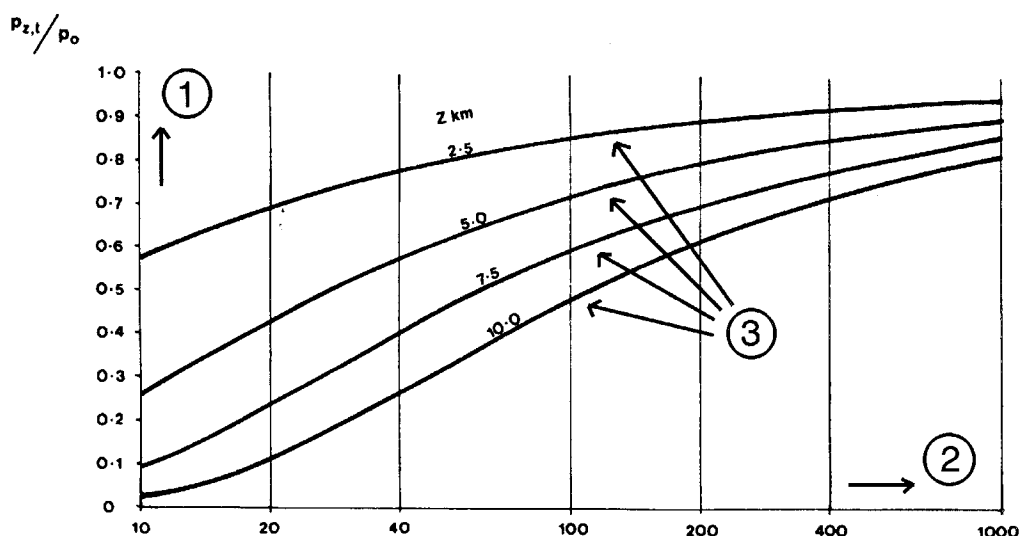
Slika 6. Uticaj temperatura na pojavu loma i na trenje u granitima (Stesky et al., prema Brace 1974) [6]

5.2) Vreme difuzije pornih pritisa

Porni pritisak u materijalima zemljine kore i varijacije ovog pritiska usled punjenja akumulacije imaju direktnog uticaja na stabilnost zemljine kore usled promene efektivnih napona.

Posle porasta pornog pritiska blizu površine, usled punjenja akumulacije, počinje difuzija porasta pornih pritisa u dubinu slojeva zemljine kore. Potrebno je vreme za takvu difuziju, zavisno od vodopropusnosti i specifičnog kapaciteta stena koje su u pitanju.

Za jednodimenzionalni problem difuzije pornih pritisa postoji analitičko rešenje (D.A. Howels, 1976). Vreme potrebno da se na raznim dubinama dostignu pritisci koji deluju u blizini površine pokazani su na sl.7 (dijagrami su dati za osrednjene vrednosti vodopropusnosti i specifičnog kapaciteta stena).



1) Odnos dubinskog i pripovršinskog pritiska; 2) Dani; 3) Propagacija dubinskog pornog pritiska

Slika 7. Vreme porasta do površinskog pritiska na raznim dubinama stene (Howells, D.A., 1976) [13]

Vidi se da vreme porasta pornog pritiska do pripovršinskog, na dubini od 2,5 km iznosi oko sto dana, dok je za veće dubine potrebno više stotina dana.

Prikazana informacija ima kvalitativan karakter i ukazuje na vremensko zaostajanje promena efektivnih napona. Ali realni, trodimenzionalni, nehomogeni i anizotropni uslovi mogu značajno izmeniti pokazanu kvalitativnu procenu. To u isto vreme znači da bi detaljniju analizu difuzije za realistične uslove bilo teško praktično opravdati.

Prethodna objašnjenja mehanizma seizmičnosti pobuđene akumulacijama, baziraju se na radu brojnih naučnika i istraživača, na specijalnim laboratoriskim ispitivanjima i na osmatranju brojnih akumulacija koje su pokazivale znake pobuđene seizmičnosti. Može se reći da je pojava seizmičnosti pobuđene akumulacijama, danas prihvaćena kao odgovor izvesnog broja akumulacija na punjenje vodom. No uprkos činjenice da postoji širok konsensus prihvatanja kvalitativne interpretacije ove pojave (interakcija prirasta težine vode i propagacije pornih pritisaka, sa prethodno postojećim i preovlađujućim poljem tektonskih napona) ipak ostaje činjenica da je direktno poznavanje uslova na seizmogenim dubinama, ekstremno retko. Za neke ključne faktore stabilnosti (kao što je prethodno postojeće stanje napona duž uzročnih raseda izloženih

efektima pobude) ono praktično ne postoji. Samo u slučaju brane Monticello vršeni su opiti i uzimanje uzoraka na dubinama do 2 km a šanse za vršenje sličnih opita u većem obimu smatraju se sasvim neverovatnim, zbog skopčanih teškoća i koštanja. Tako modeliranje pobuđenih pojava ostaje bez validacije preko direktnih ispitivanja na seizmogenim dubinama, a izgleda da ce ta okolnost ostati kao konstantna odrednica problema. U takvoj situaciji nije čudo da traju izvesne kontroverze među ekspertima na ovom polju. Osmatranje pobuđenih pojava i iscrpna studija neotektonskih uslova daju najbolje šanse za unapređenje naših znanja o SPA.

6) EFEKTI PUNJENJA AKUMULACIJA I POBUĐENA SEIZMIČNOST

Punjenje akumulacije posle izgradnje brane izaziva gravitaciono polje napona koje se odmah superponira na postojeće stanje napona (gravitaciono i tektonsko). Polje pornih pritisaka se naknadno propagira u dubinu, postepeno smanjujući postojeće efektivne napone.

Potrebno je naglasiti da primarnu ulogu u nastajanju SPA fenomena igra postojeće polje tektonskih napona i pridruženi sklop raseda. Da li će doći do pojave pobuđene seizmičnosti ili neće, zavisi od interakcije ovog primarnog polja i rasednog sklopa sa efektima

punjenja akumulacije. Pošto stavljanje pod uspor aplicira relativno male dodatne efekte na seizmogenim dubinama (u odnosu na tektonske sile i naprezanja koje su u igri), jasno je da se radi o svojevrsnom mehanizmu okidača. Taj mehanizam može biti efikasan samo ako je postojeće tektonsko polje već stvorilo marginalne uslove stabilnosti duž uzročnih raseda, koji se onda aktiviraju kao pobuđeni seizmički udari.

Duge diskusije su se vodile oko dileme da li dodatna težina usporene vode i/ili propagacija pratećih pornih pritisaka zaista igraju ulogu agenata-okidača. Pre no što se detaljnije razmotri taj problem, korisno je pobrojati glavne faktore koji kontrolišu pobuđenu seizmičnost:

- Postojeće stanje tektonskih napona duž uzročnih raseda. Od interesa je znati tektonski režim i tipove raseda (normalni, duž pružanja ili reversni) i proceniti koliko bliski slomu mogu takvi uzročni rasedi biti. Najbolja indikacija u tom pogledu je postojanje (ili nepostojanje) kvartarnog rasedanja u zoni uticaja akumulacije. To traži dobro zasnovanu i sprovedenu neotektonsku studiju pomenute oblasti. Takve studije su presudne za kvantificiranje SPA rizika.
- Geološki i hidrogeološki uslovi. Sistemi raseda i njihova lokacija kao i procena vodopropusnosti duž tih raseda i oko njih. Mehaničke i hidrauličke osobine stena (čvrstoća, otpornost na trenja, poroznost i vodopropusnost), varijacije nivoa podzemnih voda i mogućnost komunikacije sa usporenim vodom.
- Veličina i oblik akumulacije. Važna je dubina (u vezi pornih pritisaka) i zapremina (u vezi dodatne težine vode) a takođe i vremenska istorija varijacija nivoa u akumulaciji ili procena tih varijacija.

Kompleksna interakcija pobrojanih elemenata uslovljava da li će doći ili neće, do pojave seizmičnosti pobuđene akumulacijama. Vodeći računa o prirodi komponenata problema, jasno je da se kompletna, rigorozna i proverljiva analiza teško može izvršiti. Koncept da dodatna težina akumulisane vode može izazvati povećanje smičućih napona i da dodatni porni pritisaci mogu smanjiti čvrstoću na smicanje redukujući efektivne normalne napone, široko je prihvaćen. Ukoliko su uzročni rasedi već kritično napregnuti logično je smatrati da napred pomenuti faktori mogu pobuditi seizmičku aktivnost, pridruženu punjenju akumulacija. Kada se uzme u obzir uticaj porasta

pornih pritisaka na stabilnost raznih tipova raseda, vidi se da u slučajevima normalnog rasedanja i rasedanja po pružanju porni pritisaci pomeraju reprezentativni Morov naponski krug bliže anvelopi sloma. Drugim rečima opada otpornost na smicanje, eventualno i preko granice sloma, kada nastaje pobuđeni seizmički udar. Suprotna tendencija je prisutna u slučaju reversnih raseda. Ovakav zaključak je čvrsto podržan činjenicom da je najveći broj SPA slučajeva povezan sa normalnim rasedima i rasedima koji se pomeraju po pravcu pružanja.

Veliki i sofisticirani trodimenzionalni modeli primenjivali su se radi određivanja deformacija pod dejstvom težine akumulacije (Westergard i Adkins, za akumulaciju Mead) i naročito radi određivanja odgovora seizmogenih slojeva na propagaciju pornih pritisaka i naponske promene, kako po dubini tako i po vremenu (Bell i Nur - slučaj brane Oroville, 1978). Ovaj i slični radovi predstavljaju vredne napore. Ipak su njihovi autori zaključili da su potrebna dalja terenska istraživanja radi definisanja ključnih parametara potrebnih u cilju prihvatljive validacije (merenje pornih pritisaka i tektonskih napona na seizmogenim dubinama, raspored vodopropusnosti po celom domenu modela i određivanje čvrstoće materijala kore na seizmogenim dubinama). Ovakve podatke trebalo bi pribaviti merenjima in situ. Međutim izgledi za uspešno izvršenje takvih opita su magloviti, ako ne i sasvim nikakvi.

Pri takvom stanju, projektanti brana su primorani da procene rizik koji nastaje za brane, pripadne objekte i okolne konstrukcije, na bazi postojećeg poznavanja stvari. Relativno velik broj dokumentovanih SPA slučajeva doveo je do konsensusa da su to realistički odgovori na punjenje akumulacija. Najbolji pristup za slučaj svake nove brane je da se proverí (putem neotektonskih studija) postojanje raseda u blizini brane i akumulacije i da se proceni koji seizmički potencijal može biti pripisan (Wells & Coppersmith, 1994) svakom kandidatu. Pored analize istoriske seizmičnosti, ovakve neotektonske studije treba sprovoditi za svaku visoku branu (naročito za brane klase 100 m visine ili više). U principu, kompletna studija seizmičkog rizika za neku branu automatski pokriva i SPA slučajeve, pošto se radi o istom seizmičkom potencijalu, koji je tektonske prirode. U slučaju ograničenih istoriskih podataka, neotektonska studija može da uslovi kontrolni projektni zemljotres na bazi razmatranja usmerenih na SPA. Po pravilu, moderne brane treba da podnesu seizmičnost pobuđenu akumulacijom, bez

mnogo problema. Najveća SPA magnituda koja je do danas zabeležena iznosi 6,3 (Koina, Kremasta). Ali neki pridruženi objekti ili okolne konstrukcije, mogu zahtevati specijalnu pažnju.

Relativni impakt SPA pojava na brane i druge konstrukcije u zoni uticaja tih pojava, zavise od stepena tektonske aktivnosti oblasti u kojoj se nalazi brana. Ukoliko je to stabilna oblast sa niskim gradijentom tektonskih deformacija, prosto neće biti nikakvih SPA pojava. Ukoliko je pak brana postavljena u tektonski aktivnu oblast sa visokim gradijentima tektonskih deformacija i jakom ambijentalnom seizmičnošću, može biti teško da se uopšte uoče specifične SPA pojave. Najviši relativni impakt nastaje u oblastima gde nema preteranih tektonskih deformacija a manifestacija prirodne seizmičnosti je relativno niska. Tada se efekti dodatne težine i propagacije pornih pritisaka, ako su dovoljni da pobude značajniju seizmičnost, reljefnije uočavaju. Najviše upečatljivih SPA slučajeva pripada takvim oblastima umerenih tektonskih manifestacija.

7) TIPIČNI SLUČAJEVI SEIZMIČNOSTI POBUĐENE AKUMULACIJAMA

Tačan broj SPA slučajeva nije poznat sa sigurnošću, pošto niz manje upečatljivih slučajeva nije zabeležen a opet neki od diskutovanih slučajeva nisu šire prihvaćeni kao prave SPA pojave. Broj prihvaćenih slučajeva kreće se negde između 40 i 100. Slučajevi brana Koina, Kariba, Kremasta i Hsingfengkiang imaju magnitudo 6,1 - 6,3, što do danas predstavlja maksimalne SPA magnitudo. Niz značajnih i uglavnom prihvaćenih slučajeva pokazani su u tabeli 1 a širi uzorak je ocrtan u grafiku rasturanja sl.2.

Pun pregled i prezentacija poznatih slučajeva bio bi vredan poduhvat. Međutim takav obuhvatan pregled nije raspoloživ. Stoga su prikazana tri jasna i karakteristična slučaja sa različitim ishodom (SPA pojave u tim slučajevima kreću se od veoma jakih do nikakvih). Odabrani slučajevi dobro odražavaju raspon mogućih ishoda koji se mogu očekivati kada se razmatraju slučajevi mogućih SPA uticaja. Odabrana su sledeća tri slučaja:

- Brana Hsingfengkiang u Kini, kao predstavnik velike pobuđene aktivnosti koja je izazvala jake lokalne zemljotrese, značajno oštetivši branu.

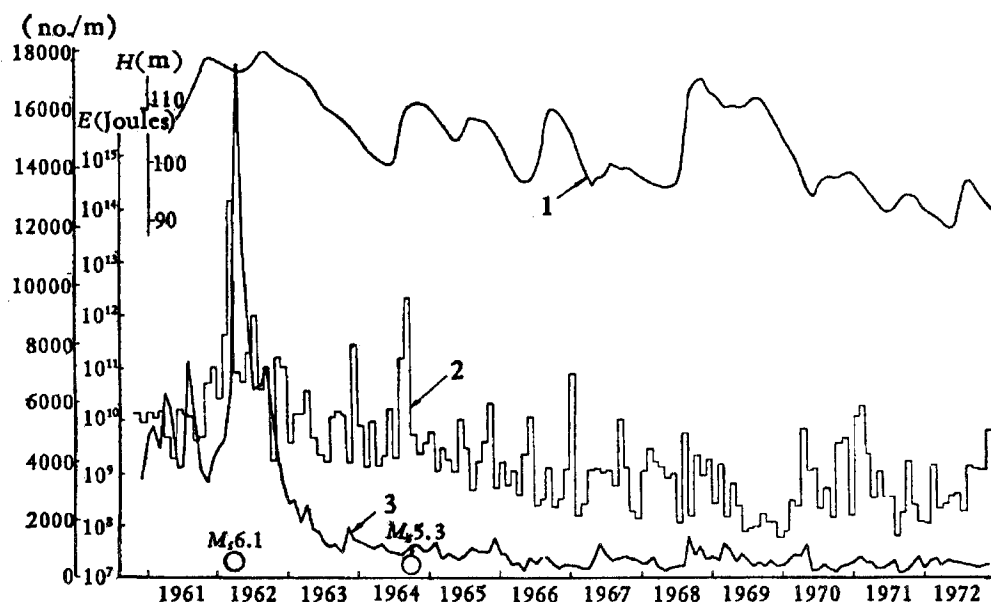
- Brana Mratinje u Jugoslaviji, kao predstavnik umerene pobuđene aktivnosti. Slučaj je od posebnog interesa jer je instrumentalno seizmičko osmatranje objekta vršeno i pre i posle stavljanja brane pod uspor. Osim toga zabeležen je i slučaj značajnog obnavljanja pobuđene aktivnosti posle 17 godina korišćenja brane.
- Brana Poechos, Severni Peru, predstavlja slučaj seizmički visoko aktivne oblasti gde su pobuđene pojave izostale ili su bile maskirane osnovnom prirodnom aktivnošću.

7.1) Slučaj brane Hsingfengkiang

Brana Hsingfengkiang je betonska olakšana gravitaciona konstrukcija visoka 105 m, izgrađena u Provinciji Kwantung, Kina. Prilično isprskali graniti čine temelje brane. Zapremina akumulacije iznosi $11500 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a njeno punjenje je otpočelo 1959 godine. Istoriska seizmičnost ove oblasti je niska (MM VI) tako da je brana izgrađena bez posebnih seizmičkih studija. Slabi zemljotresi su se osetili odmah posle početka punjenja i trajali su skoro besprekidno. U martu 1962 desio se glavni seizmički udar sa magnitudom 6,1 (Shen et al., 1974). Epicentri su se rojili u blizini akumulacije. Hipocentralne dubine su bile relativno male. Ubrzanja merena na brani bila su jako amplifikovana u blizini krune a oštećenja posle glavnog udara su bila značajna. Instrumenti za merenje jakih potresa nisu zabeležili glavni udar. Brana je bila rehabilitovana i ojačana u dva uzastopna navrata (pošto je konstatovana produžena seizmička aktivnost i posle oštećenja izazvanih glavnim seizmičkim udarom).

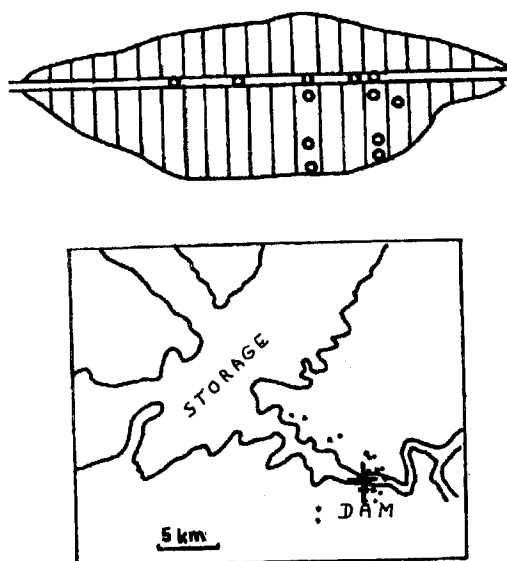
Zbirna predstava pojava pobuđene seizmičnosti u slučaju brane Hsingfengkiang tokom 12-godišnjeg perioda data je na sl. 8. Pokazane su fluktuacije nivoa akumulacije, mesečna učestalost seizmičkih udara i emisija seizmičke energije.

Na sl. 9 pokazana je šematska dispozicija brane Hsingfengkiang (sa lokacijom akcelorometara za jake potrese) kao i pozicija brane u odnosu na akumulaciju. Može se videti da su SPA epicentri locirani uglavnom oko brane. Dinamički odgovor brane daje visoke amplifikacije u blizini krune. Izvestan interes predstavlja podatak da je kontroverzna "b" vrednost iznad jedinice za seriju SPA udara, dok je ta vrednost pre početka SPA udara iznosila 0,72.



1) Fluktuacija nivoa akumulacije; 2) Mesečna učestalost seizmičkih udara; 3) Emisija seizmo-energije

Slika 8. Fluktuacije nivoa akumulacije, mesečna učestalost seizmičkih udara i emisija seizmičke energije na brani Hsingfengkiang (Shen Shonggang et al.) [27]



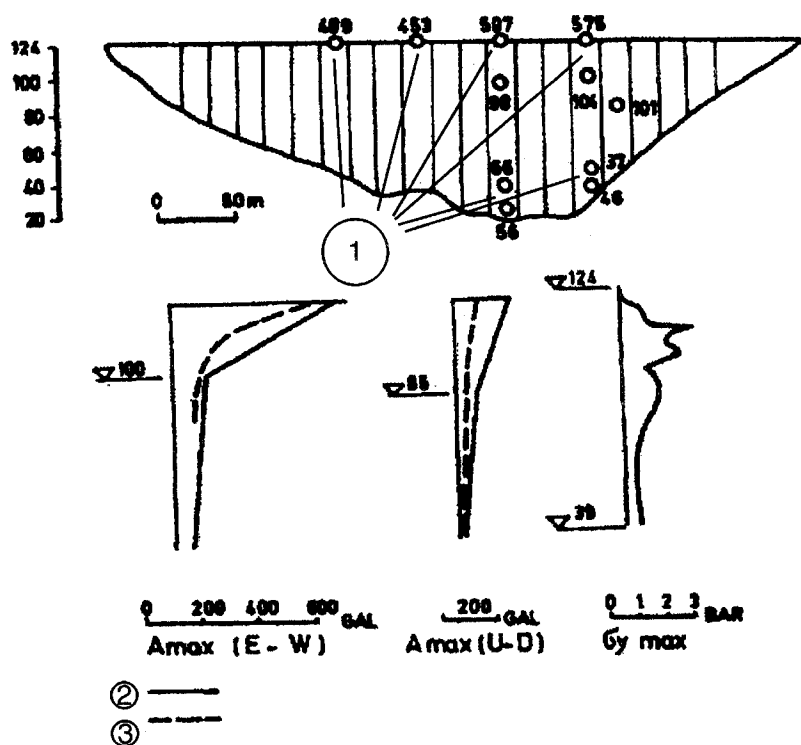
1) Distribucija instrumenata za jake potrese; 2) Lokacija brane; 3) Akumulacija; 4) Zona gomilanja pobuđenih udara

Slika 9. Šematska dispozicija brane i akumulacije Hsingfengkiang (Hsu Tsungho et al., 1975) [14]

Sl. 10 daje detalje dinamičkog odgovora brane za visoki SPA udar posle glavnog udara iz 1961 godine. Prisutna je izražena koncentracija ubrzanja i napona u blizini krune brane. Kada se pokazani naponi ekstrapoluju na magnitudu koja odgovara glavnom udaru (koji nije instrumentalno zabeležen) dobijaju se vrednosti koje objašnjavaju nastanak prskotina u zoni krune. Posle glavnog udara, u zoni ispod krune pružala se kontinualna prskotina duga 82 m.

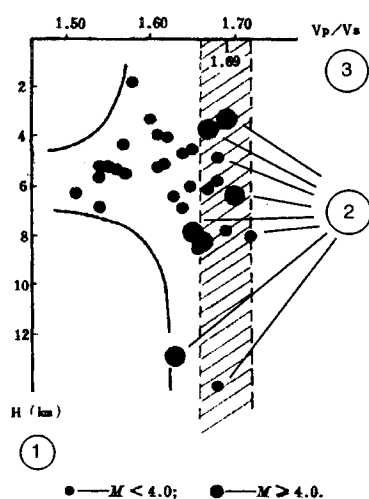
Brana, izgrađena kao tipična kontrafora konstrukcija ojačana je u dva navrata tako da je danas brana Hsingfengkiang uglavnom masivna konstrukcija sa značajno sniženim stepenom olakšanja.

Slika 11 prikazuje distribuciju detektovanih hipocentara, kako po dubini tako i prema brzinskoj anomaliji odnosno prema merenom odnosu brzina prostiranja longitudinalnih i transversalnih seizmičkih talasa. Vidi se da se seizmički udari grupišu u oblast brzinske anomalije tako da je verovatna pojava prolaznog pada površnih pritisaka usled dilatancije koja nastupa kada se naponsko stanje u uzročnom rasedu bliži slomu po smičućim naponima odnosno pomaku/generatoru seizmičkog udara.



1) Distribucija instrumenata za jake potrese; 2) Zabeležene vrednosti; 3) Proračunske vrednosti

Slika 10. Dinamički odgovor brane Hsingfengkiang za najveći intenzitet SPA udara, posle glavnog udara (Hsu Tsungho et al., 1975) [14]

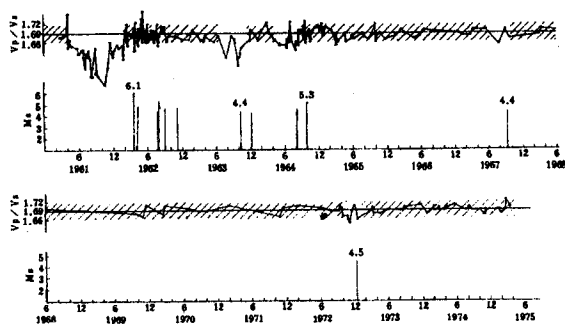


1) Dubina (km); 2) Hipocentralne lokacije; 3) Odnos longitudinalno-transverzalnih brzina

Slika 11. Hipocentralna distribucija pobuđenih zemljotresa i brzinske anomalije (Wang Miaoyueh et al., 1975) [32]

Slika 12 pokazuje vremensku istoriju merenih brzinskih anomalija i vremensku sekvencu pobuđenih seizmičkih udara sa magnitudama većim od 4. Primećuje se izvesna korelacija između brzinskih anomalija i glavnih udara. Smatra se da je trajanje brzinskih anomalija pri SPA slučajevima osetno kraće nego u slučajevima zemljotresa koji nisu pobuđeni akumulacijama. Interesantna je mogućnost da se brzinske anomalije stave u odnos sa pojavama dilatancije, koje uzrokuju prolazni pad pornih pritisaka, koji se kasnije vrate na prethodne vrednosti. Ono što je nesumnjivo dokazano merenjima je činjenica da je brzinska anomalija prethodila glavnim udarima i da se posle njih vratila na ambijentalne srednje vrednosti.

Slučaj Hsingfenghkianga je jedan od najimpresivnijih među SPA fenomenima, široko je diskutovan i dobro dokumentovan. Dok je SPA aktivnost (posle početka punjenja akumulacije) bila još u razviku, rizičnost te situacije je shvaćena i brana je značajno pojačana. Međutim glavna pouka u vezi sa ovim slučajem sadržana je u zaključku izveštaja podnesenog 1973. godine (Sheng et alia) [27] da su rasedi u oblasti



Slika 12. Vremenska raspodela značajnijih pobuđenih udara i merene brzinske anomalije (Wang Miaoyueh et al., 1975) [32]

akumulacije još savremeno (kvartarno) aktivni, što je podržano tragovima reaktiviranih pokreta po starim rasednim ogledalima i postojanjem toplih izvora. Rased Hoyuan, značajne dužine, prolazi na odstojanju oko 1 km pored brane a pobuđeni epicentri se gomilaju u ovoj oblasti. Geodetska merenja su pokazala pomeranje od 18,7 mm po ovom rasedu, između 1964 i 1972 godine. I pored niske istoriske seizmičnosti, ovakva aktivnost raseda i njegov očevitni seizmički kapacitet ukazuju na SPA kao realnu mogućnost. A to bitno podržava generalni zaključak da neotektonske studije i geodetsko osmatranje raseda sposobnih da generišu jake zemljotrese, moraju biti uključeni u procenu SPA potencijala.

7.2) Slučaj brane Mratinje

Brana Mratinje je betonska lučna konstrukcija visoka 220 m, izgrađena na Pivi. Locirana je u unutrašnjim Dinaridima, u 1500 m dubokom kanjonu koji zaostaje možda samo za kanjonom reke Kolorado. Duž svih 60 km pružanja akumulacije stenoviti ambijent čine masivni i mehanički sasvim kompetentni Trijaski krečnjaci. Njihova karstifikacija je ekstremno razvijena i to je bio glavni problem ove akumulacije. Tektonika je

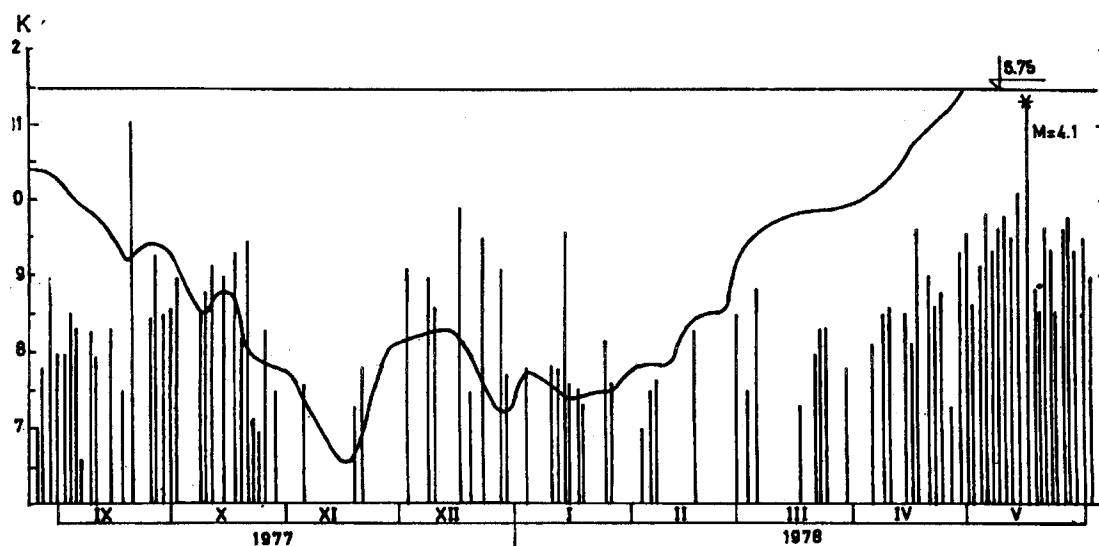
takođe jako razvijena i jedan od glavnih raseda ove oblasti prolazi desnim zaledem brane na rastojanju od oko 1 km. Seizmičnost oblasti detaljno je studirana i procenjena kao ne naročito visoka. Pri datim ambijentalnim uslovima (ekstremno visoka brana i duboka akumulacija, ekstremna karstifikacija i značajni sistem raseda u zoni akumulacije) pojava pobuđene seizmičnosti je očekivana kao mogućnost pa su izvršene pripreme za njeno osmatranje. Jedan trokomponentni kratkoperiodični seizmograf instaliran je na desnom boku brane (3,5 godina pre punjenja jezera, koje je startovalo u 1976 godini) i bio je u pogonu 20 godina. Dopunski sistem od tri kratkoperiodična instrumenta, spojen radio vezom sa centralnom stanicom za akviziciju podataka i integrisan u regionalnu osmatračku mrežu, uveden je 1982 godine. Lociranje epicentara i hipocentralnih dubina bilo je uglavnom neprecizno dok je radila samo jedna osmatračka stanica. Međutim zahvaljujući velikom broju dobijenih podataka dobila se i generalna slika o obimu nepobuđene seizmoaktivnosti, razvojnem toku pobuđenih pojava i maksimalnim magnitudama tokom tog procesa. Sa gledišta osmatranja brane to su bili bitni podatci koji su ocrtaali nepobuđeno stanje pre punjenja akumulacije, dramatičan porast energetske emisije i učestalih potresa pri završetku punjenja i relativno umirenje pojava kada je akumulacija ušla u normalnu eksploataciju. Kasnije uvedeni sistem niza radio-povezanih stanica dao je preciznije podatke, u realnom vremenu. Ali za shvatanje i dokumentovanje celine pobuđene seizmičnosti bilo je dragoceno upravo osmatranje sa jednom kratkoperiodičnom stanicom, koje je lansirano dovoljno pre punjenja akumulacije.

Normalna, pozadinska seizmičnost imala je stotinak udara godišnje sa malim magnitudama (1 - 3). Prva polugodina punjenja nije dala bitne promene ali je druge godine broj udara bio skoro trostruko veći a treće godine skoro petostruko, sa maksimalnom magnitudom 4,1 (prema izveštajima Seizmološkog zavoda Podgorica, 1972 do 1981). Tokom narednih godina, broj zabeleženih godišnjih potresa spustio se na red veličine beležen tokom početnih godina.

	72/73	73/74	74/75	75/76	76/77	77/78	78/79	79/80	80/81
N	102	77	98	129	273	475	358	247	122
M	2,55	2,8	3,0	3,5	3,5	4,1*	3,8	3,6	3,1
b				0,68	1,03	1,07	1,05	1,03	0,98
		①		→ X					

N) Broj zabeleženih potresa; M) Maksimalna zabeležena magnituda; 3) Punjenje akumulacije

Slika 13. SPA aktivnost tokom prvih godina punjenja i korišćenja akumulacije Mratinje (prema podacima Seizmološkog Instituta, Podgorica) [24]

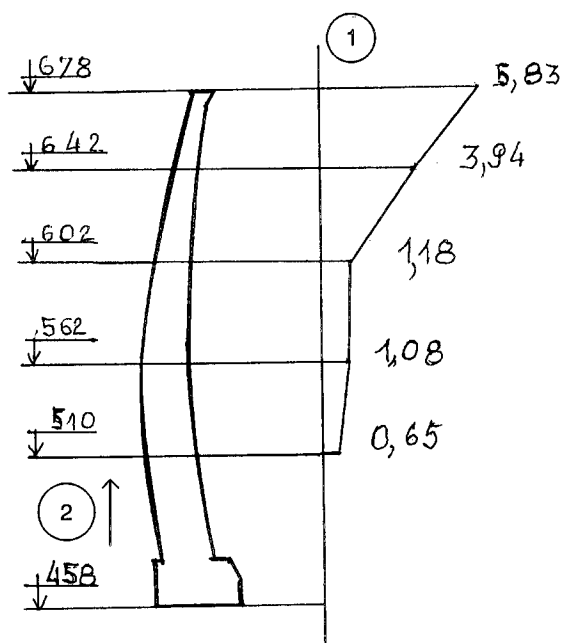


Slika 14. Vremenska istorija SPA procesa na Mratinju, u periodu maksimalne aktivnosti (Prema Seizmološkom Institutu, Podgorica) [24]

Slika 14 pokazuje vremensku sekvencu nivoa vode u akumulaciji i seizmičkih energetske emisije ($K = \log E$ u Džulima), za godinu 1977/78 kada je SPA aktivnost kulminirala posle naglog praznjenja i forsiranog podizanja nivoa akumulacije.

Branu Mratinje je takođe opremljena sa šest akcelometara za jake potrese (pet lociranih duž centralne konzole brane i šesti postavljen na desnom boku). Akcelometri su spojeni za grupno startovanje na relativno niskim pobudama, da bi se uhvatio odgovor brane na niskim magnitudama SPA procesa. Dvadeset seizmičkih epizoda zabeleženo je na ovaj način, uglavnom pri sasvim niskim odgovorima brane. Ipak je par epizoda bilo na dovoljnom energetskom nivou da pruži jasne dinamičke odgovore brane.

Maksimalna ubrzanja duž centralne konzole brane data su na slici 15 za pobuđeni potres magnitude 4,1 (maksimalni zabeleženi SPA potres). Ubrzanja su osetno amplifikirana u blizini krune, ali ostaju ispod potencijala za nastanak šteta. Treba uzeti u obzir da je amortizacija tokom dinamičkog procesa ostala na niskom nivou pri relativno niskom seizmičkom uticaju. Za jače potrese treba očekivati mnogo više izraženu amortizaciju.



1) Ubrzanje u % g; 2) Visinske kote brane (m)

Slika 15. Raspodela ubrzanja duž centralne konzole pri vršnom SPA događaju (prema Institutu IZIIS, Skopje, 1987) [25]

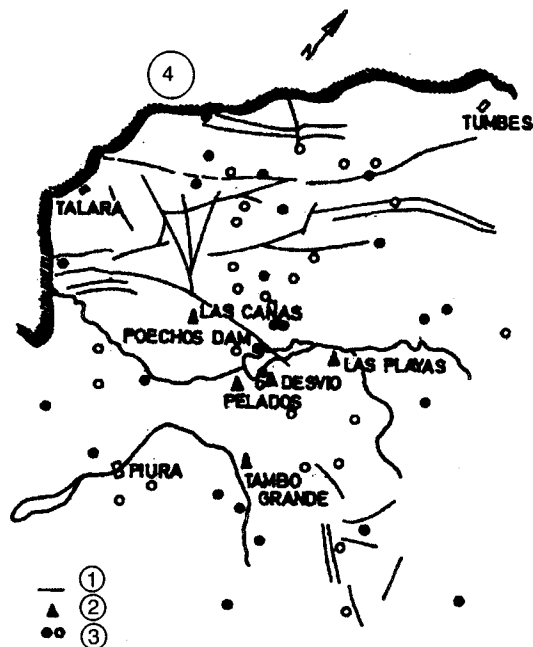
Generalno je očekivano da će nastupiti povlačenje SPA procesa na nivo seizmičke aktivnosti pre izgradnje brane, posle razumno dugog perioda eksploatacije, što je uglavnom i bio slučaj. Međutim 1994 godine (posle 19 godina korišćenja akumulacije) došlo je do slične epizode kao i 1978 godine, ali sa još oštrijim pražnjenjem i naglim punjenjem akumulacije, diktirano potrebama energetskeg sistema. Slični SPA fenomeni su bili ponovo pobuđeni, vrhuneci sa Magnitudom 3,8. Sledi zaključak da se SPA potencijal može ponovo pobuditi, do neprijatnih granica, čak i posle dugog perioda mirne službe. U slučaju akumulacije Mratinje za to je bila dovoljna nova provokacija sa ekstremnom amplitudom brzog pražnjenja i punjenja akumulacije. U obe epizode maksimalne SPA aktivnosti ($M = 4,1$ u 1978 i $M = 3,8$ u 1994) uključeno je bilo brzo i skoro potpuno pražnjenje akumulacije i isto tako brzo punjenje.

U slučaju brane Mratinje SPA fenomeni su bili očekivani zbog postojanja razvijene rasedne mreže, u i oko duboke akumulacije formirane u jako karstifikovanim stenama (povišena, hidraulička komunikativnost). Ovakva procena je bila brzo potvrđena upoređenjem seizmičke aktivnosti pre i posle punjenja akumulacije. Neotektonska studija je bila vanredno korisna za shvatanje SPA fenomena, ali bez instrumentalnog osmatranja bilo bi mnogo teže (ili uopšte nemoguće) da se prati SPA proces na razumno jasan način.

7.3) Slučaj brane Poečos

Brana Poečos izgrađena je na reci Čira, blizu severne granice Peru-a, u podnožnoj oblasti Anda. Mesto brane nije daleko od Pacifičkog ivičnog raseda t.j. od zone subdukcije Nasca ploče pod južnoamerički kontinent. Akumulacija iznosi $1000 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ a dužina brane u kruni iznosi oko 10 km. To je nasuta brana od šljunka i kamena sa centralnim glinenim jezgrom, visoka 50 m. Na širokom potezu glavnog korita brana je fundirana na debelom aluvijalnom zastoru čija dubina dostiže 80 m. Stoga je konstrukcija osetljiva u pogledu amplifikacije seizmičkih uticaja. Ambijentalna seizmičnost je generalno vrlo visoka u Andskom priobalnom pojasu. I pored ublaženja s obzirom na rastojanje brane do Pacifičkog raseda, ipak je brana bila projektovana za maksimalno ubrzanje $0,4 \text{ g}$ i proverena na dejstvo više tipičnih vremenskih istorija, [4]. Visoke rezidualne deformacije i mogućnost oštećenja brane (ispod rušilačke granice) morale su se prihvatiti. Pod navedenim okolnostima bilo je potrebno da se osmatra

mogućnost pojave seizmičnosti pobuđene punjenjem akumulacije, iako se imalo na umu da relativno visoka prirodna (tektonska) seizmičnost može maskirati SPA efekte.



- 1) Rasedi; 2) Seizmičke stanice; 3) Epicentri;
4) Pacifički okean

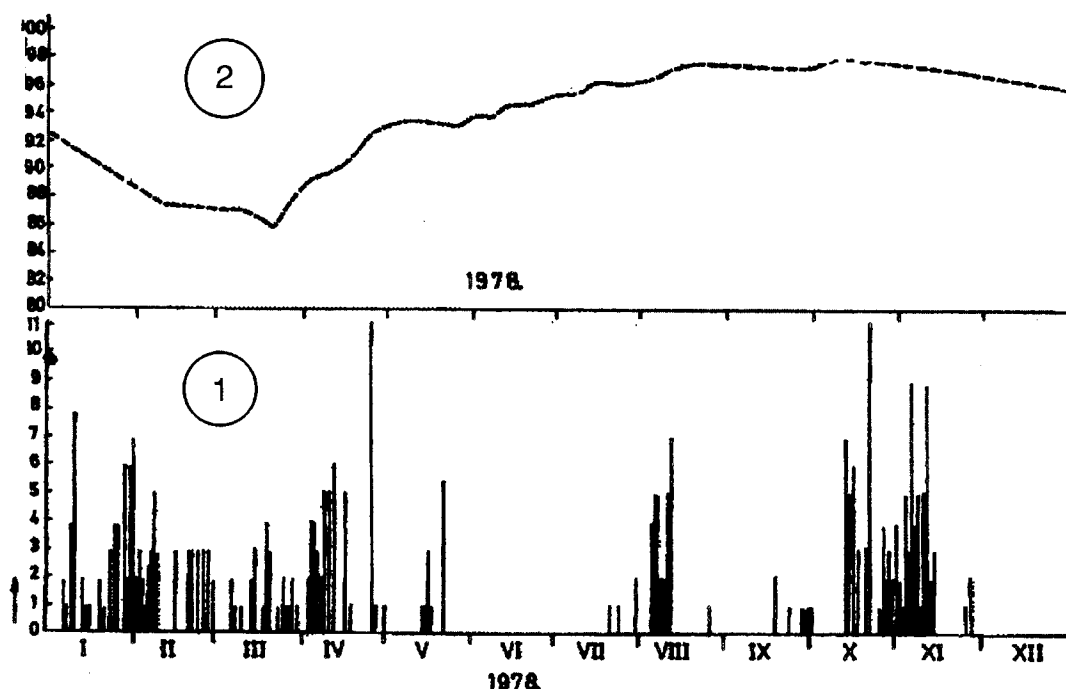
Slika 16. Dispozicija sistema za seizmičko osmatranje usmerena na SPA efekte (prema Seizmološkom Institutu, Lima, Peru, 1979) [26]

Brana je bila opremljena sa četiri akcelerometra za jake potrese, koji do danas nisu nijednom aktivirani.

Šira oblast brane osmatrana je mrežom od pet kratkoperiodičnih seizmografa, radiom povezanih sa centralnom stanicom za prijem i akviziciju seizmičkih podataka.

Na slici 16 data je dispozicija osmatračke mreže, sa lokacijama pet kratkoperiodičnih stanica i sa šematskom predstavom glavnih regionalnih raseda. Vidi se da je akumulacija brane presečena velikim regionalnim rasedom Huayapira, koji se spaja sa ivičnim Pacifičkim rasedom.

Slika 17 pokazuje reprezentativne rezultate seizmičkih osmatranja u vreme punjenja akumulacije.



1) Fluktuacije nivoa akumulacije; 2) Broj zabeleženih udara

Slika 17. Reprezentativni podatci seizmičkog osmatranja akumulacije Poečos. Prikazani su nivoi akumulacije i broj registrovanih mesečnih udara (prema Seizmološkom Institutu, Lima, Peru, 1979) [26]

Iz slika 16 i 17 može se zaključiti da je distribucija epicentara pojedinih potresa rasuta po celoj površini osmatrane oblasti i da sakupljeni podatci o seizmičkoj aktivnosti ne ukazuju na neku posebnu vezu sa punjenjem akumulacije. Brana je već 28 godina u eksploataciji i nije bila izložena nikakvim značajnim seizmičkim događajima, SPA tipa ili čisto tektonskim. Stoga se može zaključiti da u slučaju brane Poečos nije bilo razgovetnih SPA efekata.

* * *

Tri prikazana slučaja karakteristični su za prirodu i obim informacija koje se mogu dobiti seizmičkim osmatranjem SPA pojava. Pošto su značajnija merenja na seizmogenim dubinama van praktičnog dohвата (bar u doglednoj budućnosti) osmatranje SPA fenomena je najbolji način da se dobiju dalji podaci o seizmičnosati pobuđenoj akumulacijama. Ovaj razvojni pravac trebalo bi da slede i aktivno razvijaju sve zainteresovane grupe, posebno projektanti i vlasnici brana.

8) PROCENA POTENCIJALA I OSMATRANJE SEIZMIČNOSTI POBUĐENE AKUMULIJAMA

Praktično sve visoke brane, a naročito one veće visine, su potencijalni kandidati za pojavu SPA. U cilju procene tog potencijala potrebno je razmotriti sledeće podatke:

- tektonske uslove i podatke o strukturnoj geologiji, podržane studijom aerofotogrametrijskih i satelitskih snimaka.
- Makroseizmičke podatke, važeće za oblast akumulacije koja se proučava.
- Detaljne informacije o aktivnim rasedima u široj oblasti, a naročito svi raspoloživi podatci o recentnoj aktivnosti raseda u oblasti brane i akumulacije.
- Procena seizmičkog potencijala svih poznatih raseda u oblasti brane i akumulacije, sledeći postupak koji su razvili Wells i Coppersmith (1994).

- Podatke o režimu podzemnih voda

Sumirajući, potrebna je potpuna neotektonska studija, radi procene SPA potencijala u oblasti brane. U tom pogledu Bilten ICOLD-a No. 112 (Neotektonika i brane) daje korisne smernice.

U poslednje vreme otpočela je u nekim zemljama, sistematska studija teritorija koristeći satelitske snimke i GPS monitoring, u cilju da se dobije opšta tektonska i neotektonska slika kao generalna informacija o mobilnosti zemljine kore i aktivnosti raseda u posmatranoj oblasti. Ovakvi podatci su veoma vredni za preliminarne studije i kao orijentacija za detaljna sagledavanja.

Na bazi opisanih podataka neotektonske i seizmološke prirode moguće je proceniti SPA hazard i izgleda da bi mogli nastupiti značajniji događaji pobuđene seizmičnosti. Uverljive magnitude ovakvih događaja u osnovi zavise od veličine uzročnih raseda. Da bi uopšte bio kandidat za pobudu, takav rased mora već biti napregnut do blizu granice sloma. Ova zajednička osobina svih pobuđenih događaja je prilično često potvrđena tragovima pokretanja raseda u (geološki) bliskoj prošlosti.

Najveća magnituda koju je dosada proizveo neki SPA događaj, iznosi 6,3. Ukazivano je (Allen, 1979) da bi magnituda 6,5 mogla biti uzeta kao uverljivi plafon za lokalne zemljotrese SPA porekla. Moderne brane trebalo bi da mogu podneti ovakav udar bez neprihvatljivih oštećenja. U principu, ukoliko je u izgledu da rasedi većeg kapaciteta mogu biti pobuđeni, njihove magnitude i druge efekte treba određivati istim postupkom kao i za ostale uzročne rasede. U tom smislu može se tvrditi da seizmički rizik kojem je izložena neka brana ne zavisi od toga da li je u pitanju neki pobuđeni ili čisto tektonski događaj. Ali pobuđivanje utiče na datiranje takvog događaja i ta okolnost može uticati na analize rizika. A u slučajevima niske istoriske seizmičnosti, studije preduzete radi razjašnjenja SPA potencijala za neku lokaciju, mogu ujedno odrediti i kontrolni zemljotres za tu lokaciju.

Na bazi pomenutih podataka i razmatranja, moguće je proceniti izgleda za nastupanje značajne seizmičnosti pobuđene akumulacijom. Čak prosto nabrojivši značajne generalne osobenosti neke oblasti, može se doći do korisnih indikacija. Naprimera, ako imamo slučaj normalnog rasedanja sa smanjenim naprezanjima po diskontinuitetima, duboko razlamanje sa neujedna-

čenom vodopropusnošću (karstne pojave), umerenu seizmičnost i umerene gradijente tektonskih pomeranja u oblasti, tada već imamo sklop okolnosti koji ukazuje da se mogu očekivati razgovetne SPA pojave. Kao praktičan primer, većina pobrojanih faktora bili su prisutni u slučaju oblasti akumulacije Mratinje (jedan od slučajeva prikazanih u ovom izveštaju). Kasniji nastup SPA događaja u vezi akumulacije Mratinje nije predstavljao iznenađenje.

Za instrumentalno osmatranje pobuđenih seizmičkih događaja koriste se seizmografi podešeni da hvataju relativno niske pobude, odnosno magnitude.

Osmatranje SPA pojava treba otpočeti bar par godina pre punjenja akumulacije, da bi se utvrdila ambijentalna seizmičnost. Ovo je važno zato što odsustvo promene pozadinske seizmičnosti tokom i posle punjenja akumulacije, znači da nije došlo do akumulacijom pobuđene seizmičnosti. Postavljanje samo jednog seizmografa moglo bi se prihvatiti tokom osmatranja pre punjenja akumulacije. Lokalna mreža seizmografa mogla bi se postaviti kasnije.

Dispozicija optimalne mreže radiom povezanih seizmografa, zahteva detaljnu studiju u svakom posebnom slučaju. Kao opšta smernica može se reći da tri kratkoperiodična seizmografa predstavljaju teoretski minimum, a da je pet stanica praktični minimum za uspešno određivanje lokacija epicentara i njihovih hipocentralnih dubina.

Ishod SPA osmatranja sastoji se od velikog broja zabeleženih seizmičkih udara, sa njihovim epicentralnim lokacijama, hipocentralnim dubinama i magnitudama. Ukoliko se dešava gomilanje osmotrenih događaja duž rasednih linija, to je validna indikacija da aktivni rasedi emituju niz pobuđenih događaja.

9) ZAVRŠNA RAZMATRANJA

Posle izvesnih kontroverznih stavova u ranijim fazama, Seizmičnost pobuđena akumulacijama danas je široko prihvaćena kao specifičan odgovor oblasti u kojoj se formira akumulacija (zavisno od njenog fizičkog a posebno tektonskog sklopa) na punjenje akumulacije.

Priroda i pojedinosti ovih pojava (kao što je uopšte slučaj sa hipocentralnim detaljima seizmičkih pojava) poznati su uglavnom kvalitativno i na bazi indirektnih informacija. Stoga su u tom pogledu potrebna dalja

proučavanja. Ipak direktni opiti na seizmogenim dubinama su skupčani sa teškoćama i troškovima koji, bar zasad, ne dopuštaju ovu mogućnost.

Ipak, na bazi prikupljenih opažanja i njihove interpretacije, generalno se smatra da punjenje akumulacija može pobuditi seizmičku aktivnost samo pri postojanju prethodnih tektonskih uslova. Pobuda ovakvih seizmičkih fenomena povezana je sa dejstvom težine vode u akumulaciji i sa dejstvom difuzije pornih pritisaka usled zajaživanja. Poznato je takođe da brze promene nivoa vode u akumulaciji pospešuju pojave pobuđivanja. Takvo pobuđivanje moguće je samo ako je uzročni rased već napregnut do blizu kritičnih uslova. Takav zaključak je izveden na bazi kvalitativne interpretacije osmatranih pojava, laboratoriskih ispitivanja koja simuliraju uslove na seizmogenim dubinama i numeričkog modeliranja. Potvrdu putem direktnih opita zasada nije moguće izvršiti.

Postoji opšta saglasnost da su pojave pobuđivanja moguće samo ako su tektonski gradijenti već stvorili uslove blizu sloma. Najveći efekti u tom smislu mogu se očekivati kada visoki naponi smicanja i sniženi normalni naponi postoje duž uzročnih raseda. To je obično slučaj sa normalnim rasedanjem i rasedanjem po pružanju. Reversni rasedi, koji stvaraju znatne normalne napone, manje su osetljivi na pobuđivanje. Osmatranja aktivnih raseda sasvim podržavaju ovakav kvalitativni zaključak.

Verovatnoća pobude asociranih seizmičkih pojava raste sa visinom brana i veličinom akumulacija. Stoga se smatra da treba proveriti SPA potencijal naročito za brane reda visine 100 m i više. Međutim u tom pogledu nema oštarih granica ni čvrstih pravila.

Figurativno, može se smatrati da su pobuđene pojave seizmički događaji koji još nisu bili zreli za pojavu ali su se ipak realizovali zbog dodatnih efekata usled opterećenja akumulacijom i propagacije pornih pritisaka. Na ovakvom se konceptu bazira važan praktični zaključak da granične magnitude i površinski intenzitet seizmičkih događaja ne mogu biti uvećani efektima punjenja akumulacije, u odnosu na čisto tektonski izazvane događaje. Tako da ako je određivanje kontrolnog projektnog zemljotresa izvršeno na bazi dovoljnih podataka i valjanih analiza, rizik za sigurnost brane koji izazivaju SPA pojave automatski je pokriven. Međutim prateće objekte i već postojeće druge konstrukcije u blizini, treba svakako proveriti na dejstvo usvojenog kontrolnog zemljotresa. U slučajevima niske istoriske seizmičnosti, neotektonske

studije izvršene za potrebe određivanja SPA potencijala, mogu ujedno definisati i kontrolni zemljotres. Mogućnost aktiviranja kvartarnih raseda je posebno važna u tom pogledu.

Osmatranje SPA aktivnosti je svakako opravdano za veće brane i akumulacije. Osmatranje pre usporavanja je poželjno. Postavljanje samo jednog instrumenta je dovoljno ukoliko je cilj samo utvrđivanje prethodnog nivoa seizmičke aktivnosti. Da bi se dobile pouzdane lokacije epicentara i hipocentralne dubine, treba razviti lokalnu mrežu seizmografa.

LITERATURA

- [1] Allen, C.R., 1979. "Reservoir-induced Earthquakes and Engineering Policy", *Proceedings of Research Conference on Intro-Continental Earthquakes, Ohrid, Yugoslavia*, 1979.
- [2] Baecher, G.N. and Keeney, R.L., 1982. "Statistical Examination of Reservoir-Induced Seismicity", *Seismological Society of America Bulletin*, v. 72
- [3] Bell, M. L. and Nur, A., 1978, "Stress Changes Due to Reservoir-Induced Pore Pressure and Stresses, and Application to Lake Oroville", *Journal of Geophysical Research*, v.83
- [4] Božović, A., 1974. "Review and appraisal of Case Histories Related to Seismic Effects of Reservoir Impounding", *Engineering Geology*, Vol. 8, No.1/2
- [5] Božović, A., Tucovic I., Dungar., 1979, "Seismic analysis of Poehos dam spillway headworks" *13th Congress of ICOLD*, Q.51, R.21
- [6] Brace, W.F., 1974., "Experimental Studies of Seismic Behaviour of Rocks under Crustal Conditions", *Engineering Geology*, Vol. 8
- [7] Brace, W. F. and Byerlee, J. D., 1970., "California Earthquake: Why Only Shallow Focus? ", *Science*, 168
- [8] Byerlee, J.D., 1966., "The Frictional Characteristics of Westerly Granite" *Thesis M.I.T.*
- [9] Byerlee, J.D., 1968., "Brittle-Ductile Transition in Rock". *Journal of Geophysical Research*, 73
- [10] Gupta, H. K., Rastogi B.K., 1976. "Dams and Earthquakes". *Elsevier, Amsterdam*.

- [11] Gupta, H.K., 1992. "Reservoir-Induced Earthquakes". *Elsevier, Amsterdam*
- [12] Handin, J. et alia, 1963,. "Experimental Deformation of Sedimentary Rocks Under Confining Pressure: Pore Pressure Tests". *Bulletin of the American Society for Petrology and Geology*. v. 47
- [13] Howells, D.A., 1976., "The Time for a Significant Change of Pore Pressure", *Engineering Geology*, Vol.8
- [14] Hsu Tsung-ho, 1975. "Strong Motion Observation of Water-Induced Earthquakes at Hsingfengkiang Reservoir in China", *Academia Sinica, Beijing, China*
- [15] Huaco, D., 1978. "Seismicity of the Storage Zone Chira-Piura", *Geophysical Institute of Peru, Lima*.
- [16] ICOLD, 1984. World Register of Dams.
- [17] ICOLD, Bulletin 112, 1998, Neotectonics and Dams.
- [18] Judd, W.R., (editor), 1974. "Seismic Effects of Reservoir Impounding". *Engineering Geology*, Vol. 8
- [19] Kisslinger, C., 1976. "A Review of Theories of Mechanisms of Induced Seismicity" *Engineering Geology*, Vol. 10. No. 2/4
- [20] Logani, K. L., 1979. "Reservoir Induced Seismicity" 13th Congress of ICOLD, Vol. 5, p.p. 625-630
- [21] Milne, W. G. (editor), 1976. "Induced Seismicity", *Engineering Geology*, Vol. 10, No. 2/4
- [22] Nikolayevskiy, V.N., 1982. "Earth Crust, Dilatancy and Earthquakes", section of book on "Focal Mechanics of Earthquakes", *Mir Publishers, Moscow*
- [23] Perman, R.C., Packer, D., Coppersmith and Kneupfer, P.L., 1983. "Collection of Data Bank on Reservoir-Induced Seismicity", *USGS Contract No. 14-08-0001-19132*
- [24] "Yearly Reports on Monitoring of Seismic Activity at Mratinje Storage covering 1974 - 1981 period". *Seismological Institute of Montenegro*.
- [25] "Seismic Monitoring of Mratinje Dam", Seismological Institute Skopje, 1973
- [26] "Seismic Monitoring of Poechos Dam". Seismological Institute, Lima, Peru 1979.
- [27] Shen Shonggang et al., "Earthquakes Induced by Reservoir Impounding and their Effects on Hsingfengkiang Dam", *Scientia Sinica*, Vol. 17, No 2, China
- [28] Simpson, D. W., 1976. "Seismicity Changes Associated with Reservoir Loading", *Engineering Geology*, Vol. 10 No. 2/4
- [29] Simpson, D.W., 1988 "Two Types of Reservoir Induced Seismicity", Bulletin of the Seismological Society of America
- [30] Stesky, R. M. et alia, 1974. "Friction in Faulted Rock at High Temperature and Pressure". *Tectonophysics*.
- [31] USCOLD 1997., "Reservoir Triggered Seismicity"
- [32] Wang Miao-yueh et al., 1975. "Mechanism of the Reservoir Impounding Earthquakes at Hsinfengkiang and a Preliminary Endeavour to Discuss their Cause", *Academia Sinica, Beijing, China*
- [33] Wells, D. L. and Coppersmith, K. J., 1994. "New Empirical Relationships among Magnitude, Rupture Length, Rupture Width, Rupture Area and Surface Displacement". *Bulletin Seismological Society of America*, Vol. 84, No. 4.
- [34] Westergaard, H. M. and Atkins, A.W., 1934. "Deformation of the Earth Surface Due to Weight of the Boulder Reservoir". *Bureau of Reclamation, T.M. No. 422*

RESERVOIR TRIGGERED SEISMICITY

by

Aleksandar BOŽOVIĆ

Summary

Seismic phenomena associated with impounding of storages are being recorded and studied starting from mid-thirties of the past century and were the subject of controversial disputes. Namely, the causal link between the effects of impounding the new storages and associated seismic phenomena was explained or denied in different ways.

Notwithstanding, observing of associated seismic phenomena during and after impounding of new storages (above hundred of accepted cases) led to convincing explanation of related phenomena and to conclusions regarding their nature and provenience.

The prevailing opinion is that the triggered seismicity is a specific response of existing faults, which are already critically stressed, to additional loads and pore pressure propagation, caused by impounding. It is therefore necessary to consider the possibility of some associated seismicity for each new large dam.

This report exposes the phenomenology of storage related triggered seismicity and gives an assessment of related risks, as well as some characteristic case histories.

Key words: Storages, Reservoir Triggered Seismicity

Redigovano 04.11.2003.