

Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad

Peter Sinčič*, Renato Vidrih**, Matjaž Godec*

Povzetek

Vsako leto v Zemljini notranjosti nastane več močnih potresov z obsežnimi posledicami tudi na večjih objektih. Mednje štejemo tudi velike pregrade, od katerih so mnoge zgrajene na potresno aktivnih območjih. V Sloveniji smo se odločili, da je za zagotavljanje varnosti pregrad potrebno nadaljevati opazovanje njihove seizmičnosti. V Uradnem listu RS je bil leta 1999 objavljen Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velikih pregrad, ki med drugim opredeljuje tudi pojem velike pregrade, predpisuje načine opazovanja seizmičnosti, tehnične normative seizmoloških instrumentov ter pogoje, ki jih mora izpolnjevati izvajalec opazovanja vpliva seizmičnosti na velike pregrade. Nadzor nad izvajanjem opazovanja seizmičnosti pa opravljajo inšpektorji, pristojni za varstvo okolja. Izkušnje so pokazale, da je pravilnik potrebno spremeniti, za kar si v zadnjih letih tudi prizadevamo, saj bo le tako lahko proces opazovanja seizmičnosti stekel nemoteno.

Uvod

Letno je na Zemlji zabeleženih preko 3 milijone potresov. Večina teh je tako šibkih, da jih ljudje ne čutimo. Toda vsaj 900 potresov letno je močnejših od magnitude 5. Takšni potresi lahko povzročijo tudi obsežne posledice. Od leta 1900 je v potresih izgubilo življenje več kot 2 milijona ljudi, posledice potresov v posameznih državah pomenijo pravo gospodarsko katastrofo. Mnoge pregrade po svetu so zgrajene na potresno aktivnih območjih in po znanih podatkih je 74 pregrad utrpelo poškodbe zaradi potresov, od tega 27 pregrad hude ali zelo hude poškodbe (Slika 1). Zaradi potresa so tako utrpeli poškodbe tudi nam bližnje pregrade v Makedoniji, Romuniji in Veliki Britaniji.

Močni potresi vedno porajajo vprašanja, na katera pogosto ni moč dati točnih odgovorov. To še posebej velja v primeru velikih pregrad, kjer imamo postavljenih premalo instrumentov, in sicer tako za beleženje potresov kot za beleženje odziva pregrade.

Brez ustreznega zapisa ni možno opraviti primerjave v potresu poškodovane pregrade s predpostavljenimi projektnimi parametri in kriteriji; prav tako pa je tudi otežen sprejem racionalnih odločitev za sanacijo in ojačitev konstrukcije. Dodatne težave se pojavljajo, kadar potresi ne povzročajo velikih in vidnih poškodb. V takih primerih je za oceno uporabnosti konstrukcije za zahtevnimi pregledi konstrukcije potrebno opraviti še posebne meritve.

Poznavanje podatkov o gibanju tal ob potresu na ožjem območju, kjer leži konstrukcija, in poznavanje obnašanja konstrukcije sta temeljnega pomena za oceno potresne nevarnosti, in sicer tako za določitev potresnih parametrov in kriterijev kot tudi za vse ostale dinamične preiskave. Brez teh podatkov so vse nadaljnje preiskave in analize zasnovane le na predpostavkah. Najboljši način za reševanje teh problemov je postavitve mreže večjega

*Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana

**dr.. Ministrstvo za okolje in prostor, Agencija RS za okolje, Urad za seizmologijo in geologijo, Dunajska 47, Ljubljana

števila inštrumentov, in sicer tako za beleženje gibanja tal kot tudi za beleženje odziva konstrukcije v primeru potresa.

V potresnem inženirstvu raste potreba po podatkih, ki jih lahko pridobimo s postavljenimi mrežami instrumentov za beleženje močnih potresov. Tako pridobljeni podatki so bistveni pri aktivnostih za zmanjševanje potresne ogroženosti in tudi za zmanjševanje poškodb tako opazovanih konstrukcij pri morebitnih katastrofalnih potresih. Pridobljeni rezultati so enako pomembni za teoretične in sploh bazične raziskave na področju potresnega inženirstva kot za uporabne raziskave na tem področju.

V zadnjem času je seizmološko opazovanje konstrukcij na splošno aktivnost, ki ji v seizmologiji in potresnem inženirstvu dajemo velik poudarek. In to ne brez razloga – tako dobljeni podatki bistveno pripomorejo k povečanju varnosti ob potresu. Poleg tega pa so ti podatki osnova za pripravo zakonodaje na tem področju. Tako pripomoremo k projektiranju potresno odpornejših konstrukcij, kar neposredno vpliva na manjšanje potresne ogroženosti (Godec, Vidrih, 2003).

Prispevek je posvečen problemom seizmološkega opazovanja pregrad, zato so v nadaljevanju obravnavane le teme, vezane na opazovanje pregrad. Podobno pozornost pa ponekod po svetu posvečajo tudi drugim velikim inženirskim objektom (mostovi, vodni rezervoarji, objekti v sklopu jedrskih elektrarn, izjemno pomembni objekti ter objekti, ki se gradijo v večjih serijah).

Splošne zahteve potresnega opazovanja

Potresi so lahko tako po načinu svojega nastanka kot tudi po svojem delovanju na objekte kompleksen pojav, ki vsebuje potencialno nevarnost, da v svojem zelo kratkem trajanju povzroči porušitve objektov ali spremembe oblička Zemlje velikih razmer. Potrebno je poudariti, da je ena največjih potencialnih nevarnosti nastanka škode velikih razsežnosti pri potresih prav porušitev pregradnih objektov. Takšna porušitev ima še večje posledice, če so ogrožena gosto naseljena in visoko urbanizirana področja.

Stalna nevarnost nastanka potresa od nas zahteva, da s preventivnimi aktivnostmi pričnemo že v fazi načrtovanja in projektiranja objekta. Učinki preventivnih in zaščitnih ukrepov so učinkovitejši in racionalnejši od tistih, ki bi bili uporabljeni pri odstranjevanju posledic učinkov potresa.

Velika pregrada je posebej pomemben element tako pri ocenjevanju potresne ogroženosti širšega območja pregrade kot tudi pri opredeljevanju potresne ogroženosti območja, kjer bo pregrada postavljena. Mnogo pregrad po svetu je postavljenih na območjih velike potresne aktivnosti ali pa v neposredni bližini področij, kjer so v preteklosti že bili močni potresi. Pri tem je potrebno upoštevati možnost nastanka ne le naravnih temveč tudi lokalnih induciranih potresov, nastalih med polnjenjem akumulacije. Vsi ti potresi lahko povzročijo popolno ali delno porušitev pregrad.

Izmed mnogih poškodovanih pregrad zaradi »naravnih« potresov naj omenimo le pregrado Habgen v Montani (ZDA) leta 1958, pregrado Eklutna na Alaski (ZDA) leta 1964, pregrado Van Norman v Kaliforniji (ZDA) leta 1971 in pregrado Shih Kang (Ši-Gang) na Tajvanu leta 1999.

Najpomembnejši podatki o gibanju tal in odzivu pregrade ob potresu se pridobijo s postavitvijo instrumentov za beleženje potresov. Brez zapisa potresa ni možno primerjati odzivanja pregrade med potresom s projektnimi potresnimi parametri, kot tudi ni moč sprejeti sklepov za nadaljnjo varno uporabo ali pa racionalno sanacijo pregrade po potresu (Godec in sod., 2004).



Slika 1 - Ob potresu na Tajvanu leta 1999 se je podrla na prelomu zgrajena pregrada Ši-Gang (foto: R. Vidrih).

Za določitev odziva pregrade je potrebna postavitev ustreznega števila instrumentov na pregradi in v njeni neposredni okolici. Število instrumentov je odvisno od več faktorjev, in sicer od: seizmotektonskih karakteristik območja, pogojev temeljenja, tipa in namena pregrade, materiala pregrade... Zato ni moč kar splošno določiti števila potrebnih instrumentov. Zaželeno je, da se izdelajo predhodne študije in analize za določitev tako optimalnega števila postavljenih instrumentov kot tudi mest postavitve.

Že leta 1972 je IZIIS (Inštitut za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo) iz Skopja na območju tedanje Jugoslavije pričel s postavitvijo mreže instrumentov za beleženje močnih potresov. Na začetku je bilo v tej mreži postavljenih 100 instrumentov (akceleroграфи SMA-1 – Kinometrics, ZDA). Kasneje se je to število kontinuirano povečevalo in na koncu osemdesetih let prejšnjega stoletja doseglo nekaj več kot 300 instrumentov. Ti instrumenti so bili postavljeni na osnovni hribini, na karakterističnih tleh in na različnih tipih konstrukcij (Mihailov, 1985, 1990, Mihailov, Trnkoczy, 1990).

Seizmološko opazovanje pregrad

Seizmološko opazovanje hidrotehničnih objektov, posebno pregrad, je najracionalnejša oblika in metoda zaščite pred učinki potresov. Podatki, ki se pridobijo z registracijo potresa na teh instrumentih, se uporabljajo kot temeljni podatki za definiranje potresnih parametrov in kasneje pogojev za projektiranje. Poleg tega – brez ustrezne registracije ni možno opraviti primerjave obnašanja objekta (pregrade) v času potresa s projektnimi potresnimi parametri. Prav tako tudi ni moč sprejeti odločitve za nadaljnjo varno uporabo ali nujnost sanacije pregrade takoj po potresu.

Iz navedenega je priporočeno izvajanje potresnega opazovanja na vseh hidrotehničnih objektih, še posebej na visokih pregradah, ki so zgrajene na potresno aktivnih območjih.

Skupno število instrumentov na pregradah po svetu je majhno. Potrebno bo še precej časa za popolno definiranje obnašanja konstrukcij – odziva pregrad ob potresu. Zato je zelo pomembno, da se s pomočjo tega relativno majhnega števila instrumentov dobi največji možni nabor informacij. Potrebno pa je vložiti še večje napore in pridobiti razumevanje investitorjev, da se število instaliranih instrumentov na obstoječih pregradah poveča.

Povečanje števila instrumentov je posebej pomembno za pregrade zgrajene po najnovejših tehnologijah in metodah projektiranja. Tehnično in ekonomsko je to upravičeno. Stroški instrumentiranja so zanemarljivi glede na celotno investicijo. Po drugi strani nam pa tako postavljeni instrumenti omogočajo pridobitev osnovnih podatkov o obnašanju pregrade ob potresu in sprejemanje ustreznih odločitev o nadaljnji uporabi pregrade ali potrebi za njeno sanacijo neposredno po potresu. Istočasno tako pridobimo realne podatke o učinkovitosti novih materialov ali metod projektiranja. Žal je za potresno inženirstvo potres edini pravi eksperiment.

Pomemben element pri seizmološkem opazovanju so izhodni podatki instrumentov. Zaželeno je, da so ti v takšni obliki, da se iz njih na licu mesta (neposredno po potresu) pridobi informacija o moči potresa in odzivu konstrukcije. Na osnovi tega je moč sprejeti odločitev o nadaljnji uporabi pregrade. Na primer, če je pregrada projektirana za pospešek $a = 0,25$ g, kot projektni parameter, a je bila maksimalna amplituda zabeleženega pospeška manjša od te vrednosti, potem se lahko z veliko zanesljivostjo sprejme odločitev o nadaljnji uporabi brez posebnih potrebnih ojačitvenih ali sanacijskih del. Če pa je bil registriran pospešek večji od 0,25 g, pa je priporočljivo, tudi kadar ni vidnih znakov poškodovanosti pregrade, da se naredi posebna študija in da se preveri velikosti sil in deformacij pregrade zaradi takšne potresne sile.

V zadnjih treh desetletjih je bil narejen velik napredek v poznavanju delovanja potresa na betonske in zemeljske pregrade. Razvoj instrumentov za točno beleženje realnih premikov zaradi potresa kot tudi napredek v računalniško analitičnih postopkih vodita k boljšim ocenam potresnega odziva pregrad. Mnogo naporov je bilo vloženi v pripravo analitičnih in numeričnih metod za simuliranje odziva pregrade na potres, ki je v splošnem predstavljen z odgovarjajočim pospeškom. Bistven napredek je napravljen tudi pri definiranju potresnih vhodnih podatkov za opredeljevanje izpostavljenosti konstrukcije potresu.

Menimo, da je neobhodno potrebno, da projektanti bolje poznajo rezultate in pomen zabeleženih podatkov – realnega obnašanja pregrade pri delovanju potresnih sil. Le tako bodo lahko te podatke uporabljali v vsakodnevni praksi. Tako bomo pomagali pripraviti pogoje za čim racionalnejši pristop pri potresno odpornem projektiranju pregrad (Huber, 1995, Zadnik, 1997).

Zaščita pred potresi – tehnična regulativa

Tehnični predpisi in standardi so ena od osnovnih mer zaščite pred potresi. Obstaja več takšnih predpisov. Vendar, na žalost, le-ti ne morejo zaobjeti vseh področij in faz projektiranja in planiranja, ki lahko dvignejo nivo zaščite pred potresi. Zaradi specifične narave nastanka potresa in njegovega delovanja na objekte predpisi ne morejo neposredno zajeti vseh vplivov potresa, od katerih so neposredno odvisni obnašanje, stabilnost in tudi ranljivost objekta. Zato je potrebno (poleg upoštevanja tehničnih predpisov kot mere zaščite) tudi iskati nove vsebine in oblike zaščite pred potresi v vseh področjih tehničnih strok.

Potresno opazovanje pregrad je relativno zapleten proces predvsem zaradi nezadostne definiranih narave samega potresa in obnašanja objektov pod njegovim vplivom. V več državah obstajajo predpisi in normativi za potresno opazovanje konstrukcij – v bistvu so definirani kriteriji za potresno opazovanje.

V bivši Jugoslaviji je bil v začetku leta 1988 sprejet Pravilnik o tehničnih normativih za seizmično opazovanje visokih pregrad (UL SFRJ 6/1988), ki je še vedno v veljavi v nekaterih državah, nastalih iz bivše SFRJ. Koncem leta 1999 je bil v Sloveniji sprejet Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade (UL RS 92/99), s čimer je prenehala veljavnost prejšnjega pravilnika.

Obveznost iz Pravilnika SFRJ je bilo opazovanje (v tem primeru instrumentiranje) širšega območja pregrade in akumulacije kot tudi same pregrade. To opazovanje je sestavljeno iz dveh delov:

- potresno opazovanje inducirane seizmičnosti,
- potresno opazovanje za beleženje dinamičnega obnašanja tal, temeljev in telesa pregrade ob močnem potresu.

Za zagotavljanje teh informacij, ki so po naravi različne, so potrebne preiskave in opazovanje pregrad s pomočjo:

- lokalne mreže seizmoloških postaj,
- seizmografov,
- instrumentov za beleženje močnih potresov - akcelerografov.

Lokalna seizmološka mreža je sestavljena iz najmanj treh premičnih seizmoloških opazovalnic, ki so razporejene tako, da pokrivajo opazovano območje in omogočajo vrednotenje lokalne potresne aktivnosti, lociranje epicentrov in določitev energetskih karakteristik potresa. Delo takšne mreže se mora začeti vsaj dve leti pred pričetkom izgradnje pregrade, nadaljevati pa se mora do zaključka polnjenja oziroma še leto dni po pričetku obratovanja. Zaželeno je, posebej na območjih velike potresne aktivnosti, da takšna mreža deluje kot stalna mreža – brez prekinitve. Pri tem opazovanju je zelo pomembno obdobje polnjenja akumulacije zaradi možnosti nastanka induciranih lokalnih potresov (naravno stanje se poruši zaradi spremembe napetostnega stanja v tleh).

Instrumenti za beleženje močnih potresov, postavljeni na pregradi, nam omogočajo pridobivanje osnovnih podatkov o obnašanju pregrade v času potresa oziroma nam omogočajo sprejem odločitev o nadaljnji uporabi pregrade ali potrebi po njeni sanaciji neposredno po potresu.

Zaradi specifičnih pogojev lokacij posameznih pregrad (geološke, seizmološke ...), posebnega tipa konstrukcije pregrade, velikosti akumulacije, kot tudi zaradi resnosti posledic, ki lahko nastanejo zaradi poškodb pregrade, je včasih potrebno izdelati podrobno študijo o optimalnem številu in lokaciji instrumentov za beleženje močnih potresov.

Dosedanje izkušnje po svetu nam govorijo, da je inducirana seizmičnost pri polnjenju akumulacij v glavnem v neposredni povezavi z velikimi pregradami (višjimi od 100 m). Medtem pa so manjše pregrade, glede na njihovo veliko število relativno visoka potencialna nevarnost. Zato stroka predlaga, da je lokalna mreža seizmoloških postaj vezana le na zelo visoke pregrade, mreža instrumentov za beleženje močnih potresov pa na vse pregrade na potresno aktivnih območjih. Zato bodo v nadaljevanju prikazani le nekateri od splošnih principov za instrumentiranje pregrad z instrumenti za beleženje močnih potresov.

Potresno opazovanje pregrade in akumulacije se načrtuje, projektira, izvaja in organizira za vsak objekt posebej. Pri tem je obvezno, da se projekt opazovanja seizmičnosti izdelava na osnovi zahtev pravilnika in morebitnih podrobnejših raziskav lokacije pregrade.

Opazovanje seizmičnosti

Sestavni del ocene potresne nevarnosti območij in lokacij pregradnih objektov je opazovanje seizmičnosti pregradnih objektov. Poleg tega je to opazovanje bistveno za presojo potresne odpornosti objektov. Tako dobljeni podatki omogočajo smotrne projektne odločitve pri novogradnjah, pri obstoječih pregradah pa omogočajo čim stvarnejše odločitve pri popravilih ali ojačevanjih po morebitnih poškodbah zaradi potresov. Zapisi dejanskih potresov nam pomenijo edine prave rezultate. Tako dobljene rezultate uporabljamo za presojo projektnih obtežb, obnašanja in celovito oceno varnosti pregrad (Fajfar, Zadnik, 1996).

Na osnovi Pravilnika o tehničnih normativih za seizmično opazovanje visokih pregrad (UL SFRJ 6/88) in Zakona o varstvu okolja (UL RS 32/93) smo se zato v Sloveniji odločili, da je za zagotavljanje varnosti pregrad potrebno nadaljevati z njihovim potresnim opazovanjem. Pri pripravi pravilnika so bile uporabljene tudi izkušnje drugih držav. Izkušnje s potresnim opazovanjem imajo med drugimi v Avstraliji, Avstriji, Kanadi, Italiji, Japonski, Švici in ZDA.

Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velikih pregrad objavljen v Uradnem listu RS št. 92 leta 1999, predpisuje:

- način opazovanja inducirane seizmičnosti, ki jo povzroča voda v zbiralniku, zajezena z veliko pregrado,
- način opazovanja dinamičnega obnašanja telesa in temelja velikih pregrad, zbiralnikov oziroma prostora za njimi ter prostega površja v njihovi neposredni bližini ob delovanju potresov,
- tehnične normative seizmoloških instrumentov in normative za njihovo vzdrževanje in
- pogoje, ki jih mora izpolnjevati izvajalec opazovanja vpliva seizmičnosti na velike pregrade.

Velika pregrada (v nadaljnjem besedilu: pregrada) po tem pravilniku je:

- vsaka pregrada, ki je višja od 15 metrov ali
- vsaka pregrada med 10 in 15 metri višine, ki izpolnjuje vsaj enega od naslednjih pogojev:
 - dolžina krone ni manjša od 500 metrov,
 - vsebina zbiralnika, ki ga ustvari pregrada, ni manjša od enega milijona kubičnih metrov,
 - maksimalna visoka voda, ki vpliva na pregrado, ni manjša od 2000 kubičnih metrov na sekundo,
 - pregrada je imela težke pogoje temeljenja in
 - pregrada je neobičajna konstrukcija.

Višina pregrade je opredeljena v skladu s privzeto terminologijo velikih pregrad, in sicer se višina pregrade meri od najnižje točke temeljenja do vrha pregrade. Namen pravilnika je zagotoviti opazovanje inducirane seizmičnosti in opazovanje dinamičnega obnašanja pregrade.

Pri tem pomeni:

- opazovanje inducirane seizmičnosti zaznavanje in zapisovanje sprememb potresne dejavnosti, ki nastajajo zaradi vode v zbiralniku, zajezene v prostoru za veliko pregrado,

- opazovanje dinamičnega obnašanja pregrade pa zaznavanje in zapisovanje odziva telesa in temelja pregrade ter prostega površja okoli nje na potres.

Zavezanec za zagotovitev opazovanja inducirane seizmičnosti in opazovanja dinamičnega obnašanja pregrad je po pravilniku lastnik pregrade. Zavezanec za postavitev instrumenta oziroma instrumentov za opazovanje inducirane seizmičnosti (seizmograf) in instrumentov za opazovanje dinamičnega obnašanja pregrade (akcelero graf) je prav tako lastnik pregrade. Zavezanec za zagotavljanje izvajanja obratovalnega monitoringa je upravljalec pregrade.

Inducirana (trigerirana/prožena) seizmičnost

Pojav potresov, ki so povezani s človeško dejavnostjo, imenujemo inducirana ali, bolj pravilno, trigerirana seizmičnost. Le-ta se manifestira v širokem prostorsko-časovnem in energetskem razponu: od mikropotresov v neposredni bližini vira sprememb do rušilnih potresov z žariščem na globini večji od deset kilometrov.

Poznamo več vzrokov za inducirano (trigerirano) seizmičnost. Najbolj pogosti so:

- vodna zajetja,
- injektiranje tekočin ali plinov v Zemljino notranjost,
- črpanje nafte in plina,
- rudarjenje in kamnolomi,
- črpanje geotermalne energije,
- podzemni jedrski poskusi.

Potresi, ki so sproženi z vodnimi zajetji, sodijo med močnejše. Do sedaj je nedvomno ugotovljen in dokumentiran pojav sprememb potresne aktivnosti na vsaj 120 vodnih zajetjih. Najmočnejši so bili:

- Koyna, India, 10. 12. 1967, $M = 6,5$
- Kremasta, Grčija, 05 .02. 966, $M = 6,3$
- Kariba, Rodezija-Zambija, 23. 09. 1963, $M = 5,8$

V vseh teh primerih je bila globina vode večja od 80 m. Enostavna statistika poda, da je vsako petdeseto vodno zajetje z globino vode večjo od 80 m sprožilo potres magnitude 5,7 ali več.

Sloveniji najbližja primera sta v Piave de Cadore (Italija), kjer je 13. 01. 1960 nastal potres, in Vajont v Italiji s potresi magnitude okoli 3.

Čeprav je raziskanost teh pojavov in znanje o njihovih vzrokih (zaenkrat) precej pomanjkljivo, je precej verjetno, da potresov ne povzroča človeška dejavnost. V območju, kjer taki potresi nastajajo, morajo obstajati tektonsko ugodni pogoji za nastanek potresov in spremembe seizmičnosti.

Zaenkrat sta ugotovljena dva možna mehanizma, ki lahko sprožita spremembo naravne seizmičnosti. V obeh primerih gre za motnje v naravnem napetostnem stanju. Teža vode v zajetju izvaja dodaten pritisk v vertikalni smeri. Potresi, sproženi s tem mehanizmom, so praviloma šibkejši (ker je masa vode tudi pri največjih zajetjih relativno majhna v primerjavi z maso kamnine pod zajetjem) in se pojavljajo kmalu (nekaj dni ali mesecev) po začetku polnjenja zajetja na majhnih globinah (do 3 km) in v neposredni bližini. Zelo pogosto je število potresov povezano z višino vode ali s hitrostjo polnjenja in praznjenja zajetja. V določenih pogojih je sprememba taka, da se naravna seizmičnost zmanjša. Tako je v pogojih, kjer je največja napetost vertikalna ali ima strm vpad, pričakovati pojav novih

potresov (območja, v katerih prevladujejo normalni in zmični prelomi), ker teža vode poveča naravne napetosti. V območjih, v katerih je največja napetost horizontalna, je pogost pojav zmanjšanja naravne seizmičnosti, ker teža vode deluje nasprotno od naravnih pogojev.

Drugi mehanizem je povečanje pornega pritiska podzemnih voda, ki zmanjšuje upor kamnine ob prelomu proti zmičnim napetostim. Potresi, proženi na ta način, nastajajo v večjih globinah (tudi več kot 10 km), lahko tudi na večjih oddaljenostih (nekaj deset kilometrov) od vodnega zajetja. Ker voda potrebuje precej časa, da prodre do globin (odvisno od permeabilnosti kamnin), se taki potresi lahko prvič pojavijo tudi več let po polnjenju (do 20 let). Potresi večjih magnitud nastajajo ob večjih prelomih. Vodne zajezitve so praviloma v rečnih dolinah, ki so nastale z erozijo v območjih z aktivno tektoniko in jih večinoma sekajo številni prelomi, ali so ob njih celo nastale.

Dinamika pojava trigerirane seizmičnosti je lahko različna. Zaenkrat so spoznali nekaj »tipičnih« obnašanj:

- potresi takoj po polnjenju (najbolj pogosti) so povezani s spremembo nivoja vode in se včasih prenehajo ponavljati po nekaj letih,
- stalni potresi (redkejši pojav) kažejo na stalno spremembo seizmičnosti,
- seizmičnost v kraških območjih, ki je včasih tudi v povezavi z zelo majhnimi zajetji,
- aseizmična zajetja, pri katerih pride do zmanjšanja potresne aktivnosti in
- mešana zajetja, v katerih s časom pride do prehoda iz enega tipa v drugega.

Pojav inducirane seizmičnosti je nevarnost tako za sam jez kakor tudi za okolico. V primeru močnejšega potresa lahko pride do poškodb pregrade in iztekanja vode ali do plazov v vodno zajetje, ki hitro dvignejo vodno gladino in sprožijo vodni val. Tveganju so posebej izpostavljena območja z nizko naravno seizmičnostjo, kjer pregrade niso projektirane za močnejše potrese, kot je to praviloma v območjih z visoko seizmičnostjo in močnimi potresi v preteklosti.

Poznavanje problema inducirane seizmičnosti v vodnih zajetjih je pomanjkljivo in ni možno z gotovostjo trditi, da bi bilo kakšno vodno zajetje kjerkoli na svetu varno pred možnostjo induciranih potresov. Kontinuirano spremljanje potresne aktivnosti v bližini vodnega zajetja pripomore k boljšemu razumevanju pojava trigerirane seizmičnosti in mehanizmov, ki jo povzročajo, kot tudi tektonskih pogojev, v katerih je ta pojav bolj ali manj verjeten. Za opazovanje šibkih potresov je nujna uporaba občutljivih instrumentov v neposredni bližini, da lahko ugotovljamo nastanek potresov in ga skušamo korelirati z drugimi parametri (višina vode, hitrost sprememb nivoja vode ...). Za vse do sedaj ugotovljene močne trigerirane potrese je ugotovljeno, da so sledili številnim manjšim potresom. Opazovanje trigeriranih potresov je specifično področje seizmologije, v katerem se strokovnjaki strinjajo, da je napovedovanje potresov mogoče. Nekateri avtorji so celo mnenja, da je trigerirano seizmičnost mogoče kontrolirati z režimom delovanja vodne pragrae.

Opazovanje inducirane seizmičnosti se mora izvesti na pregradah, katerih višina je večja od 40 metrov, in sicer:

- pregrada, katere višina je večja od 100 m, mora imeti na prostem površju v oddaljenosti do pet kilometrov od obale zbiralnika lokalno mrežo najmanj treh seizmografov,
- pregrada, katere višina je med 40 in 100 m, mora imeti na prostem površju v oddaljenosti do pet kilometrov od obale zbiralnika najmanj en seizmograf.

Za zagotovitev optimalnega zaznavanja in zapisovanja ter določanja parametrov lokalnih potresov je potrebno izdelati poseben projekt, v katerem se določi lokacije

seizmografov, vrsto opreme in način njene postavitve. Posebni projekt odobri ministrstvo, pristojno za varstvo okolja. Ta posebni projekt je sestavni del projekta za pridobitev dovoljenja za poseg v prostor za graditev pregrade.

Lastnik pregrade mora zagotoviti začetek opazovanja inducirane seizmičnosti najmanj tri leta pred začetkom polnjenja zbiralnika oziroma prostora za pregrado ter zagotavljati to opazovanje najmanj deset let po (prvi) zapolnitvi do kote polnitve, določene s projektom za pridobitev dovoljenja za poseg v prostor za graditev pregrade.

Ministrstvo lahko po preteku predpisane dobe na predlog zavezanca odloči, da opazovanje inducirane seizmičnosti preneha, če iz analize z opazovanjem dobljenih podatkov izhaja, da se seizmičnost ozemlja, na katerem stoji pregrada, zaradi pregrade ni spremenila. V pravilniku je opredeljena oprema seizmografov.

Opazovanje dinamičnega obnašanja pregrade

Zahteve pravilnika:

- za pregrade z višino 60 ali več metrov mora biti postavljena mreža najmanj štirih akceleroagrafov, od katerih je eden v temelju, dva v telesu pregrade, eden pa na prostem površju,
- za pregrade višine od 30 do 60 metrov mora biti postavljena mreža najmanj treh akceleroagrafov, od katerih je eden v temelju, eden v telesu pregrade, eden pa na prostem površju,
- za druge pregrade morata biti postavljena najmanj dva akceleroagrafa, od katerih je eden v temelju pregrade, drugi pa na prostem površju.

Vsi akceleroografi, postavljeni na posamezni pregradi, morajo biti povezani v enoten sistem merjenja in zbiranja podatkov o opazovanju dinamičnega obnašanja pregrade. Pravilnik predpisuje opremo akceleroagrafa in sestavine oz. lastnosti.

Namestitev instrumentov

Instrumenti na prostem površju

Zapisujejo potresno nihanje tal, na katero ne vpliva obstoj pregrade in vodnega zajetja. Prikazujejo nihanje, ki bi bilo na območju pregrade, če le-te ne bi bilo. Instrumenti morajo biti postavljeni čim bližje pregradi, vendar dovolj daleč, da lahko zanemarimo vpliv objekta na zapise. Ta oddaljenost naj bi bila enaka dvojni višini pregrade.

Instrumenti v temelju pregrade

Te instrumente instaliramo na značilna temeljna tla. Lokacijsko se postavljajo v celice na betonskih temeljih, ki omogočajo povezavo z osnovno hribino, na kateri stoji pregrada.

Instrumenti v/na telesu pregrade

S temi instrumenti se meri odziv konstrukcije. Osnovno mesto je na največji višini pregrade, kjer pričakujemo največje pomike objekta.

Zagotavljanje opazovanja

Opazovanje inducirane seizmičnosti in dinamičnega obnašanja pregrade lahko za zavezanca iz pravilnika izvaja pravna ali fizična oseba, ki ima pooblastilo ministrstva, pristojnega za varstvo okolja. Pooblastilo navedenega ministrstva lahko pridobi pravna ali fizična oseba, ki ima registrirano geofizikalno ali drugo ustrezno dejavnost opazovanja, meritev in kartiranja (seizmološki opazovalec).

Ministrstvo izda pooblastilo ob izpolnjevanju pogojev iz pravilnika v obsegu, za katerega zavezanec oziroma oseba zaprosi, in sicerglede na vrsto in obseg izvajanja opazovanja.

Seizmološki opazovalec mora za pridobitev pooblastila izpolnjevati naslednje pogoje:

- da je gospodarska družba, zavod ali samostojni podjetnik,
- da ima sedež v Republiki Sloveniji.

Seizmološki opazovalec dobi pooblastilo na podlagi vloge pri ministrstvu, pristojnem za varstvo okolja. Vloga mora vsebovati podatke o prosilcu ter navedbo vrste in obsega izvajanja seizmološkega opazovanja, za katerega prosilec želi pooblastilo.

Seizmološkemu opazovalcu se lahko izda pooblastilo za največ šest let. Pooblastilo se lahko obnovi na podlagi ponovne vloge prosilca, če izpolnjuje pogoje, določene v 26. členu tega pravilnika.

O opazovanju inducirane seizmičnosti ter opazovanju dinamičnega obnašanja pregrade med potresi je seizmološki opazovalec dolžan vsako leto izdelati letno poročilo v predpisani obliki, najkasneje do 31. marca za preteklo leto.

Seizmološki opazovalec je dolžan ob vsakem potresu, pri katerem vršni pospešek na prostem površju preseže vrednost 5 odstotkov zemeljskega pospeška, pripraviti posebno poročilo, ki mora vsebovati vse izvirne registracije potresnega nihanja in pripadajočo obdelavo. To poročilo je potrebno dostaviti ministrstvu, pristojnem za varstvo okolja, v roku 30 dni po dogodku. Poročila mora zavezanec hraniti deset let. Nadzor nad izvajanjem tega pravilnika opravljajo inšpektorji, pristojni za varstvo okolja.

Zavezanci za izvajanje seizmološkega opazovanja morajo za obstoječe pregrade zagotoviti opazovanje v skladu s tem pravilnikom najkasneje v enem letu po njegovi uveljavitvi. V enakem roku morajo zavezanci uskladiti z določbami pravilnika tudi obstoječe sisteme seizmološkega opazovanja, ki so bili postavljeni po Pravilniku o tehničnih normativih za seizmično opazovanje visokih vodnih pregrad (Uradni list SFRJ številka 6/88).

Ne glede na določbe 8. člena tega pravilnika morajo zavezanci zagotoviti tudi opazovanje inducirane seizmičnosti za pregrade iz 5. člena tega pravilnika. To opazovanje mora trajati najmanj tri leta, po preteku tega časa pa lahko preneha ob predpisanih pogojih in po predpisanem postopku.

Potres potresnega opazovanja

Za učinkovito in zanesljivo spremljanje seizmičnosti lokacije pregrade in dinamičnega obnašanja same pregrade je potrebno izdelati poseben projekt izvajanja potresnega opazovanja pregrade.

Osnovni parametri za izdelavo takšnega projekta so razdeljeni v dve skupini:

- globalni parametri, ki jih definira pravilnik, in
- parametri, ki so opredeljeni z lokacijo in samo konstrukcijo pregrade.

Prva skupina parametrov je opredeljena v navedenem pravilniku. Kot taki morajo biti upoštevani v projektu potresnega opazovanja.

Parametri druge skupine se definirajo za vsako pregrado posebej in so odvisni od:

- režima seizmičnosti v mikro in makro regiji,
- dinamičnih karakteristik lokalnih tal,
- načina temeljenja,
- tipa pregrade in temeljenja,
- dinamičnih karakteristik pregrade,
- interakcije tla – temelj pregrade,

- geometrijskih značilnosti pregrade,
- možnosti izvedbe opazovanja in
- površine akumulacije.

Vsi navedeni parametri imajo parcialen in interaktiven učinek na dinamične značilnosti obnašanja pregrad. Te značilnosti, ki imajo velik vpliv na potresno opazovanje, se na pregradah običajno opredeljujejo z dinamično analizo na matematičnem modelu pregrade ali pa z raziskavami na pregradah z metodo vsiljenih vibracij ali z ambientnimi vibracijami. Tako se dobijo:

- lastne (naravne) frekvence,
- koeficient dušenja konstrukcije in
- nihajne oblike pregrade.

Na osnovi analize dobljenih rezultatov se izdelava projekt za potresno opazovanje, s katerim se definira:

- optimalni sistem potresnega opazovanja,
- lokacije instrumentov, ki bodo instalirani v telesu pregrade in
- tip seizmoloških instrumentov s karakteristikami, ki ustrezajo zahtevam Pravilnika o opazovanju seizmičnosti na območju velikih pregrad in z možnostjo njihovega telemetričnega povezovanja.

Priporoča se, da je posebej izdelan projekt telemetrične povezave postavljenih instrumentov s središčem za opazovanje pregrade.

Tako pridobljeni podatki imajo več pomenov, med katerimi posebej poudarjamo:

- verifikacijo vhodnih seizmičnih parametrov, na osnovi katerih so bili projektirani pregrada in pripadajoči objekti,
- možnost kontrole – analize nivoja potresne odpornosti pregrade glede na dobljene zapise,
- analizo učinkov akumulacije na seizmični režim v bližnji okolici,
- optimizacijo postopkov projektiranja bodočih pregrad.

Za potrebe instrumentiranja pregrad v Sloveniji so bili v letih 2003 in 2004 izdelani projekti za opazovanje posameznih pregrad.

Vsi navedeni parametri in kriteriji so bili upoštevani pri izdelavi projektov opazovanja seizmičnosti na pregradah Savskih, Dravskih in Soških hidroelektrarn. Pri izdelavi in ocenjevanju projektov so bile ugotovljene nekatere nedoslednosti in pomanjkljivosti v Pravilniku o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade, ki so bile kasneje odpravljene (ali pa so v fazi odpravljanja).

Stanje v Sloveniji

Seizmološko opazovanje pregrad v Sloveniji ima relativno dolgo zgodovino. Prvi instrumenti za beleženje močnih potresov (SMA-1, Kinematics, ZDA) so bili postavljeni na pregradah Soških elektrarn. Na HE Dobljar so bili instalirani koncem osemdesetih let prejšnjega stoletja, nekaj let kasneje pa na pregradi HE Solkan.

Zatem sta bili instrumentirani pregradi HE Fala in HE Zlatoličje na Dravi. V sredini devetdesetih je bilo začeto tudi seizmološko opazovanje na pregradi HE Moste.

V tem času je postavitve, vzdrževanje in obdelavo podatkov v Sloveniji opravljal IZIIS (Inštitut za potresno inženirstvo in inženirsko seizmologijo, Skopje, Makedonija).

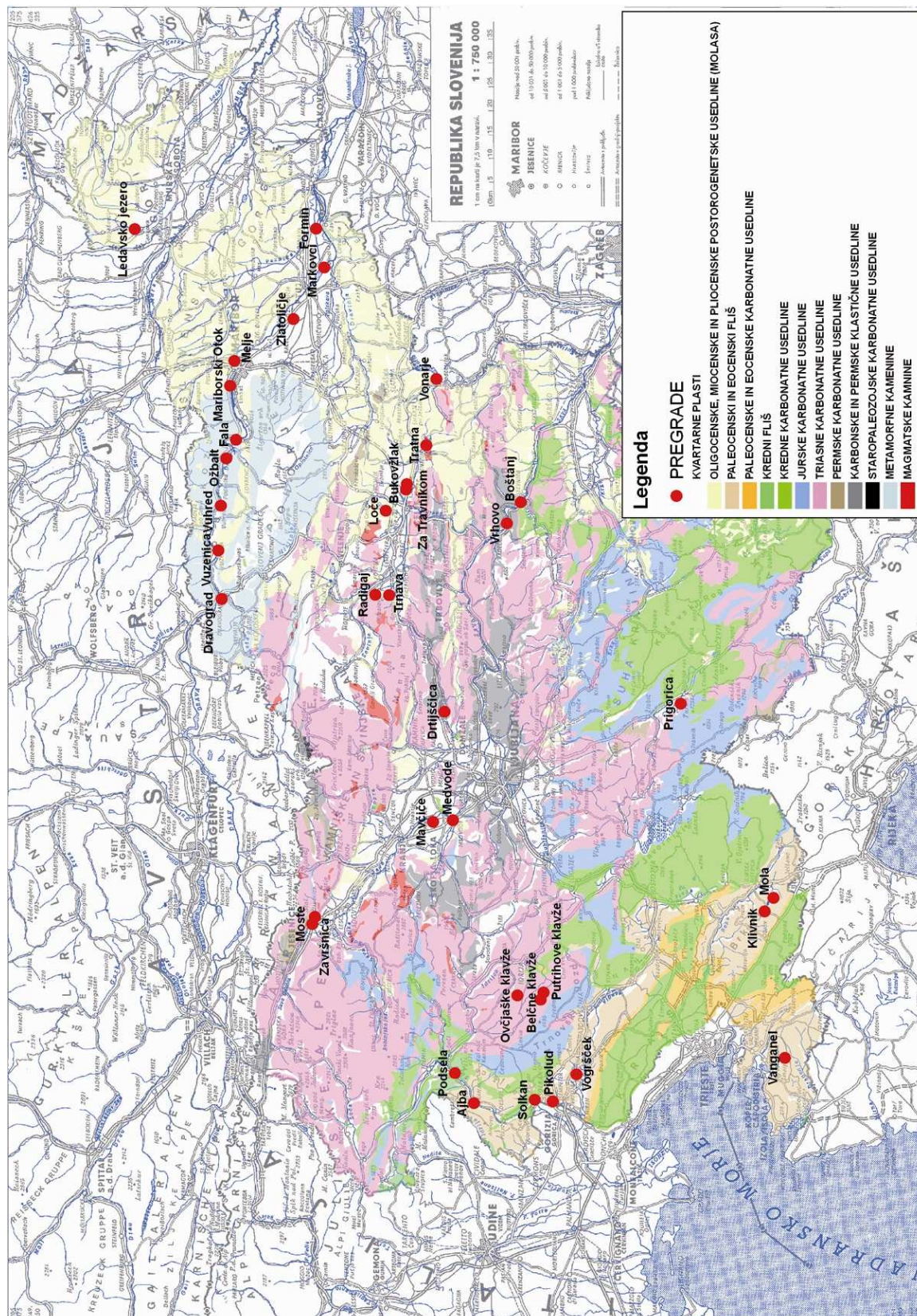
Na tem mestu bi poudarili, da so bili v tistem obdobju (do leta 1998) instrumenti postavljeni na osnovi takratnih svetovnih znanstvenih in strokovnih znanj ter izkustev na področju seizmološkega opazovanja pregrad in v skladu z zahtevami Pravilnika o tehničnih normativih za opazovanje visokih pregrad (UL SFRJ 6/1988). Novejšemu slovenskemu pravilniku žal tisto opazovanje ni ustrezalo, ker Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velikih pregrad (UL RS 92/99) zahteva instrumente nove generacije.

V letu 2009 se seizmološko opazovanje v skladu z veljavno zakonodajo izvaja na 17 pregradah:

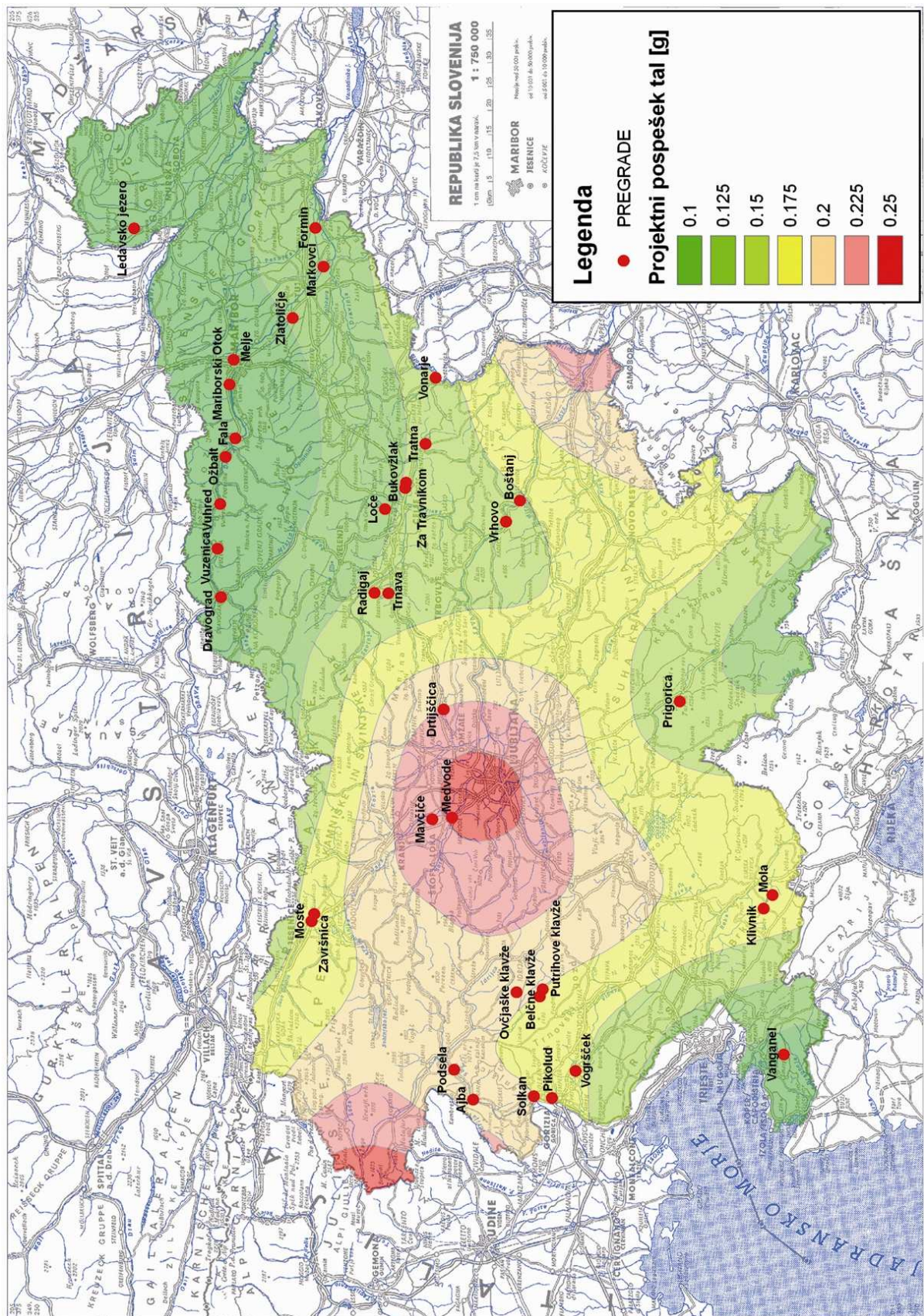
- Podsela – HE Dobljar (Soča),
- Ajba – HE Plave (Soča),
- Solkan – HE Solkan (Soča),
- Mavčiče (Sava),
- Moste (Sava),
- Medvode (Sava),
- Vrhovo (Sava),
- Dravograd (Drava),
- Vuzenica (Drava),
- Vuhred (Drava),
- Ožbalt (Drava),
- Fala (Drava),
- Mariborski otok (Drava),
- Zlatoličje (Drava),
- Markovci (Drava),
- Formin (Drava),
- Vogršček (Vogršček).

	PREGRADA	IME ZAJEZITVE	LETO IZGRADNJE	KONSTRUKTIVNA VIŠINA (m)	HIDRAVLIČNA VIŠINA (m)	DOLŽINA KRONE (m)	PROSTORNINA ZAJEZITVE (1000m ³)	DOLŽINA ZAJEZITVE (km)	VELIKA PREGRADA	ŠTEVILO AKCELEROGRAFOV	ŠTEVILO SEIZMOGRAFOV
1	Dravograd		1942	23,0	8,9	180	7000	10,0	da	2	
2	Vuzenica		1952	34,0	13,8	191	14200	12,0	da	3	
3	Vuhred		1956	33,0	17,4	167	19300	13,0	da	3	
4	Ožbalt		1960	33,0	17,4	167	12880	13,0	da	3	
5	Fala		1928	34,0	14,6	248	4095	8,0	da	3	
6	Mariborski otok		1943	33,0	14,2	184	18700	16,0	da	3	
7	Melje		1977	17,0	8,2	160	4600	6,0	da	2	
8	Zlatoličje		1968	54,0	24,8	50		17,0	da	3	1
9	Markovci	Ptujsko jezero	1968	19,0	11,5	120	23000	6,0	da	2	
10	Formin		1977	49,0	29,0	49		8,0	da	3	1
11	Moste		1952	59,6	48,0	52	6240	5,0	da	3	1
12	Završnica		1914	15,0		32	135	1,0	da	2	
13	Mavčiče		1986	38,0	17,5	118	10700	7,0	da	3	
14	Medvode	Zbiljsko jezero	1953	30,0	21,2	134	7000	6,0	da	3	
15	Vrhovo		1993	24,0	8,1	140	8650	10,0	da	2	
16	Podsela	Doblarsko jezero	1939	55,0		56	5800	8,0	da	3	1
17	Ajba		1940	39,0		72	1600	5,0	da	3	
18	Solkan		1984	35,0	22,0	138	7600	10,0	da	3	
19	Loče	Šmartinsko jezero	1970	16,0	11,0	205	6500	2,0	da	2	
20	Tratna	Slivniško jezero	1975	17,0	13,0	81	4000	2,5	da	2	
21	Račigaj	Braslovško jezero		cca 20 nepr.					da	2	
22	Trnava	Žovneško jezero	1978	13,5	7,5	333	1720	1,5	da	2	
23	Vodnarje	Sotelsko jezero	1980	19,0	13,3	120	12400	6,5	da	2	
24	Prigorica			9,8	7,3	960	8800		da	2	
25	Vogršček		1988	37,0	31,0	200	8500	2,7	da	3	
26	Pikolud		1989	9,5	7,5	250	1000	1,3	ne	0	
27	Klivnik		1987	28,0		252	4300	3,0	da	2	
28	Mola		1979	23,5		90	4300	3,7	da	2	
29	Vanganel		1964	19,0	17,3	130	244	0,2	da	2	
30	Belčne klavže		1769	18,0		35			da	0	
31	Putrihove klavže		1779	15,0		44			da	0	
32	Ovčjaške klavže		1812	16,0		35			da	0	
33	Bukovžlak			41,0		520			da	3	1
34	Za travnikom			49,0		630			da	3	1
	SKUPAJ									76	6

Preglednica 1 - Seznam pregrad v Sloveniji.



Slika 2. Lokacije velikih pregrad v Sloveniji na geološki karti



Slika 3. Lokacije velikih pregrad v Sloveniji na karti potresne nevarnosti.

Dobljeni rezultati

Od pričetka izvajanja opazovanja pregrad v Sloveniji in širše na območju tedanje Jugoslavije se je zgodilo nekaj močnih potresov ($M \geq 5,5$) in več zmernih potresov ($M \geq 3,0$). Pri tem je bilo pridobljenih več zapisov, katerih rezultati so bili neposredno uporabljeni v vsakodnevni inženirski praksi – pri projektiranju, sprejemu odločitev o možnosti nadaljnje uporabe pregrade itd.

Potres 12. 4. 1998 v Zgornjem Posočju z magnitudo $M = 5,6$ je bil zabeležen na pregradah HE Doblar, HE Solkan in HE Moste.

Ob tem poudarjamo, da je to le majhen del izbranih podatkov, ki imajo za cilj ilustrirati rezultate, ki so dobljeni s seizmološkim opazovanjem pregrad.

Zaključek

Stanje seizmološkega opazovanja pregrad v Sloveniji je relativno dobro. V zadnjem času se je na posamezne pregrade namestila nova oprema, kar je bistveno izboljšalo stanje – še vedno pa se opazovanje seizmičnosti na velikih pregradah ne izvaja v skladu zahtevami veljavne zakonodaje. Seizmološko opazovanje se izvaja na 17 pregradah od skupno 31 velikih pregrad, na katerih bi ga bilo potrebno izvajati.

Seizmološko opazovanje pregrad je vedno aktualen problem v potresnem inženirstvu. Rezultati pridobljeni z obdelavo zapisov dajo velik doprinos eksperimentalnim in analitičnim študijam dinamičnega obnašanja pregrad. Vse to vpliva na optimizacijo procesa projektiranja in izgradnjo potresno odpornih pregrad.

Število instrumentov na pregradah, ki so postavljene na potresno aktivnih območjih je relativno majhno (v svetovnih razmerah) in bo še dolgo nezadostno za popolno definiranje obnašanja konstrukcij – to je za definiranje odziva pregrade na potres. Zato je izjemno pomembno, da se iz relativno malega števila instrumentov pridobi največje možno število informacij. Nujni pa so napor, da se lastniki pregrad zavedajo svoje odgovornosti za opremljanje obstoječih pregrad.

Povečanje števila opazovanih pregrad je posebej pomembno za nove pregrade (nove tehnologije, novi pristopi k projektiranju, novi materiali). Čim prej je potrebno dobiti odziv na novosti, ki se ga lahko uporabi pri naslednjih pregradah. Prav tako pa je potrebno poudariti, da so stroški te opreme pri novih pregradah zanemarljivi glede na celotno investicijo.

Pri pripravi projekta za potresno opazovanje smo ugotovili nekatere nedoslednosti in napake v Pravilniku o opazovanju seizmičnosti na območju velikih pregrad. Posebej izstopata:

- Število instrumentov na pregradah je vezano le na višino pregrade. Ostali odločujoči parametri niso upoštevani, čeprav imajo lahko bistven vpliv na določitev minimalnega števila instrumentov na telesu pregrade. Vpliv ostalih parametrov se lahko doda vsaj kot priporočilo pri pripravi projektne dokumentacije.
- Problem pregrad v nizu (Sava, Soča, Drava) ni obdelan. Rešitev tega problema je vezana na ekonomske aspekte seizmološkega opazovanja.

Literatura

Fajfar, P., Zadnik, B., 1996. Strokovne podlage za pravilnik o seizmološkem monitoringu velikih pregrad. Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Ljubljana.

- Godec, M., Vidrih, R., 2003. Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad, 5. posvetovanje SLOCOLD, Aktualne teme v pregradnem inženirstvu: seizmika in velike pregrade, 61-77, Ljubljana.
- Godec, M., Sinčič, P., Vidrih, R., 2004. Opazovanje seizmičnosti na območju velikih pregrad, UJMA 17-18, 208-217, Ljubljana.
- Huber, B., 1995. Earthquake Induced Damage to Dams – Classification and Statistical Evaluation. University of Technology Vienna, Vienna.
- Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade (UL RS 92/1999, UL RS 44/2003).
- Pravilnik o tehničnih normativih za opazovanje visokih pregrad (UL SFRJ 6/1988).
- Mihailov, V. 1985. Yugoslav Strong Motion Network, Physics of the Earth and Planetary Interiors 3:110-122. Elsevier Science Publishers B.. Amsterdam.
- Mihailov, V. 1990. Yugoslav Strong Motion Network- Some Experience and Results. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Volume 1, pp. 41-51, Walferange, Luxembourg.
- Mihailov, V., Trnkoczy A., 1990. Instalation of Network of Instrument for Recording of induced Seismicity and Dynamics Behavior of Body Dams. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. Volume 1, pp. 103-112, Walferange, Luxembourg.
- Zadnik, B., 1997. Tehnični slovar za pregrade. Slovenski nacionalni komite za velike pregrade, str. 425, Ljubljana.