

# ANALIZA VARNOSTNEGA STANJA NA OBMOČJU DOLVODNO OD PREGRADE LOČE

## ANALYSIS OF THE SAFETY LEVEL OF THE DOWNSTREAM AREA OF LOČE DAM

### Stanislav Lenart

doc. dr., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, Ljubljana, stanislav.lenart@zag.si

### Matjaz Četina

prof. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana, matjaz.cetina@fgg.uni-lj.si

### Andrej Širca

dr., IBE, d. d., svetovanje, projektiranje in inženiring, Hajdrihova ulica 4, Ljubljana, andrej.sirca@ibe.si

### Mojca Ravnikar Turk

mag., Zavod za gradbeništvo Slovenije, Dimičeva ulica 12, Ljubljana, mojca.turk@zag.si

### Jože Papež

mag., Hidrotehnik, vodnogospodarsko podjetje d. d., Slovenčeva 97, Ljubljana, joze.papez@hidrotehnik.si

### Matija Brenčič

IBE, d. d., svetovanje, projektiranje in inženiring, Hajdrihova ulica 4, Ljubljana, matija.brencic@ibe.si

### Rudolf Rajar

prof. dr., Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova cesta 2, Ljubljana, rudi.rajar@fgg.uni-lj.si

### Povzetek

V okviru projekta VODPREG 2 je bil pripravljen osnutek Navodil za oceno hidravličnih posledic morebitne porušitve pregrade. Na njegovi podlagi je bila narejena vzorčna analiza varnostnega stanja pregrade Loče. Njena malo verjetna, a vseeno mogoča porušitev, je bila analizirana z uporabo modela PCFLOW2D. Za pripravo geometrijskih podatkov je bil uporabljen LIDAR posnetek terena, kote dna Šmartinskega jezera pa so bile z meritvami še dodatno preverjene. Kot način porušitve je bila upoštevana delna porušitev v trenutku. Izračunan je bil celoten časovni potek poplavnega vala, njegove hitrosti in globine poplavnih voda. Točnost izračuna maksimalnih gladin je bila ocenjena na  $\pm 15$  cm (relativna napaka  $\pm 5$  % pri maksimalni globini vode 3 m nad terenom). Izračun je bil narejen pri normalni koti gladine v akumulaciji ( $Z_0 = 265,4$  m n. m.) in dveh nižjih kotah. Kota gladine  $Z_0 = 260,0$  m n. m. je bila prepoznana kot še varna, ki ne ogroža dolvodno ležečih naselij in mesta Celje. V prispevku je opisan tudi potreben obseg hidrološkega in tehničnega monitoringa ter potrebna sanacijska dela za obvladovanje nevarnosti porušitve.

### Abstract

Draft regulations for the assessment of the hydraulic consequences of dam failure were prepared within the VODPREG 2 project. An analysis of the safety level for Loče dam was carried out as a case study based on those draft regulations. The unlikely, but still possible, failure of Loče dam was analyzed using the model PCFLOW2D. The LIDAR records were used for geometric data, while the bottom of Šmartinsko Lake was verified by extra measurements. A partial immediate failure was assumed as the mode of failure. The reach of the flood wave, its speed, and the depth of the floodwater was calculated. The accuracy of the calculation of the maximum water level was estimated to be  $\pm 15$  cm (a relative error of  $\pm 5\%$  in the case of a maximum water depth of 3 m above the ground). The calculation was carried out at normal water level in the reservoir ( $Z_0 = 265.4$  m above sea level) and two lower water levels. A water level of  $Z_0 = 260.0$  m above sea level was identified as a safe level which does not endanger downstream villages or the town of Celje. The article also describes the necessary extent of the hydrological and technical monitoring and required refurbishment works to minimize the risk of dam failure.

## Uvod

Porušitve pregrad so sicer izredno redek, a vseeno možen pojav (Zorn in Hrvatina, 2015; Rak in sod., 2014). Na to nas opozarjajo tovrstni zabeleženi dogodki iz preteklosti (ICOLD, 2012), vendar pa je varnost novih objektov večja, kot je bila v preteklosti. Računalniške simulacije omogočajo bolj poglobljeno projektiranje zahtevnih objektov, načini kontrole kakovosti vgrajevanih materialov pa tudi več védenja o sami izvedbi. Z avtomatizacijo meritev in spremljanjem stanja objektov po gradnji lahko pravočasno načrtujemo vzdrževalna dela in zagotavljamo varnost v celotni življenjski dobi objekta. V prejšnjem stoletju je bila ocenjena verjetnost porušitve  $10^{-4}$  na leto na pregrado (Goubet, 1979), kar pomeni verjetnost porušitve 0,5 % za pregrado s 50-letno življenjsko dobo. Stalno napredovanje inženirskega znanja vpliva tudi na večjo varnost pregrad, zgrajenih v novejšem času, kar potrjujejo tudi statistične raziskave (ICOLD, 2012), zato ni racionalnega razloga, da bi ljudje v dolinah pod pregradami živeli v strahu, soočeni z nesprejemljivim tveganjem.

Vseeno se je treba tveganja zavedati in čim bolj povečati varnost prebivalstva. K temu lahko pripomore tudi ustrezna zakonodaja, ki v večini razvitih držav bolj ali manj podrobno ureja vsebino študij poplavnih valov, ki bi nastali ob morebitnem porušenju pregrade. Te študije morajo biti narejene za obstoječe pregrade in tudi tiste, ki so še v fazi projektiranja. Tudi v Sloveniji smo v okviru projekta VODPREG 2, ki ga je financiralo Ministrstvo za obrambo Republike Slovenije (Lenart in sod., 2016), pripravili osnutek Navodil za oceno hidravličnih posledic morebitne porušitve pregrade. V okviru istega projekta smo kot vzorčni primer ponovno izračunali poplavne valove zaradi morebitne porušitve pregrade Loče, ki zajezuje Šmartinsko jezero nad mestom Celje. Prvi izračuni poru-

šitvenega vala za omenjeno pregrado so bili narejeni že leta 1979 (Rajar, 1979). Za ponovne izračune pa smo se odločili, ker so danes na voljo sodobnejši dvodimenzionalni (2D) matematični modeli in zmogljivi računalniki za izračun vala po ravninskem področju pod pregrado, ker so na razpolago razmeroma točni novejši LIDAR podatki o konfiguraciji terena in ker poplavni val zaradi morebitne porušitve pregrade Loče ogroža dolvodna urbana področja, avtocesto in mesto Celje.

## Pregrada Loče

Akumulacija Šmartinsko jezero s pregrado Loče, zgrajeno v kraju Loče nad naseljem Dobrova, je bila kot umetni večnamenski zadrževalnik zgrajena leta 1970 (Zupančič in Senič, 2008; Četina in sod., 2001). Osnovni namen akumulacije je zadrževanje visokih voda Koprivnice kot pritoka Zahodne Ložnice in Savinje s severne strani mesta Celje, uporablja pa se še za ribištvo, turizem, šport in rekreacijo. Prvotni namen akumulacije je bil ob gradnji tudi zbiranje padavinske vode za takratne potrebe celjske industrije, vendar se za ta namen ni nikoli uporabljala.

Pregrada je tipična zemeljska nasuta pregrada (Slika 1), gradbene višine 16,45 m ter dolžine v kroni pregrade 205 m in širine v kroni 3 m. V pregrado je vgrajenega  $95.649 \text{ m}^3$  materiala. Njen naklon na vodni strani je med  $1 : 2,4$  in  $1 : 3,1$ , na suhi strani pa med  $1 : 2$  in  $1 : 3$ . Pri normalnem obratovalnem nivoju gladine znaša volumen akumulacije  $5,25 \times 10^6 \text{ m}^3$ , ki pa se lahko poveča na maksimalno  $6,50 \times 10^6 \text{ m}^3$ . Pregrada zajezi potok Koprivnica z vodozbirno površino  $12,60 \text{ km}^2$ , za njo pa je približno 113 ha poplavljenih površin. Varnostni preliv ima pri maksimalni koti kapaciteto  $75 \text{ m}^3/\text{s}$ , talni izpust pa  $7 \text{ m}^3/\text{s}$ .



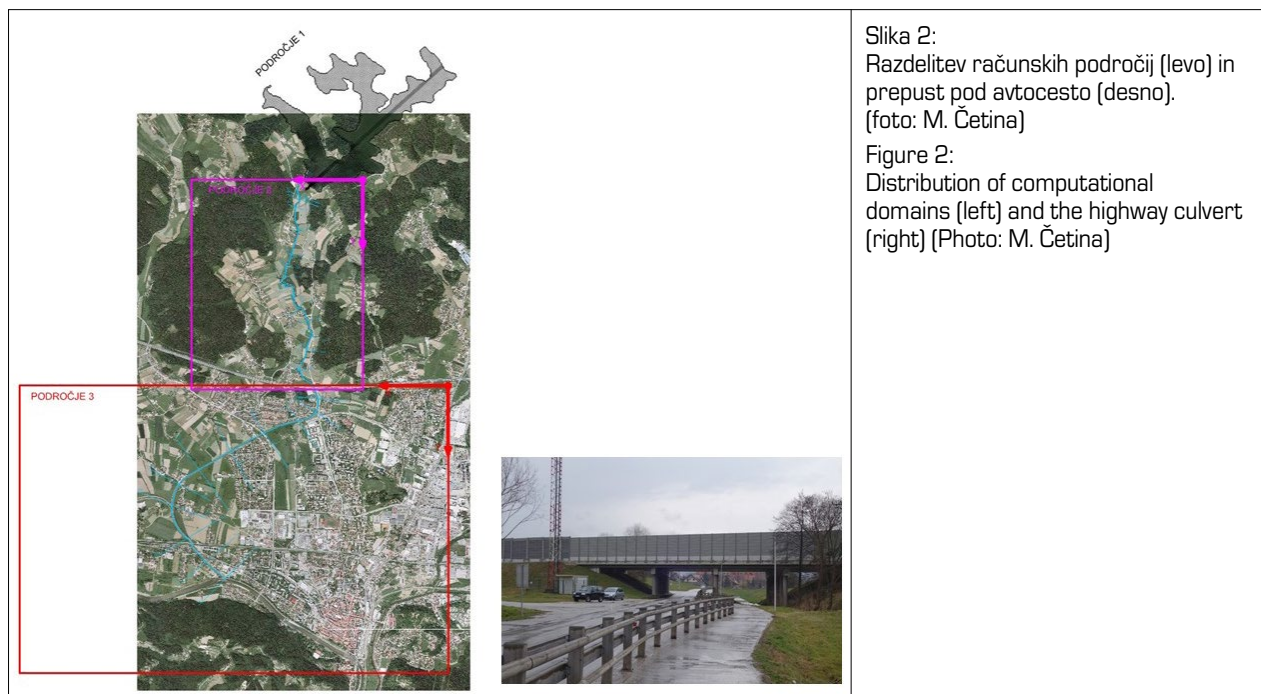
Slika 1: Pogled z desnega boka na krono pregrade Loče. Dolvodna stran telesa pregrade ne kaže površinskih znakov morebitnega puščanja. (foto: A. Širca)

Figure 1: Right side view of the top of Loče dam. No surface evidence of leakage was detected on the downstream side of the dam (Photo: A. Širca)

## Izračun vala zaradi porušitve pregrade

Za izračun valov ob morebitni porušitvi pregrade Loče, kjer se tok vode zaradi razmeroma ravninskega terena poleg v vzdolžni širi tudi v prečni smeri, smo uporabili globinsko povprečni dvodimenzionalen (2D) matematični model PCFLOW2D (Četina in sod., 2001). Povezan sistem kontinuitetne in dinamičnih parcialnih diferencialnih enačb se rešuje numerično z uporabo Patankar-Spaldingove metode končnih volumnov. Osnovne značilnosti metode so premaknjena numerična mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) ter iterativni postopek popravkov globin, znan kot SIMPLE. Za integracijo po času je uporabljena polna implicitna shema.

Za pripravo geometrijskih podatkov smo uporabili LIDAR posnetek površja obravnavanega področja, ki je na razpolago na portalu e-Vode (MOP, 2017) v resoluciji 5 točk



Slika 2:  
Razdelitev računskih področij (levo) in  
prepust pod avtocesto (desno).  
(foto: M. Četina)

Figure 2:  
Distribution of computational  
domains (left) and the highway culvert  
(right) (Photo: M. Četina)

na  $m^2$ , ter ustrezne barvne ortofoto posnetke in TTN podlage. Za kontrolo morebitnih sprememb dna Šmartinskega jezera smo dodatno izmerili dno v približno 40 točkah in ugotovili, da ni izrazitejšega zasipavanja jezera.

Ker gre pri pregradi Loče za nasuto pregrado, ki je glede na stopnjo nevarnosti za dolvodne kraje uvrščena v kategorijo 1, je bila v skladu z usmeritvami v predlogu Navodil (Lenart in sod., 2016) kot način porušitve upoštevana delna trenutna porušitev. Ustrezen hidrogram iztoka na mestu porušenega dela pregrade, kjer pride do kritičnega toka, smo določili z 2D-modelom PCFLOW2D, ki zajema akumulacijo Šmartinsko jezero (Področje 1). Dobljeni hidrogram  $Q(t)$  smo upoštevali kot gorvodni robni pogoj za izračune porušitvenih valov dolvodno od pregrade Loče (slika 2).

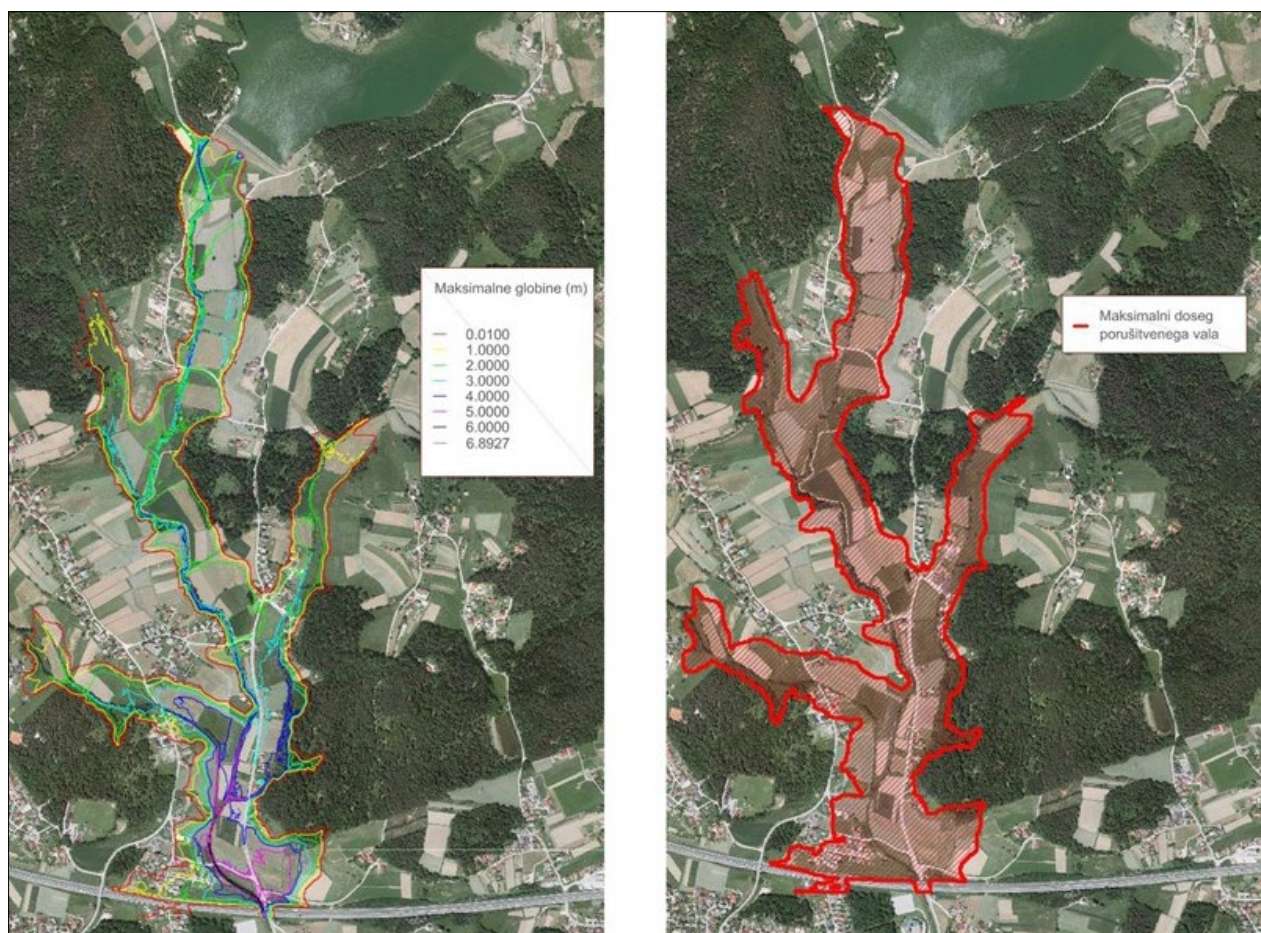
Ker gre za obsežno področje pod pregrado, ki ga moramo pokriti z razmeroma gosto numerično mrežo, smo dolvodno področje razdelili na dva dela (Področje 2 in Področje 3), ki sta med seboj povezana z internim hidravličnim robnim pogojem. Področje 2 zajema območje dolvodno od pregrade Loče do nasipa avtoceste Ljubljana–Maribor. Numerična mreža z velikostjo posamezne celice  $16 m^2$  obsega 611 celic v y smeri vzdolž toka (dolžina 2000 m) in 500 celic v prečni x smeri (širina 2444 m), skupno 305.500 točk pokriva površino  $4.888.000 m^2$ . Področje 3 obsega območje od nasipa avtoceste Ljubljana–Maribor do Savinje. Numerična mreža na tem delu ima velikost celice  $64 m^2$  in obsega 419 celic v y smeri vzdolž toka (dolžina 4992 m) in 625 celic v prečni smeri x (širina 3344 m), skupno 261.875 točk pokriva površino  $16.693.248 m^2$ . Povezava med obema področjema je prepust pod avtocesto, kjer zaradi hude zožitve pride do kritičnega toka in dobljeni hidrogram iztoka  $Q(t)$  iz Področja 2 predstavlja gorvodni robni pogoj za spodnje Področje 3.

Pripravili smo tudi ustrezne hidravlične podatke izračunov. Zaradi primerjave rezultatov sedanjih izračunov z izračuni, opravljenimi v okviru starejše študije (Rajar, 1979), smo upoštevali enak način porušitve pregrade ter začetne in robne pogoje. To pomeni, da blizu najnižje točke dna na vodni strani pregrade, na koti 255,0 m, nastane odprtina, ki ima pri dnu širino 3 m, nad tem pa se pregrada poruši na obe strani pod naklonskim kotom  $1 : 1,5$ . Nastane odprtina trapezne oblike, ki ima pri gladini normalne zaježitve 265,4 m n. m. širino 34,8 m in ploščino  $201 m^2$ . Izdelali smo tri različice izračunov pri normalni gladini zaježitve (265,4 m n. m.) in pri dveh nižjih gladinah (263,0 m n. m. ter 260,0 m n. m.). Pod pregrado smo zaradi majhnega pretoka, ki kot biološki minimum večino časa izteka iz jezera v Koprivnico, upoštevali, da se porušitveni val širi po terenu po suhem dnu. Pri širjenju vala po terenu smo na Področju 2 in Področju 3 upoštevali Manningov koeficient hrapavosti  $n_0 = 0,035 sm^{-1/3}$ , ki deloma zajema tudi vpliv stavb, ki v izračunih niso bile posebej upoštewane kot objekti.

V okviru projekta VODPREG 2 (Lenart in sod., 2016) je bil izdelan tudi program za hiter približni izračun vala (Rajar in sod., 2017; Lenart in sod., 2017), ki bi nastal po porušitvi pregrade.

Za vse slovenske pregrade morajo biti namreč izračuni porušitvenega vala izdelani že ob projektu pregrade, omenjeni približni program pa pride v poštev ob možnih nepredvidenih dogodkih, kot so delna porušitev pregrade, hujska okvara evakuacijskih naprav na pregradi, še najbolj pa v primeru, ko zemeljski plaz zasuje reko in se za nasipom ustvari jezero. Ko se jezero napolni in voda začne nasip prelivati, se ta zaradi erozije vedno razmeroma hitro poruši in nastane lahko nevaren porušitveni val. Prav to se je zgodilo 1. novembra 1990 na potoku Lučnica.





Slika 3: Maksimalne globine (levo) in maksimalni doseg vala (desno) na Področju 2 pri  $Z_0=265,4$  m.  
Figure 3: Maximum depth (left) and maximum flooded area (right) in Področje 2 at  $Z_0 = 265.4$  m

Ta program je vsem, ki se ukvarjajo z vprašanji zaščite, na razpolago pri Ministrstvu za obrambo.

## Poplavna nevarnost zaradi porušitvenega vala

Točnost uporabljenega globinsko povprečnega modela je glede na to, da lahko zajamemo tok v dveh dimenzijah, razmeroma dobra. Vendar posebnega umerjanja modela PCFLOW2D (Četina, 1988) pod pregrado Loče za tako visoke pretoke, kot nastanejo pri porušitvi, nismo mogli opraviti, ker primerljivi poplavni dogodki niso bili zabeleženi. Iz izkušenj z uporabo 2D-modela za tok po poplavnih področjih v primerljivih situacijah točnost izračunanih maksimalnih gladin z modelom PCFLOW2D pri porušitvenih valovih pod pregrado Loče ocenjujemo na  $\pm 15$  cm. To pri maksimalni globini vode nad terenom 3 m pomeni relativno napako  $\pm 5$  %, kar pomeni znatno povečanje točnosti v primerjavi z 1D-modelom, ki je bil za izračun porušitvenih valov za pregrado Loče uporabljen v starejši študiji, njegova točnost je bila ocenjena na 20 do 25 % (Rajar, 1979).

Izdelali smo tri različice izračunov pri normalni gladini zajezitve v akumulaciji ( $Z_0 = 265,4$  m n. m., Primer 1)

in pri dveh nižjih gladinah  $Z_0 = 263,0$  m n. m. (Primer 2) ter  $Z_0 = 260,0$  m n. m. (Primer 3), da bi ugotovili še varno globino, ki ne bi ogrožala dolvodno ležečih naselij in mesta Celje. Tak izračun je zahtevan v osnutku Navodil (Lenart in sod., 2016).

Maksimalna vrednost pretoka pri pregradi v Primeru 1 v prvih trenutkih po porušitvi je  $Q = 1060$  m<sup>3</sup>/s. Val se nato širi po terenu pod pregrado in doseže prepust pod avtocesto na iztoku iz Področja 2 v času  $T = 0,2968$  ure ali 17,80 minut. Maksimalni pretok na mestu prepusta se zmanjša na  $Q = 611$  m<sup>3</sup>/s in je dosežen v času  $T = 1,1033$  ure ali 66,2 minute po porušitvi pregrade.

Vektorji lokalnih hitrosti pri času ene ure ( $T = 1$  h) po porušitvi, ko je prostornina vode na Področju 2 največja, kažejo, da so hitrosti največje na področju pod pregrado (do 5,8 m/s) in na mestu prepusta, kjer dosežejo vrednosti od 5,5 m/s na terenu in do 6,5 m/s v globlji strugi Koprivnice, ki tudi teče skozi prepust. Vmes so hitrosti vala pri širjenju po terenu dolvodno od pregrade okrog 2 m/s, nekoliko višje so le na področju struge Koprivnice, kjer mestoma dosežejo do 3 m/s. Dosežene maksimalne globine vode in maksimalni doseg vala na Področju 2 so razvidne iz slike 3. Globina vode nad terenom je od 1 do 2 m, mestoma tudi do 3 m, še nekoliko večje globine so v strugi Koprivnice, kjer je v



Slika 4: Odzemni objekt je treba sanirati še v delu, ki je trajno potopljen (pod koto 263,50). Sedanji objekt je težko vzdrževati, ker je zelo visok (15 m) in ozek (2 m). (foto: A. Širca)

Photo 4: The permanently submerged part (below elevation 263.50) of the outlet tower needs renovation. The current facility is also difficult to maintain as it is very high (15 metres) and narrow (2 m) (Photo: A. Širca)

spodnjem delu voda globoka med 4 in 5 m. Večinoma se voda razlije po travnikih in kmetijskih površinah, močno ogroženih pa je tudi nekaj hiš vzdolž doline Dobrova ter naselje hiš tik ob severni strani avtoceste zahodno od prepusta (globina vode do 2 m). Največje globine so dosežene pred avtocestnim prepustom (od 4 do maksimalno 6 m v strugi Koprivnice). Na terenu tik gorvodno od avtocestnega nasipa so globine med 2 in 3 m, rezultati tudi kažejo, da pride do manjšega preliivanja avtoceste v višini nekaj cm na razdalji 250 m zahodno od prepusta. Verjetno bi to manjše preliivanje lahko zadržala zgrajena protihrupna ograja ob avtocesti, ki pa večjih hidrostatičnih in dinamičnih pritiskov ne bi zdržala. Razmere na dolvodnem področju Celja (Področje 3), kamor se voda razlije skozi prepust pod avtocesto, kažejo, da voda prelije tako desni kot levi breg Koprivnice. Na desnem bregu bi voda poplavlila naselje Ostrožno, globina vode bi dosegla okrog 1 m. Večje posledice bi imelo preliivanje vode na levem bregu Koprivnice, kjer bi bilo z manjšo globino pod 0,5 m poplavljen naselje Lava, predvsem pa bi se val skozi mestni naselji Nova vas in Dečkovo naselje usmeril proti železniškemu nasipu. Pod podvozi na Kersnikovi ulici in Mariborski cesti bi voda dosegla tudi središče Celja in nabrežje Savinje.

Ker bi tudi nižja gladina vode v akumulaciji  $Z_0 = 263,0$  m n. m. (Primer 2) zaradi poplavljenosti urbanih območij še vedno pomenila precejšnjo nevarnost za dolvodne kraje, smo skušali z nižanjem gladine v akumulaciji določiti še varno gladino, ki ob porušitvi pregrade, npr. zaradi terorističnega dejanja, ne bi več pomenila nevarnosti za izgubo življenja dolvodnih prebivalcev, ker bi bile maksimalne

globine vode nad terenom pod pregrado povsod pod enim metrom oziroma bi bil zmnožek globine in hitrosti manjši od  $1,5 \text{ m}^2/\text{s}$  (Uradni list, RS št. 60/2007). Zato smo pri Primeru 3 predpostavili gladino vode v akumulaciji  $Z_0 = 260,0$  m n. m. Pretok na pregradi  $Q = 249 \text{ m}^3/\text{s}$  se na mestu prepusta zmanjša na  $Q = 156 \text{ m}^3/\text{s}$ . Hitrosti so največje na območju pod pregrado (do  $4,5 \text{ m/s}$ ) in na mestu prepusta, kjer dosežejo vrednosti od  $3,5 \text{ m/s}$  na terenu do  $4,5 \text{ m/s}$  v globlji strugi Koprivnice. Vmes so hitrosti vala pri širjenju po terenu dolvodno od pregrade okrog  $1,2 \text{ m/s}$  in nekoliko višje na področju struge Koprivnice do  $1,5 \text{ m/s}$ . Dosežene maksimalne globine vode nad terenom večinoma ne presegaajo 1 m, razen v strugi Koprivnice, kjer je v spodnjem delu ponekod globina okrog 3 m. Poplavno območje je v primerjavi s primeroma 1 in 2 zmanjšano, večinoma so poplavljeni travniki in kmetijske površine in le še nekaj posameznih hiš vzdolž doline Dobrova (z globino vode okrog  $0,5 \text{ m}$ ). Razmere na dolvodnem območju Celja (Področje 3) so v Primeru 3 znatno izboljšane, saj voda le še v manjšem obsegu prelije desni breg Koprivnice, na levem bregu pa je naselje Lava popolnoma zaščiten.

## Hidrološki monitoring na pregradi in v zaledju

Hidrološki monitoring na pregradi in v zaledju je namenjen predvsem temu, da se lahko na podlagi objektivnih podatkov meritev in opazovanj ob nastanku ekstremno visokih voda čim bolj pripravimo na pravilno ukrepanje. Taka kritična situacija bi recimo lahko nastopila, če bi dotok v Šmartinsko jezero dalj časa presegal dotok s 1000-letno povratno dobo, saj se lahko pri maksimalni koti gladine v jezeru  $266,50$  m n. m. prek varnostnega preliiva odvaja le pretok s 100-letno povratno dobo. Položaj je obvladljiv, če so pregrada in objekti na njej redno in pravilno vzdrževani in vzdrževalec pregrade pravilno ukrepa skladno z obratovalnim pravilnikom. Zato je pomembno, da imajo tudi hidrološka opazovanja na pregradi ter akumulacijskem bazenu in v zaledju odgovorno osebo, tj. vzdrževalca pregrade. Predlagali smo naslednje ukrepe za izboljšavo hidrološkega monitoringa na pregradi in v zaledju:

1. Razširitev spremljanja gladine vode v jezeru na vse dni v tednu (tudi čez konec tedna).
2. Kontinuirana meritev pretokov na dotokih v jezero.
3. Postavitev vsaj dveh dežemernih postaj v zaledju porečja Šmartinskega jezera.
4. Na iztoku iz jezera naj se poleg spremljanja odprtosti ventila za zagotavljanje biološkega minimuma kontinuirano meri tudi pretok in občasno opravijo neodvisne kontrolne meritve le-tega.
5. Med preliivanjem vode prek varnostnega preliiva naj se na prelivu kontinuirano meri pretok.
6. Na vsakih pet let (nujno vsaj na vsakih deset let) naj se izvedejo meritve dna Šmartinskega jezera, da se lahko spremlja proces morebitnega zasipavanja dna in posledično zmanjševanja volumna jezera.



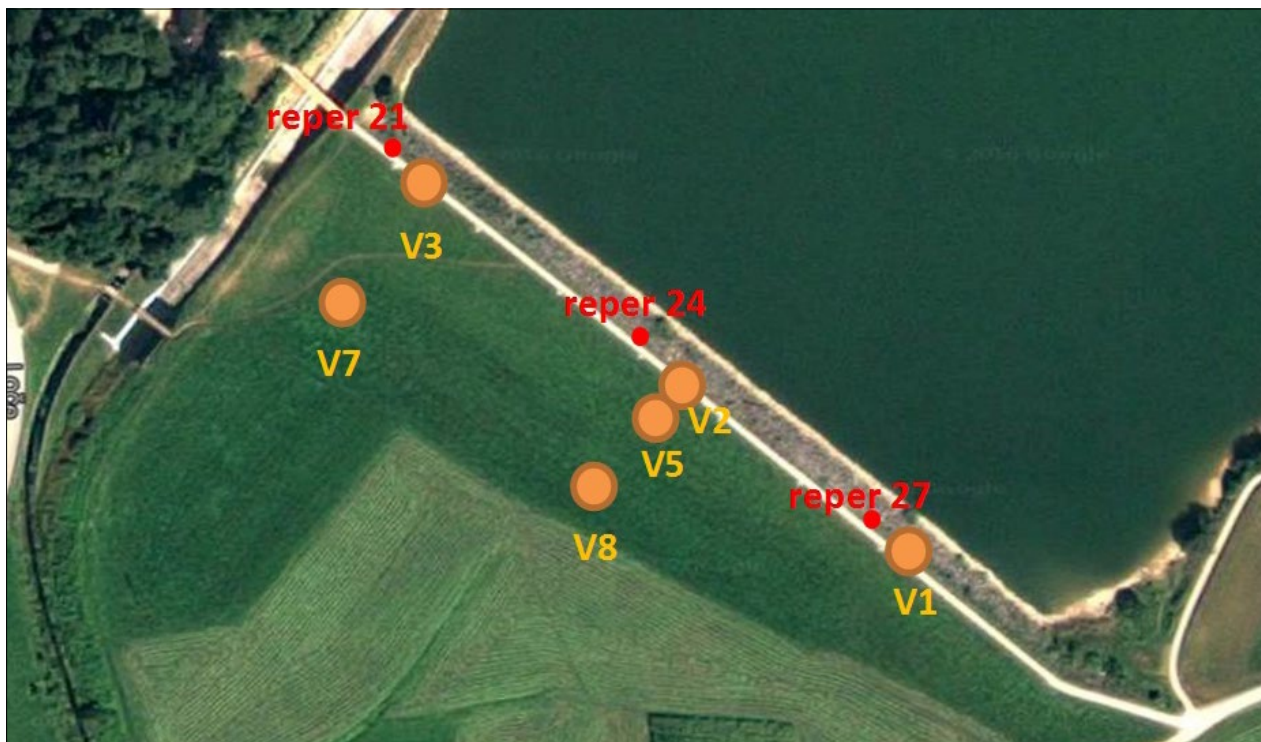
## Predlog sanacijskega programa

V okviru projekta VODPREG je bil leta 2012 pripravljen prvi predlog sanacijskega programa, ki je upošteval tudi vse dotedanje predloge upravljavca in projektanta pregrade. V letih do zaključka projekta VODPREG 2 so se postopoma izvedle sanacije betonov na prelivnem objektu ter ključna sanacija odvzemnega objekta, ki je vključevala zamenjavo glavnega ventila, električne in merilne opreme, namestitve dizelskega agregata ter vgradnjo avtomatizacijske in videonadzorne opreme. V primerjavi z drugimi podobnimi pregradami je bila pregrada Loče deležna precejšnih vložkov v vzdrževalna dela, deloma tudi na račun projekta Zagotavljanje poplavne varnosti na porečju Savinje – lokalni ukrepi (MOP, 2013). Telo pregrade še ni bilo sanirano in še vedno pomeni kritično točko, ki tudi ni zadostno raziskana. Predlogi za nadaljnja sanacijska dela na pregradi so zato naslednji:

1. Takoj vzpostaviti redno tehnično opazovanje v skladu s Pravilnikom o tehničnem opazovanju visokih jezov (Uradni list SFRJ, 1966) in Pravilnikom o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade (Uradni list RS, 1999) ter vsemi dosedanjimi ugotovitvami o stanju pregrade.
2. Na podlagi rezultatov dosedanjega in dodatnega tehničnega opazovanja izdelati analize stanja telesa pregrade, ki mora dati odgovor na zabeležene neobičajne nivoje precejne vode skozi pregrado. Šele na podlagi te analize je mogoče določiti ukrepe za sanacijo telesa pregrade. Verjetno bo potrebna sanacija drenažnega sistema zaradi suma o

puščanju pregrade. Če je zaradi odpovedi filtrov že prizadeto tudi glineno jedro, bo potrebna sanacija obsežnejša.

3. Izprazniti akumulacijo do ravni, ki omogoča pregled objektov in pregradnega telesa v suhem stanju. Če popolna izpraznitev zaradi okoljskih in naravovarstvenih razlogov ne bo mogoča, bo treba akumulacijo izprazniti do določene kote, zgraditi začasen vodotesni nasip in nato opraviti potrebna sanacijska dela.
4. Pripraviti obratovalni pravilnik za visokovodne in druge izredne razmere ter redno obratovanje. Predhodno je potreben jasen dogovor o namenu zadrževalnika (primarno visokovodna zaščita, sekundarno ribištvo, rekreacija, turizem).
5. Določiti hidravlično stanje pregrade ob različnih hidroloških pogojih in kontrolirati stabilnosti za osnovne obtežne primere.
6. Preveriti hidrološka izhodišča in kapacitete prelivnih objektov z morebitnimi ukrepi.
7. Oceniti možnosti zdrsov brežin v akumulacijo, kar bi lahko povzročilo prelivanje in rušenje pregrade.
8. Dograditi tablaste zapornice na odvzemnem objektu za uravnavanje odjema vode z različnih nivojev (globin) akumulacije in vzdrževalnih del na objektu.
9. Sanirati betonske dele odvzemnega objekta in mostne dostopne konstrukcije pod običajno obratovalno gladino jezera (263,50). Debelina sten odvzemnega objekta je namreč samo 15 cm in stene pod vodno gladino so porozne, tako da voda pronica skozi. Zato bi bilo treba celoten odvzemni objekt:
  - a) ojačati z dodatnim AB-obodom odvzemnega objekta ali



Slika 5: Lokacije piezometrov (V1 do V8) in reperjev (21, 24 in 27) na pregradi Loče, ki so jih evidentirali avtorji med ogledom.

Figure 5: Piezometer and benchmark locations at Loče dam as detected during a site visit by the authors

b) zgraditi nov odzvemni objekt po veljavnih standardih z ustreznimi dimenzijami in vključitvijo tablastih zapornic za kontroliran odjem vode in možnost zapore dotoka vode do cevi talnega izpusta – zasuna. Dodaten argument za nov objekt je, da so vzdrževalna dela na hidromehanski opremi na obstoječem objektu zaradi prostorske utesnenosti (15 m globok ozek jašek) zelo težavna.

Skupni znesek za zagotovitev manjkajočih strokovnih podlag in sanacijo osnovnih elementov pregrade je 250.000 evrov. Če bi bila potrebna obsežnejša sanacija jedra, se višina sredstev lahko poveča tudi do 1,5 milijona evrov ali več, če bi bilo treba nujno popolnoma ali delno akumulacijo izprazniti.

## Tehnično opazovanje in merilna mesta

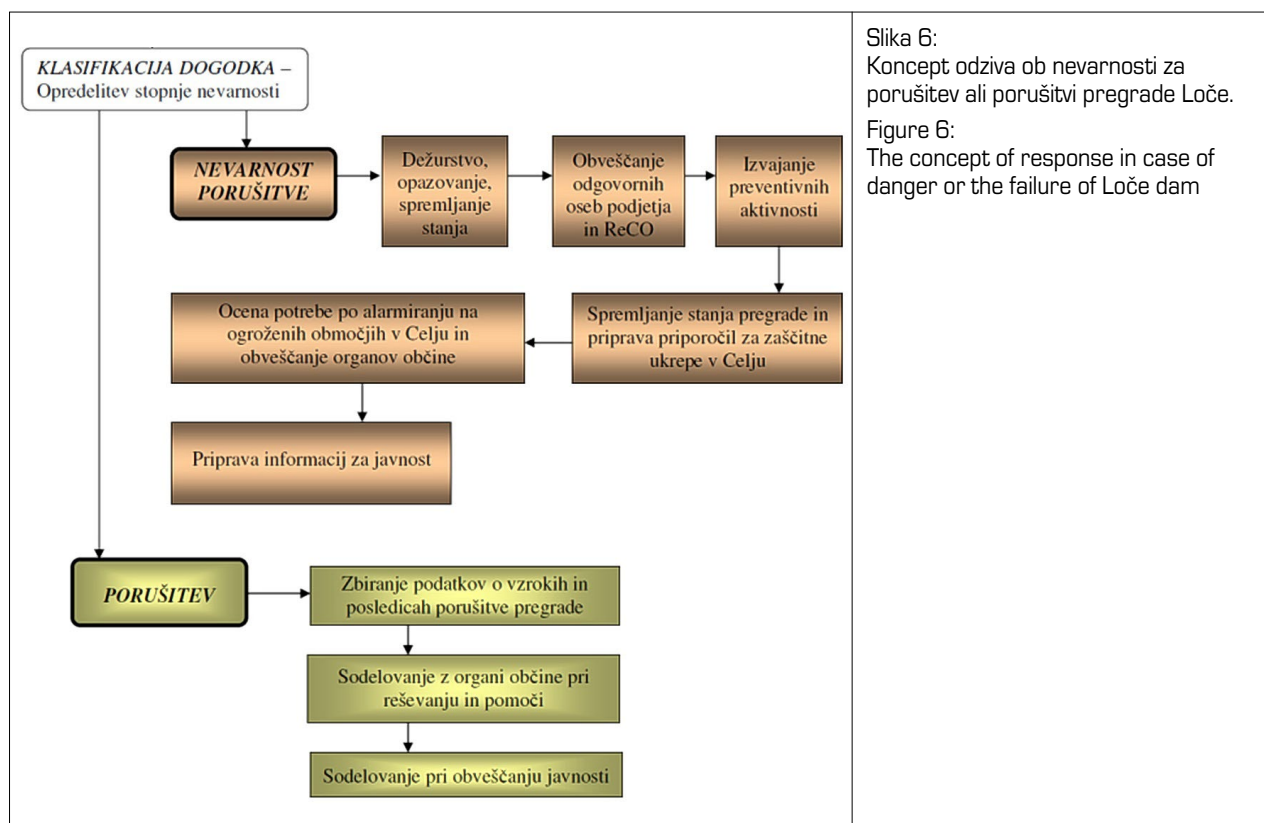
Tehnično opazovanje zahtevnih inženirskih objektov je treba izvajati med gradnjo, da se preveri veljavnost projektne prognoze obnašanja, in potem v celotni dobi delovanja, ko se preverja, ali se konstrukcija tudi po dolgem času uporabe obnaša, kot je bilo pričakovano.

V Sloveniji velja evropski standard za geotehnično projektiranje (Evrokod 7, 2005) že od leta 2009, vendar pa njegove zahteve niso prenesene v veljavni Zakon o graditvi objektov (ZGO-1, 2004). Evrokod 7 razvršča objekte ne samo glede na zahtevnost objekta, ampak

tudi glede na zahtevnost tal, kar bi bilo treba glede na morfologijo Slovenije – plazovita območja, mehka tla in potresna območja – opredeliti tudi v naših predpisih.

Pri načrtovanju tehničnega opazovanja zemeljske pregrade je treba poleg vizualnega spremljanja preverjati tesnjenje, predvsem morebiten pojav notranje erozije ter posedke in pomike pregrade. Veliki diferenčni posedki ali pomiki pregrade lahko pomenijo vzrok za nastanek razpok in šibka mesta za tesnjenje, povečan pretok v drenažnem sistemu ali povišan nivo vode v piezometrih na območju pregrade pa spremembe učinkovitosti vgrajenega tesnjenja. Pomembno je, da se opazovanje vzpostavi pred prvo polnitvijo in da se meritve izvajajo tudi po gradnji, ker lahko le tako v daljšem časovnem obdobju ugotovljamo spremembe v obnašanju objekta.

Za pregrado Loče je na razpolago »izvršilni načrt«, v katerem je prikazan podzemni drenažni sistem v peti pregrade. Izdelan je bil Projekt geodetskega opazovanje pregrade Loče (GZ SRS, 1969), na podlagi katerega je bilo na kroni pregrade vzpostavljenih sedem repernih točk. Po dostopnih podatkih so se meritve izvajale v obdobju 1971 do 1983 z ustrežno kontinuiteto. V prvih 12 letih po izgradnji posedki krone pregrade niso preseгли 4 cm, kazal se je trend zmanjševanja posedanja. V naslednjih 25 letih (od leta 1983 do 2008) meritev ni bilo. Reperne točke so bile obnovljene v sklopu obnove pešpoti na kroni pregrade, opravljeni sta bili dve geodetski meritvi (2008 in 2009), vendar je bila kontinuiteta meritev prekinjena, tako da celotnih posedkov objekta ne poznamo.



Slika 6:  
Koncept odziva ob nevarnosti za porušitev ali porušitvi pregrade Loče.  
Figure 6:  
The concept of response in case of danger or the failure of Loče dam

V izvršilnih načrtih so tudi lokacije piezometrov, ki pa v sklopu gradnje niso bili izvedeni. Glede na razpoložljive informacije je bilo prvih šest piezometrov vzpostavljenih šele leta 2009, tako da je od takrat mogoče spremljati nivo vode v telesu pregrade. Z meritvami piezometričnih nivojev in drugimi meritvami je treba ugotoviti, ali je hitrost pronicanja vode skozi pregrado nevarna za nastanek notranje erozije. Vsekakor pa je treba z opazovanjem izboljšati védenje o stanju objekta, izdelati povratno stabilnostno analizo in šele nato načrtovati ukrepe, če bodo potrebni.

## Ukrepanje ob nevarnosti porušitve

Z vidika analize stanja ob morebitni porušitvi pregrade Loče je bila v sklopu projekta VODPREG 2 narejena tudi presoja obstoječega načrta zaščite in reševanja (Zupančič in Senič, 2008). Maksimalna napolnjenost akumulacije še ne pomeni grožnje za porušitev pregrade. Ta je lahko predvsem hipnega značaja (terorizem ipd.), medtem ko je lahko predvidljivega značaja le, če bi dotoki dalj časa presevali odtok iz jezera, z več kot 1000 letno povratno dobo, saj varnostni preliv onemogoča prenapolnjenost akumulacije. Pri zaznani nevarnosti za porušitev ali ob porušitvi je treba takoj ukrepati.

Koncept odziva se nanaša na predpostavko vsaj maksimalne napolnjenosti akumulacije (na koti maksimalne gladine = 266,50 m) s tendenco naraščanja in predvideva dve situaciji, v katerih se začnejo izvajati naslednji izredni ukrepi:

1. Nevarnost porušitve pregrade. Do te situacije lahko pride zaradi pojava prekomernih pomikov posameznih konstrukcijskih elementov pregrade, odstopanj posameznih vplivov od računsko predvidenih vrednosti, napak v upravljavski opremi in objektih, ki onemogočajo normalno upravljanje akumulacije, ter zaradi človeške napake.
2. Porušitev pregrade. Do te situacije lahko pride predvsem zaradi terorizma, diverzije, bombardiranja, hudega potresa, le v skrajnih razmerah tudi zaradi nadaljnega razvoja deformacij na pregradi.

Slika 6 shematsko prikazuje načrt zaščite in reševanja (Zupančič in Senič, 2008). Načrtovane aktivnosti se začnejo izvajati, kadar se pokažejo prvi znaki, ki nedvomno kažejo na možnost porušitve (nedovoljene in nenormalne deformacije ali nedovoljena odstopanja na pregradi), oziroma takoj po nenadni porušitvi pregrade. Ob pojavu kateregakoli znaka za nevarnost porušitve upravlavec pregrade o preteči nevarnosti obvesti lokalno skupnost, regijski center za obveščanje (ReCO) in javnost ter na pregradi vzpostavi dežurstvo s stalnim opazovanjem in izvajanjem preventivnih aktivnosti na območju akumulacije.

Predlog Navodil (Lenart in sod., 2016) zahteva, da se v področju dolvodno od pregrade označijo maksimalne kote gladine, ki bi nastala ob porušitvi. Prebivalci na ogroženih območjih morajo biti o teh kotah že predhodno obveščeni. Dežurna služba na pregradi stalno ocenjuje potrebo po proženju alarmnih siren na območju poplavnega vala in o tem obvešča ReCO. Odločitev za sprožitev alarmnih siren kot opozorilo na pretečo nevarnost porušitve pregrade in poplavo na poplavnem območju se sprejme na podlagi vidnih znakov in sprememb na pregradi, ki nedvomno kažejo na možnost porušitve ali ob nenadni porušitvi. Ob znaku alarma se morajo prebivalci takoj umakniti nad označeno nevarno koto gladine poplavnega vala.

## Sklepne misli

V projektu VODPREG 2 so bila posodobljena Navodila za izdelavo ocene hidravličnih posledic porušitve pregrad (Lenart in sod., 2016). Njihova uzakonitev bi obvezala lastnike ali upravljavce pregrad k izvedbi izračunov porušitev posameznih pregrad in analizi varnostnega stanja vsake od njih. Narejena je bila vzorčna analiza varnostnega stanja pregrade Loče, v sklopu katere je bil ponovljen izračun poplavnega vala iz leta 1979. Uporaba dvodimenzionalnega matematičnega modela je omogočila znatno povečanje točnosti v primerjavi z enodimenzionalnim, ki je bil za izračun porušitvenih valov za pregrado Loče uporabljen ob njenem projektiranju. Pri maksimalnih kotah vode ni večjih odstopanj, dvodimenzionalni izračuni pa mestoma kažejo nekoliko večji obseg poplavljenega območja in počasnejše širjenje čela vala. Na zanesljivost izračunov močno vplivajo tudi geometrijski podatki, ki so se prav tako spremenili glede na začetno stanje, tudi zaradi sprememb v topografiji (gradnja avtocest in drugih večjih objektov).

Pri pregradi Loče vidimo, da lahko rezultati analize porušitvenih valov bistveno vplivajo na načrtovanje in izvajanje ukrepov zaščite in reševanja ob porušitvi. Visoka stopnja točnosti geometrijskih podatkov, ki jih omogoča uporaba LIDAR posnetkov, in dostopne natančnejše metode izračuna poplavnih valov zato spodbujajo k ponovitvi analize varnostnega stanja za vse velike pregrade v Sloveniji in tudi za druge, ki ne spadajo v to kategorijo, vendar bi njihova porušitev ogrožala življenje v področju dolvodno od pregrade. Glede na rezultate projekta VODPREG (Ravnikar Turk in sod., 2012), ki je stanje teh objektov podrobno analiziral, bi bilo treba ponoviti izračune še za vsaj sedem od 16 največjih pregrad v Sloveniji.

Strokovnjaki s področja graditve smo prepričani, da bodo redno vzdrževani objekti, katerih šibke točke se redno odpravljajo, objekti pa redno investicijsko vzdržujejo, še dolgo varni in niso grožnja za prebivalstvo. Lastniki zadrževalnikov in pregrad pa morajo odgovorno upravljati in vzdrževati objekte, ki bodo vedno pomenili vir nevarnosti za prebivalstvo.



## Zahvala

Avtorji prispevka se zahvaljujemo za strokovno in finančno podporo naročniku in financerju projekta Zemeljske in

betonske vodne pregrade strateškega pomena v RS – VODPREG 2, in sicer Ministrstvu za obrambo Republike Slovenije – Upravi Republike Slovenije za zaščito in reševanje [št. pogodbe 4300-203/2015, 1. junij, 2015].

## Viri in literatura

1. Četina, M., 1988. Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov. Magistrsko delo, FAGG, Ljubljana.
2. Četina, M., Banovec, P., Krzyk, M., 2001. Dvodimenzionalni hidravlični model Šmartinskega jezera. Študija, UL FGG, Ljubljana.
3. Evrokod 7, 2005. SIST EN 1997-1:2005, Evrokod 7: Geotehnično projektiranje – Del 1: Splošna pravila.
4. Goubet, A. 1979. Risques associes aux barrages. La houille Blanche, št. 8.
5. GZ SRS, 1969. Projekt geodetskega opazovanja pregrade Loče. Geodetski zavod SRS.
6. ICOLD European Club, 2012. Working group on Safety of Existing Dams, Report.
7. Lenart, S., Četina, M., Rajar, R., Papež, J., Brenčič, M., Kuhar, M., Širca, A., Ravnikar Turk, M., 2016. Zemeljske in betonske vodne pregrade strateškega pomena v RS – VODPREG 2. Zaključno poročilo, Ljubljana.
8. Lenart, S., Rajar, R., Širca, A., 2017. Prispevek projekta VODPREG 2 k oceni posledic porušitev vodnih pregrad. Naravne nesreče 4 – Trajnostni razvoj mest in naravne nesreče, Ljubljana-Ig, 133–143.
9. MOP, 2017. eVode, LIDAR, Pregledovalnik LIDAR podatkov. <http://evode.arso.gov.si>.
10. MOP, 2013. Zagotovitev poplavne varnosti na porečju Savinje – lokalni ukrepi. <http://www.porecije-savinje.si>.
11. Rajar, R., 1979. Račun vala, ki bi nastal pri porušitvi pregrade Loče. Študija, FAGG, Ljubljana.
12. Rajar, R., Četina, M., Umek, A., 2017. Strokovne podlage za obravnavo hidravličnih posledic porušitev pregrad. Zbornik 2. slovenskega kongresa o vodah, Podčetrtek, 76–81.
13. Rak, G., Slokar, M., Steinman, F., 2014. Slovensko-avstrijsko sodelovanje pri poplavah zaradi porušitve protipoplavnih objektov na območju Gornje Radgone in Radgone. Ujma, 28, 245–254.
14. Ravnikar Turk, M., Četina, M., Humar, N., Kryžanowski, A., Polič, M., Rajar, R., Širca, A., Žvanut, P., 2012. Zemeljske in betonske vodne pregrade strateškega pomena v Republiki Sloveniji – VODPREG. Zaključno poročilo, Ljubljana.
15. Uradni list SFRJ, 1966. Pravilnik o tehničnem opazovanju visokih jezov. Uradni list SFRJ, 7/66.
16. Uradni list RS, 1999. Pravilnik o opazovanju seizmičnosti na območju velike pregrade. Uradni list RS, št. 92/99, 44/03 in 58/16.
17. Uradni list RS, 2004. Zakon o graditvi objektov, ZGO-1. Uradni list RS, št. 102-4398/04 z dne 21. 9. 2004.
18. Uradni list RS, 2007. Pravilnik o metodologiji za določanje območij, ogroženih zaradi poplav in z njimi povezane erozije celinskih voda in morja, ter o načinu razvrščanja zemljišč v razrede ogroženosti. Uradni list RS, št. 60/2007 z dne 6. 7. 2007.
19. Zorn, M., Hrvatina, M., 2015. Škoda zaradi naravnih nesreč v Sloveniji med letoma 1991 in 2008. Ujma, 29, 135–148.
20. Zupančič, Z., Senič, D., 2008. Načrt zaščite in reševanja ob porušitvi pregrade Loče na akumulaciji Šmartinsko jezero Celje. Nivo, Gradnje in ekologija, d. d., Celje.