

UDK/UDC: 627.82:69.059.4(497.4)

Prejeto/Received: 07.05.2021

Izvirni znanstveni članek – *Original scientific paper*

Sprejeto/Accepted: 14.07.2021

DOI: [10.15292/acta.hydro.2021.09](https://doi.org/10.15292/acta.hydro.2021.09)

Objavljeno na spletu/Published online: 16.03.2022

## SPREMLJANJE KONDICIJSKEGA STANJA BETONSKIH TEŽNOSTNIH PREGRAD STRUCTURAL HEALTH MONITORING OF CONCRETE GRAVITY DAMS

Mateja Klun<sup>1,\*</sup>, Dejan Zupan<sup>1</sup>, Andrej Kryžanowski<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Jamova 2, 1000 Ljubljana

### Izvleček

Staranje vodnih pregrad je eden ključnih izzivov pregradnega inženirstva v Sloveniji kot tudi drugod po svetu. Poleg tega so pregrade izpostavljene spremembam v okolju (podnebne spremembe) in drugim časovno odvisnim vplivom, kot na primer spremembam obratovalnih režimov na pregradah, ki so primarno namenjene hidroenergetski izrabi. Skupek vseh teh sprememb dodatno prispeva k procesu staranja ter k zmanjšanju obratovalne varnosti objektov. Pregrade so zelo pomembni infrastrukturni objekti, ki prinašajo številne koristi kot tudi dodatno tveganje v okolju. V primeru tehničnih okvar in porušitev (delnih ali popolnih) lahko predstavljajo nevarnost za dolvodna območja. Zagotavljanje dobrega kondicijskega stanja starajočih se pregrad trenutno predstavlja enega glavnih izzivov pregradnega inženirstva, saj je povprečna starost slovenskih pregrad že več kot 40 let. S podobnimi izzivi se soočajo tudi drugod po svetu. V prispevku predstavljamo metodologijo za spremljanje kondicijskega stanja betonskih pregrad s spremljanjem vibracij. Metodologija temelji na uporabi nekontaktnih in kontaktnih meritev z beleženjem vibracij na površini konstrukcije. Eksperimentalno delo smo izvajali na pregradi Brežice, ki smo jo začeli spremljati že med gradnjo in nato v prvem letu obratovanja.

**Ključne besede:** spremljanje vibracij, betonska pregrada, meritve, spremljanje kondicijskega stanja.

### Abstract

The ageing of dams is one of the major challenges in specifically Slovenian and generally global dam engineering. Dams are exposed to environmental (climate) changes, as well as time-dependent effects, such as changes in the operating schedules of dams intended primarily for hydroelectric production. These changes can accelerate dams' ageing and lead to a decrease in their structural and operational safety. Dams are an important part of the infrastructure, as they bring about numerous benefits and at the same time they are also sources of risk. For example, in the event of partial or total failure they pose significant risk to downstream areas. Aging of dams, preserving their functionality, and maintaining their structural health are currently the main challenges of dam engineering. The mean age of Slovenian dams is already over 40 years, although Slovenia is not unique in this situation. In this paper there is presented a novel methodology to monitor structural health of concrete dams, with the use of noncontact and contact measurements through observation

---

\* Stik / Correspondence: [mateja.klun@fgg.uni-lj.si](mailto:mateja.klun@fgg.uni-lj.si)

© Klun M. et al.; Vsebina tega članka se sme uporabljati v skladu s pogoji [licence Creative Commons Priznanje avtorstva – Nekomercialno – Deljenje pod enakimi pogoji 4.0](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

© Klun M. et al.; This is an open-access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution – NonCommercial – ShareAlike 4.0 Licence](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

of structural vibrations. We present the in-situ experiment on the Brežice dam that began during the dam's construction and continued into the first year of its operation.

**Keywords:** vibration monitoring, concrete dam, measurements, structural health monitoring.

## 1. Uvod

V svetu vsako leto prične obratovati približno 200 velikih pregrad različnih tipov (Bernstone, 2006). Po podatkih Slovenskega nacionalnega komiteja za velike pregrade (SLOCOLD) je bilo več kot 60 % pregrad v Sloveniji zgrajenih pred letom 1980. Podobno je tudi drugod po svetu, na primer v ZDA, kjer je bilo več kot 80 % pregrad zgrajenih pred letom 1979, in v Avstraliji, kjer je bila več kot polovica pregrad zgrajenih pred letom 1969 (ANCOLD, 2018; SLOCOLD, 2021; USBR, 2018). Tako lahko na podlagi podatkov dostopnih nacionalnih registrov ugotovljamo, da je večina pregrad, ki bo obratovala v 21. stoletju, stara več kot pol stoletja. Posledično to pomeni, da se bodo upravljavci objektov vse bolj srečevali s problemom staranja objektov, njihove funkcionalnosti in ohranjanja dobrega kondicijskega stanja. Pregrade so velikega strateškega pomena kot infrastrukturni objekti, ki prinašajo številne ekonomske kot tudi družbene koristi. Hkrati vsaka pregrada pomeni tudi svojevrstno tveganje v prostoru (Zhang et al., 2016). V Sloveniji se zaradi razgibane topografije in razpršenosti gradnje v vplivnem območju pregrad nahaja precej urbanih površin, infrastrukturnih objektov ter pomembnih naravnih habitatov. S tematiko varnosti in staranja pregrad so neposredno povezani tudi vodni zadrževalniki, saj zmanjšana varnost pregrad pomeni tudi večjo ogroženost dolvodnih območij pred nenadzorovanim izpustom vode. Poudariti moramo tudi vlogo večnamenskih zadrževalnikov v lokalnem ekosistemu, saj njihova izpraznitev poleg nevarnosti za dolvodna območja prinaša tudi širše posledice za lokalni ekosistem (Smolar-Žvanut et al., 2019). Poleg tega s številnimi zadrževalniki sobivamo že desetletja, predstavljajo pomemben del krajine in bi njihova izpraznitev imela tudi sociološke posledice.

Pregrade se starajo, na to, kakšno kondicijsko stanje dosežajo, pa lahko v veliki meri vplivamo s primernim gospodarjenjem. Z ohranjanjem dobrega kondicijskega stanja pregrad lahko torej podaljšamo

njihovo obratovalno in življenjsko dobo. V članku se osredotočamo na betonske težnostne pregrade, namenjene hidroenergetski izrabi. Takih pregrad je v Sloveniji 25, njihova povprečna starost pa je že več kot 40 let (SLOCOLD, 2021). Staranje betonskih pregrad povezujemo s časovno odvisnimi spremembami betonske konstrukcije, na primer z rastjo in razvojem mikrorazpok. Beton s starostjo zaradi delovanja različnih dejavnikov razpoka, proces staranja pa se ne dogaja le na površini, ampak do razvoja razpok prihaja tudi v notranjosti masivne betonske konstrukcije. Tega notranjega procesa s tradicionalnim načinom opazovanja pregrad ne moremo spremljati. V okviru raziskave smo raziskali možnosti za spremljanje stanja konstrukcij z meritvami dinamičnega odziva zaradi obratovanja hidroelektrarne (HE) in drugih časovno spremenljivih vplivov. Meritve smo izvajali na pregradi HE Brežice na Savi. Raziskave smo začeli izvajati že v času gradnje, posebno pozornost smo namenili obratovalnim obtežbam, jih analizirali in izmerili njihov vpliv, terensko delo pa smo nadgradili tudi z numeričnim modeliranjem in primerjavo eksperimentalnih in računskih rezultatov.

## 2. Staranje in spremljanje stanja pregrad

Z izrazom staranje pregrad opisujemo vse materialne spremembe, ki nastajajo ob izpostavljenosti nekemu časovno odvisnemu vplivu (Zenz, 2008). O staranju pregrad govorimo po preteku petih let po začetku obratovanja. Poškodbe, ki se pojavijo prej, pripisujemo napakam v zasnovi in vgradnji (ICOLD Committee on Dam Ageing, 1994). Različni zunanji dejavniki, kot so alkalna reakcija, izpostavljenost kemični agresiji (sulfati, kloridi), abrazija, kavitacija, precejanje vode, krčenje in raztezanje betona, temperaturni cikli in obratovalna obtežba, lahko proces staranja še pospešijo. Pri vplivu obratovalne obtežbe govorimo o utrujanju materiala zaradi spreminjajoče se obtežbe, ki je posledica cikličnega delovanja

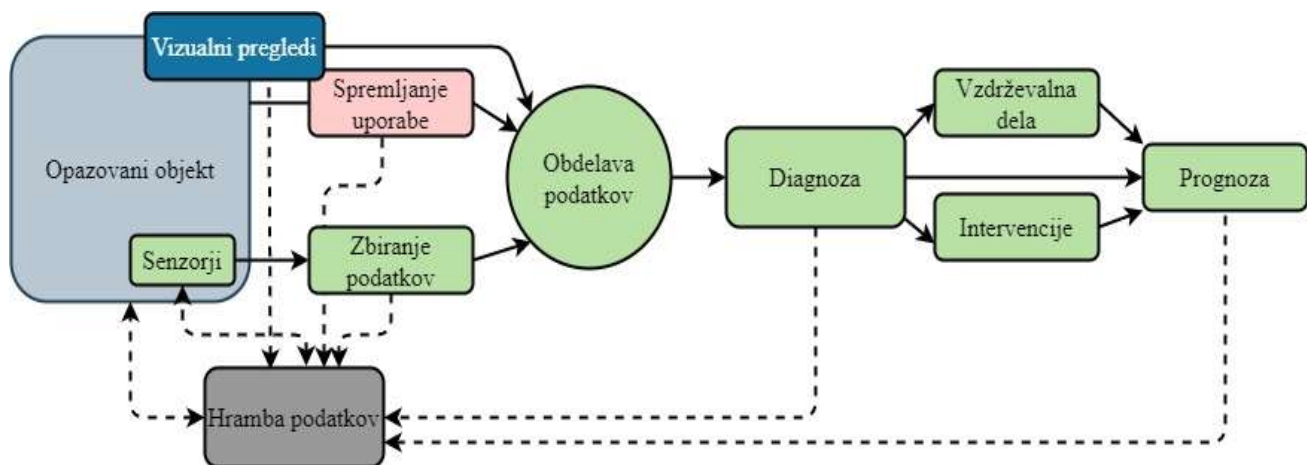
hidromehanske opreme. Na hidroenergetskih pregradah so vsakodnevno prisotne vibracije, ki jih povzročajo vrtenje agregatov. Te vibracije se prenašajo na betonsko konstrukcijo in povzročajo utrujanje materiala, ki ga lahko razdelimo v tri skupine (Shah in Chandra, 1970):

- utrujanje z nizkim številom ciklov  $N_f \leq 10^3$  in visokimi amplitudami napetosti;
- utrujanje z velikim številom ciklov  $10^3 \leq N_f \leq 10^7$  in nizkimi amplitudami napetosti;
- utrujanje z zelo velikim številom ciklov  $N_f \geq 10^7$  in z zelo nizkimi amplitudami napetosti.

Primer utrujanja betona z nizkim številom ciklov in z visoko amplitudo je potres. Obtežbo z velikim številom ciklov pa predstavljajo veter, promet ali obratovanje strojev. Utrujenje materiala z obratovalnimi obtežbami, ki je prisotno na hidroenergetskih pregradah, sodi v skupino obtežb z zelo velikim številom ciklov z zelo nizkimi amplitudami. Takšna obtežba v betonu povzroča rast obstoječih ter tudi razvoj novih mikrorazpok. Rast mikrorazpok običajno hitreje napreduje v območjih koncentracij napetosti ter na kritičnih mestih. Odpoved materiala se zgodi, ko je pri dani amplitudi preseženo mejno število ciklov. Beton je heterogeni material, osnovna gradnika sta agregat in cementni kamen. Zaradi heterogene sestave se že v

mladem betonu v času strjevanja razvijejo prve mikrorazpoke, ki se bodo ob stalni izpostavljenosti vibracijam razvijale dalje (Courtney, 2005). Torej beton s starostjo razpoka, kar pri hidrotehničnih objektih pomeni težavo z zagotavljanjem vodotesnosti, povečano izpostavljenost za kemično agresijo ter nasploh ugodne pogoje za pospešeno staranje objekta. Poudariti moramo še, da se vsa hidromehanska oprema na hidroenergetskih objektih v obratovalnem obdobju zamenja vsaj enkrat, gradbena konstrukcija pa je tista, ki je ni mogoče zamenjati (Killingtveit, 2019).

Tehnično opazovanje pregrad ima v svoji osnovni obliki zelo dolgo tradicijo (Bukanya et al., 2014). Pregrade so edinstveni objekti v prostoru, zato mora biti tudi sistem tehničnega opazovanja zasnovan za vsak objekt posebej. S pomočjo meritev, opazovanj in pregledov periodično spremljamo različne časovno odvisne parametre (vodoravne in navpične premike, količino precejanja vode, vzgonske tlake itd.). Shema sistema kondicijskega spremljanja pregrad je prikazana na sliki 1, kjer poleg spremljanja parametrov obtežbe in odziva konstrukcije spremljamo tudi uporabo oz. obratovanje. Pomemben parameter v sistemu je spremljanje vibracij. Dinamične lastnosti objekta (npr. lastne frekvence) so odvisne od njegove geometrije, vgrajenega materiala in mase. Lastne frekvence lahko ocenimo z analizo vibracij objekta.



*Slika 1: Shema sistema spremljanja kondicijskega stanja.*

*Figure 1: Principle of a structural health monitoring system.*

Spremembe konstrukcije se odražajo v spremembi dinamičnega obnašanja objekta, te pa lahko identificiramo z rednim spremljanjem in analizo vibracij. Vključitev dinamičnega opazovanja pregrad tako omogoča spremljanje kondicijskega stanja, saj lahko z analizo vibracij in ostalih časovno odvisnih parametrov zgodaj prepoznamo znake staranja, spremljamo njihov razvoj in s primernim vzdrževanjem podaljšujemo življenjsko dobo objekta ter zmanjšamo možnosti nepričakovanih dogodkov (Birtharia in Jain, 2015).

### 3. Obratovalna obtežba

Vloga pretočnih HE danes se je povsem spremenila. Njihova hitra odzivnost in zmožnost zagotavljanja sistemskih rezerv in storitev jih postavlja med najbolj fleksibilne vire energije pri nas. Poleg tega se bo z vključevanjem dodatnih kapacitet obnovljivih virov energije, ki so izrazito stohastične narave, njihova vloga pri zagotavljanju sistemskih storitev v prihodnosti le še povečevala (ICOLD Technical Committee on Dams for Hydroelectric Energy, 2019). Takšna vloga pretočnih HE v preteklosti ni bila predvidena, saj so zasnovane za pokrivanje pasovnega dela obratovalnega diagrama elektroenergetskega sistema. V Sloveniji so pretočne HE namenjene tudi zagotavljanju sistemskih storitev in so zaradi svojega hitrega odziva eden ključnih regulacijskih mehanizmov v elektroenergetskem sistemu. Zaradi spremenjene vloge so gradbene konstrukcije HE izpostavljene večjim dinamičnim obremenitvam, kot je to običajno za tovrstne objekte. Posledično je pospešen proces staranja nosilne konstrukcije, kar postavlja pretočne HE v bolj ranljiv položaj, kot je to običajno. Poleg tega se redni program tehničnega opazovanja pregrad pri nas izvaja v okviru predpisanih zakonskih zahtev, kjer se ta vidik v sklopu diagnostičnega dela izvaja le izjemoma, običajno šele takrat, ko pride do poškodb.

Posledice obratovalnih manevrov, ki so jim izpostavljene turbine, so že znane; vsak zagon in zaustavitev povzročata utrujanje, ki je enakovredno 15–20 uram rednega obratovanja (Trivedi et al., 2013). Obratovanje v pogojih, ki niso optimalni, pogostejše pojavljanje prehodnih dinamičnih

pojavnov zaradi povečanega števila zagonov je vzrok za pospešeno staranje hidromehanske opreme. Agregati so s svojim obratovanjem tudi vir vzbujanja za konstrukcijo in ti novi nepredvideni pogoji obratovanja ne vplivajo le na pospešeno staranje opreme, ampak tudi na procese staranja nosilne betonske konstrukcije. V literaturi lahko zasledimo nekaj navedb poškodb na konstrukcijah zaradi obratovalnih obtežb (Hillgren, 2011; Lopez in Restrepo Velez, 2003; Seleznev et al., 2014; Urquiza et al., 2014). Prav tako tudi nekateri upravljavci pri nas opažajo prve znake utrujanja nosilne betonske konstrukcije. Sprememba v načinu vodenja pretočnih HE, ki so danes večinoma vodene daljinsko, je vplivala tudi na organizacijske spremembe oddelkov za tehnično opazovanje in vzdrževanje pregrad, saj je postopoma prišlo do krčenja posadk, ki so bile redno prisotne na pregradah. Glede na zasnovo, tip in način vgradnje ločimo med več vrstami turbin. Od tipa turbine je odvisno tudi, kakšen bo njen vpliv na pregrado. V tem članku se bomo osredotočili na turbino tipa Kaplan z vertikalno osjo, ki omogoča dvojno regulacijo. To je tudi najbolj pogost tip turbine v Sloveniji, saj ima od 54 instaliranih agregatov v Sloveniji kar 41 agregatov nameščene Kaplanove turbine (Mikec, 2018). Zaradi obratovanja HE se pojavljajo običajni in varnostni obratovalni manevri. Med običajne obratovalne manevre uvrščamo redno obratovanje, redni zagon in izklop agregatov, k varnostnim manevrom pa prištevamo vse prehodne pojave (hitre zapore), ki se aktivirajo z namenom zaščite hidromehanske opreme pred poškodbami (Hočevar, 2018).

### 4. Opis metod in obravnavanega območja

#### 4.1. Pregrada Brežice

Pregrada Brežice je bila zgrajena leta 2017 in je trenutno najnovejša pregrada v Sloveniji. Sistemsko je vključena v sistem hidroenergetskih pregrad na spodnji Savi, ki bo dokončan z izgradnjo HE Mokrice v prihodnjih letih. Na odseku spodnje Save so med letoma 1993 in 2017 zgradili pet HE: Vrhovo (1993), Boštanj (2005), Arto-Blanca (2008), Krško (2012) in Brežice (2017) (slika 2). Vsi objekti v verigi so konstrukcijsko sorodni,

osnovani na kombiniranem tipu pregrad HE blokovne sheme in s pretočno akumulacijo. V vseh HE so nameščeni trije agregati, ki obratujejo pri kombiniranem nazivnem pretoku  $500 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Pregrada Brežice je kombinirana težnostna pregrada, ki jo sestavlja osrednja betonska pregrada, na katero sta priključena visokovodna nasipa, ki omejujeta območje vodnega zadrževalnika. Betonsko pregrado, skupne dolžine 160 m in z maksimalno konstrukcijsko višino 36,5 m, sestavljajo strojnica in pet prelivnih polj. Vsako prelivno polje je široko 15 m in omogoča pretok približno  $1000 \text{ m}^3/\text{s}$  vode. Prelivna polja so ločena s stebri širine 3 m in maksimalne višine 15 m. Vsako

prelivno polje je opremljeno s segmentno zapornico z zaklopko. Strojnica se nahaja ob levem bregu reke Save. Konstrukcijsko lahko ta del objekta razdelimo na dva dela. Del pod nivojem generatorjev sestoji iz masivnih temeljnih betonov, medtem ko je armiranobetonska konstrukcija v strojnici bistveno bolj vitka. V stojnici so nameščene tri vertikalne, dvojno regulirane Kaplanove turbine, vsaka z nazivno močjo 15,2 MW in načrtovano letno proizvodnjo 148 GWh. HE je zasnovana kot pretočna z delno zadrževalno sposobnostjo. V raziskavi smo se osredotočili na betonski, osrednji del pregrade v prelivnih poljih in v strojnici HE.



**Slika 2:** Lokacija že zgrajenih HE na spodnji Savi in pogled na pregrado Brežice iz zraka (Vir podatkov: SLOCOLD, 2021; <https://www.he-ss.si/>).

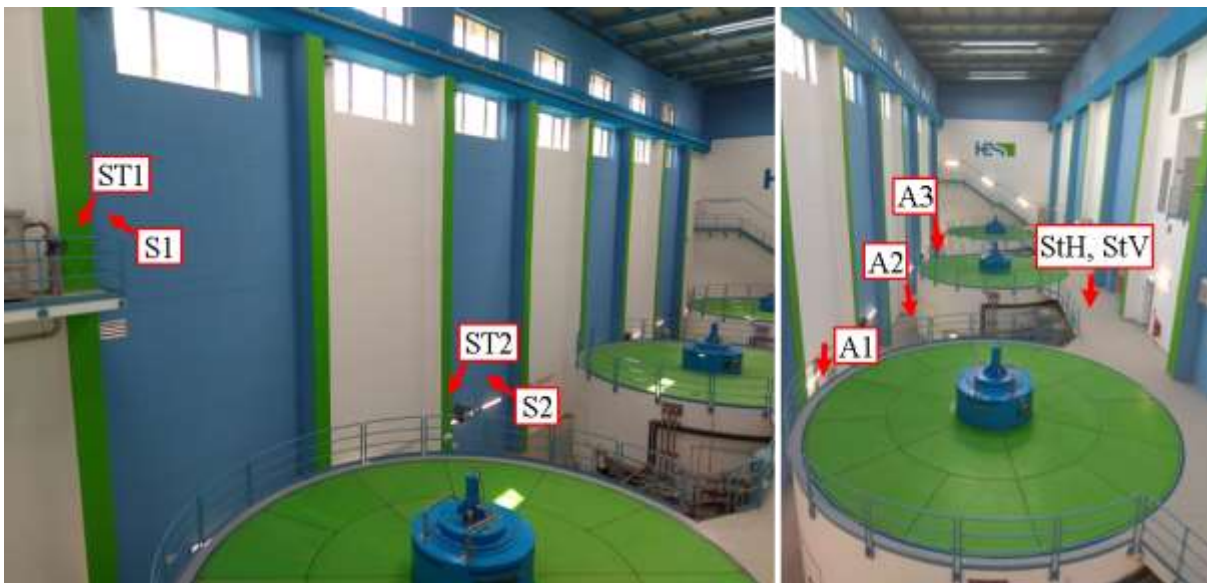
**Figure 2:** HPPs built on the Lower Sava River and a bird's-eye view of the Brežice Dam with the powerhouse (Data source: SLOCOLD, 2021, <https://www.he-ss.si/>).



## 4.2. Eksperimentalne metode

Za spremljanje vibracij na pregradi Brežice smo določili 12 različnih točk na konstrukciji (osem v strojnici HE ter štiri na stebrih prelivnih poljih). Nasproti vseh merilnih točk se nahaja primerno stojišče znotraj merilnega dosega instrumenta brez vmesnih ovir za laserski žarek. Na vsa mesta smo namestili odsevni trak, saj površina konstrukcijskih elementov ni zagotavljala zadostnega odboja. Prikaz vseh merilnih mest na objektu je prikazan na

slikah 3 in 4. Posebno pozornost smo namenili merilnim mestom na prelivnih poljih. Tam so meritve potekale le v času nizkih in srednjih pretokov in ob pogoju, da so zapornice zaprte. Pregrada je namreč zasnovana tako, da v času visokih voda in/ali odprtja zapornic pride do poplavljanja stebrov, kar onemogoča meritve v obdobju visokih voda v podslapju.



*Slika 3: Eksperimentalne točke v strojnici.*

*Figure 3: Experimental points in the powerhouse.*



*Slika 4: Eksperimentalne točke na prelivnih poljih, pogled s stojišča za meritve.*

*Figure 4: Experimental points in the spillway as seen from the vantage point.*

### 4.3. Brezkontaktne metode

Poleg pospeškometerov, ki so standardna merilna tehnika za meritve vibracij (Hsieh et al., 2006), smo odziv konstrukcije spremljali tudi z laserskimi vibrometri, ki v zadnjem času pogosto nadomeščajo uporabo tradicionalnih metod (Halkon in Rothberg, 2017a). Vibrometer meri vibracije v smeri laserskega žarka in deluje po principu Dopplerjevega pojava. Koherentni laserski žarek se odbije z vibrirajoče površine, kar povzroči spremembo frekvence, ki jo lahko izrazimo kot

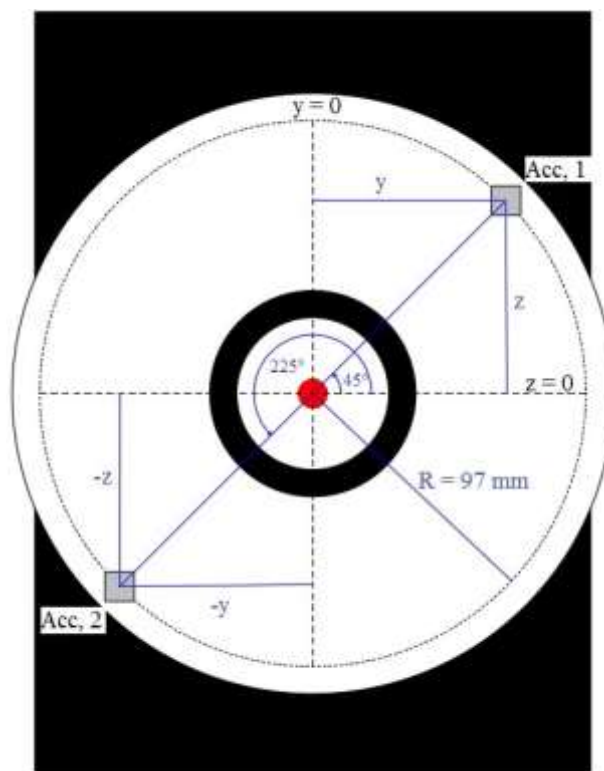
$$f_D = \frac{2v}{\lambda}, \quad (1)$$

kjer je  $\lambda$  valovna dolžina laserske svetlobe (m;  $\lambda$  HeNe laserja z rdečim žarkom je 633 nm),  $v$  predstavlja hitrost vibracij merjene površine (m/s),  $f_D$  pa Dopplerjevo spremembo frekvence (Hz) (Strean et al., 1998).

Laserski vibrometri omogočajo brezkontaktne meritve brez kakršnih koli posegov v objekt, ki ga proučujemo. Poleg tega je izvedba meritev preprosta, hitra in prilagodljiva razmeram na terenu. Pri dolgotrajnem tehničnem opazovanju gradbenih konstrukcij je smiselna dopolnilna uporaba, skupaj s kontaktnimi, trajno nameščenimi senzorstvi.

Če laserski vibrometer uporabljamo v strojnici HE med njenim rednim obratovanjem, je vibracijam podvrženo tudi stojišče vibrometra. Meritve hitrosti oscilirajoče površine z uporabo laserja so relativne, kar pomeni, da gibanje naprave vnaša napako v meritvi. Šum oz. napako v meritvi, ki ni povezana z gibanjem merjene ploskve v smeri žarka, imenujemo psevdovibracije (Martin in Rothberg, 2011). Vzroki za pojav psevdovibracij so različni, poleg gibanja naprave nanj vpliva tudi gibanje merjene ploskve, ki ni v smeri žarka, ter pojav pegavosti in periodično gibanje peg v času meritve (Rothberg, 2006; Rothberg et al., 1989). Vibrometer, nameščen na pomičnem merilnem mestu, meri vsoto obeh gibanj. Uporaba vibrometra v teh pogojih je vseeno možna. Če na ohišje vibrometra namestimo dva pospeškometera, lahko izločimo napako, ki nastane zaradi gibanja instrumenta (Halkon in Rothberg, 2017b). V ta namen smo razvili tog aluminijast vmesnik, ki

natančno nalega na masko vibrometra (Klun et al., 2019). Na vmesniku je na radiju 97 mm vrezanih 12 senzorskih mest. Osnova je navpičnica skozi center laserskega žarka, senzorska mesta pa si nato sledijo s korakoma  $45^\circ$  in  $60^\circ$ . Pri meritvah smo pospeškometera namestili na simetričnih legah, kot je prikazano na sliki 5. Lokaciji pospeškometerov sta tako določeni s kotoma  $45^\circ$  in  $225^\circ$  glede na horizontalno ravnino. Primerni legi pospeškometerov omogočata izločitev vpliva vrtenja instrumenta.



*Slika 5: Namestitev pospeškometerov na aluminijasti vmesnik vibrometra (Klun et al., 2019).*

*Figure 5: Installation of the accelerometers on the aluminium interface (Klun et al., 2019).*

Za sočasni zajem signalov vseh treh senzorjev smo uporabili sistem DEWESoft Sirius (DEWESoft, 2019). Vso nadaljnjo obdelavo signalov smo izvedli v programu Matlab (The MathWorks, 2018). Frekvenca vzorčenja signala je bila 20 kHz, signal s pospeškometerov pa se takoj integrira v hitrosti. Za filtriranje smo uporabili pasovni filter z mejnima frekvencama pri 1 Hz in 300 Hz. Signale smo časovno poravnali z uporabo križne korelacije (Brincker in Ventura, 2015).

$$R_{xy} = \frac{1}{T} \int_0^{\infty} x(t)y(t + \tau)dt \quad (2)$$

Križno korelacijo ( $R_{xy}$ ) lahko uporabimo kot merilo podobnosti med dvema diskretno vzorčenima signaloma, kjer  $\tau$  predstavlja fazni zamik (s),  $T$  pa velikost časovnega vektorja (s). Fazni zamik se lahko pojavi tudi pri sočasnem, vzporednem zajemu podatkov, na primer zaradi različne dolžine kablov ali računskih operacij. Za nadaljnjo obdelavo smo signale pretvorili v frekvenčni spekter. Povprečni signal s pospeškomerov smo odšteli od signala vibrometra in tako določili absolutno gibanje merjene površine.

#### 4.4. Eksperimentalno delo

Eksperimentalno delo je potekalo v več fazah z uporabo različnih tehnologij. Meritve na pregradi Brežice smo izvajali v času gradnje, zagonskih testov hidromehanske opreme ter poskusnega in rednega obratovanja. Z eksperimentalnim delom na pregradi Brežice smo začeli maja 2016, to je približno dve leti po začetku gradbenih del. Do takrat je že bila zaključena večina konstrukcijskih del, reka Sava pa še ni bila preusmerjena na prelivna polja. Polni razmah gradbenih del na gradbišču je služil kot vir vzbujanja za meritve vibracij stebrov prelivnih polj in sten strojnice. V teh uvodnih meritvah smo zabeležili odziv na mestih P1, P2 in S2 (glej slike 3 in 4).

Čas zagonskih testov hidromehanske opreme je tudi z vidika konstrukcije zelo aktivno obdobje. V tem relativno kratkem časovnem obdobju se izvedejo obsežna testiranja obnašanja hidromehanske opreme med tipičnimi obratovalnimi manevri. Veliko pozornosti se nameni varnostnim manevrom, ki se v času rednega obratovanja zgodijo le občasno, vendar pa mora hidromehanska oprema takrat delovati brezhibno. Z vidika vplivov hidromehanske opreme na nosilno konstrukcijo je za nas to obdobje predstavljalo edinstveno priložnost izmeriti odziv objekta med pojavi, ki se sicer zgodijo povsem naključno in jih med rednim obratovanjem ni mogoče predvideti vnaprej. Poleg tega pa dodatno proženje varnostnih (hitrih) zapor agregatov z namenom spremljanja odziva konstrukcije tudi ni mogoče. Vsak varnostni manever skrajša življenjsko dobo turbin in je zato

nujno treba optimizirati število njihovih aktivacij. V času zagonskih testov smo meritve izvajali v vseh izbranih točkah v strojnici. Izmerili smo odziv konstrukcije med običajnimi in varnostnimi manevri na agregatih 1, 2 in 3 ter tudi med sočasno aktivacijo hitrih zapor na dveh agregatih hkrati. Zagonski testi so potekali med avgustom 2017 in januarjem 2018. Izvedba testov je zelo povezana s hidrološkimi razmerami, saj mora biti za njihovo izvedbo na voljo zadostna količina vode oziroma zadosten pretok. Ker so bile hidrološke razmere v tem času precej neugodne (dolгим sušnim obdobjem so sledila obsežna deževja in poplave), so testi trajali kar dolgo, saj hidrološke razmere niso omogočale izvedbe testov pri polni moči HE.

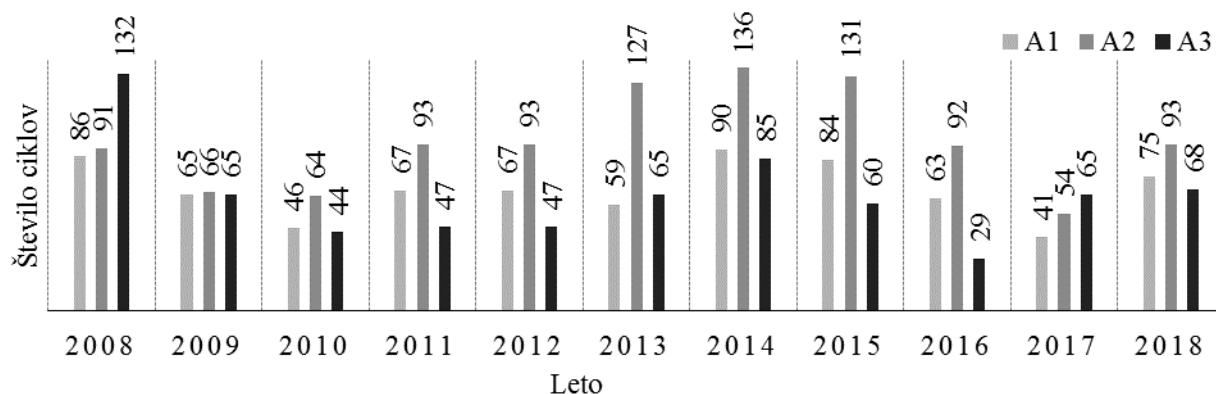
#### 5. Analiza podatkov meritev in rezultati

Pri analizi obratovalnih razmer na pregradi Brežice nas je zanimala pogostost pojava obratovalnih manevrov kot tudi amplitude odziva objekta v izbranih merskih točkah. Analizirali smo frekvenčni spekter dinamičnega obnašanja konstrukcije.

##### 5.1. Analiza obratovalnih dnevnikov HE

Za natančno poznavanje dolgoročnega vpliva obratovanja HE na betonsko konstrukcijo potrebujemo poleg meritev in analize vibracij tudi podatke o načinu obratovanja v čim daljšem časovnem obdobju. Za namen analize smo od upravljavca HE na spodnji Savi pridobili obratovalne podatke. Podrobno smo analizirali podatke s pregrad treh HE: Krško, Brežice in Vrholovo. Pregrada HE Vrholovo je prva v nizu HE na spodnji Savi, zanjo smo uspeli pridobiti podatke za zadnjih 10 let obratovanja. Na HE Vrholovo so v strojnici nameščeni trije agregati, ki imajo v povprečju 73 obratovalnih ciklov na leto. Vsak izmed agregatov obratuje neodvisno, zato se tudi število ciklov na agregat nekoliko razlikuje: na agregatu 2 je za približno tretjino višje kot na preostalih dveh. Slika 6 prikazuje gibanje števila obratovalnih ciklov na HE Vrholovo v obdobju 2008–2018. Ker se proizvodnja električne energije prilagaja potrebam na trgu, število ciklov v letu tudi nekoliko niha. V opazovanem 10-letnem obdobju je bilo najnižje število ciklov zabeleženo leta 2010, najvišje pa v letu 2014, ko se je število ciklov v primerjavi z letom 2010 podvojilo.





*Slika 6: Število obratovalnih ciklov na HE Vrhovo v obdobju 2008–2010.*

**Figure 6:** Number of start-stop cycles at the Vrhovo HPP in the period 2008–2018.

Poleg števila ciklov nas je zanimal še čas obratovanja v enem ciklu. V ta namen smo izvedli natančno analizo obratovalnih dnevnikov s HE Brežice in HE Krško. Za HE Krško smo pridobili podatke za obdobje oktober 2012–maj 2018, za HE Brežice pa smo analizirali obdobje od začetka obratovanja v januarju 2017 do maja 2018. HE Krško leži gorvodno od HE Brežice in je le nekaj let starejša, zato smo pričakovali, da bodo obratovalni vzorci podobni. Analiza 17-mesečnega obdobja s pregrade Brežice je omogočila prepoznavanje obratovalnih vzorcev v času zagonskih testov hidromehanske opreme in obdobja poskusnega obratovanja. V tem začetnem obdobju je obratovanje drugačno kot v kasnejših obdobjih. Preglednica 1 prikazuje zbrane podatke o obratovanju turbin na HE Krško. Analiza je pokazala, da se na posameznem agregatu v enem letu zgodi med 44 in 55 obratovalnih ciklov. Srednja vrednost posameznega cikla je približno 40 ur, so pa opazne precejšnje razlike v obratovanju med posameznimi agregati. Na agregatu 2 je srednja vrednost obratovanja kar 67 ur, na agregatu 3 pa le 23 ur. Najdaljše neprekinjeno obratovanje, ki je trajalo skoraj 82 dni, je bilo zabeleženo na agregatu 1. Agregat 1 je obratoval 75 % časa v letu (6573 ur), agregat 2 57 % (5009 ur) ter agregat 3 65 % (4911 ur). Analiza je pokazala, da se nekajkrat na leto aktivirajo tudi varnostne zapore, skupno približno 16-krat na leto. Agregati v HE Krško se torej vklaplajo in izklaplajo vsaj nekajkrat tedensko, varnostni manevri pa se v povprečju zgodijo več kot

1-krat mesečno. Ti pojavi se torej dogajajo bolj pogosto, kot bi pričakovali za klasične pretočne HE.

V preglednici 2 so zbrani rezultati analize obratovalnih dnevnikov s HE Brežice. Pri analizi obratovalnih ciklov v času zagonskih testov in poskusnega obratovanja HE Brežice lahko opazimo krajše povprečne čase obratovanja agregatov. V povprečju je na HE Brežice agregat po zagonu neprekinjeno deloval 15 ur. Razlike med posameznimi agregati pa so manjše kot na primeru HE Krško, kar je tudi pričakovano, saj je treba na vseh agregatih izvesti enake teste in zato večjih odstopanj ni pričakovati. Najdaljše zabeleženo obratovanje agregata v obravnavanem obdobju je 640 ur (agregat 2), povprečno število obratovalnih ciklov v enem letu pa 101 ter sedem aktivacij hitrih zapor. Število obratovalnih ciklov na HE Brežice je približno dvakratnik števila ciklov na HE Krško, medtem ko sta se v povprečju na HE Brežice aktivirala po dva dodatna varnostna manevra kot v povprečnem letu na HE Krško. Proženje varnostnih zapor je torej dokaj pogost pojav tudi v rednem obratovanju objekta in ne samo v začetnem obdobju, ko se na HE izvajajo zagonski testi. Vsi trije agregati na HE Brežice so obratovali približno 60 % časa v letu (5250 ur/leto), v obravnavanem obdobju so se varnostne zapore v povprečju prožile več kot enkrat mesečno. V okviru rednega obratovanja se je vsak agregat v povprečju zagnal in zaustavil vsaj 2-krat tedensko.

**Preglednica 1: Obratovanje turbin na HE Krško.**

**Table 1: Turbine operation at Krško HPP.**

Agregat	Mediana časa obratovanja	Najdaljše obratovanje	Varnostne zapore	Število vseh ciklov	Število ciklov letno	Varnostne zapore letno	Obratovanje v enem letu
[oznaka]	[h]	[h]	[n <sub>var</sub> ]	[n <sub>tot</sub> ]	[n <sub>tot</sub> /letno]	[n <sub>var</sub> /letno]	[h/letno]
1	67	1963	22	250	44	4	6573
2	34	1557	28	249	44	5	5009
3	23	1172	38	307	55	7	4911

**Preglednica 2: Obratovanje turbin na HE Brežice.**

**Table 2: Turbine operation at Brežice HPP.**

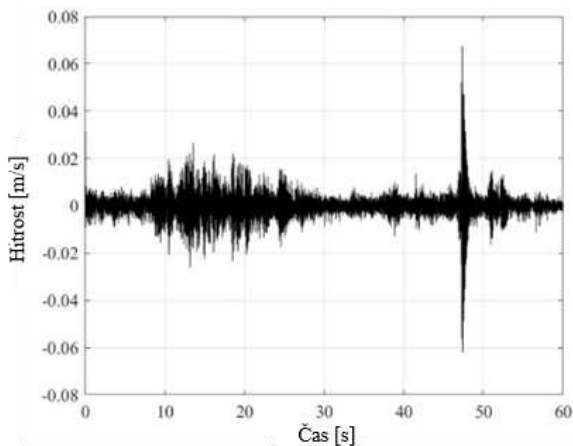
Agregat	Mediana dolžine obratovanja	Najdaljše obratovanje	Varnostne zapore	Število vseh ciklov	Število ciklov letno	Varnostne zapore letno	Obratovanje v enem letu
[oznaka]	[h]	[h]	[n <sub>var</sub> ]	[n <sub>tot</sub> ]	[n <sub>tot</sub> /letno]	[n <sub>var</sub> /letno]	[h/letno]
1	14	460	14	105	77	10	5447
2	15	640	7	105	77	5	5270
3	17	381	9	93	68	7	5098

**5.2. Analiza meritev vibracij na HE Brežice**

Vibracije stebra v prelivnem polju, ki je vibriral zaradi vzbujanja kot posledice gradbenih del na gradbišču, so prikazane na sliki 7, kjer je prikazan 60 s izsek meritve na stebri. V tem času je steber nihal pod vplivom stalne aktivnosti, amplitude vibracij so bile v območju do 0,02 m/s. V približno 48 s pa je viden odziv na nenadni dogodek na gradbišču, ki je povzročil kratkotrajni sunek (nagel manever z gradbeno mehanizacijo) in skok v amplitudi izmerjenega odziva do vrednosti 0,08 m/s. Vibracije smo merili tudi v času zunaj delovnih ur gradbišča in s tem izmerili, kakšne so vibracije stebra v času, ko je objekt izpostavljen minimalni količini ambientalnega vzbujanja. Izmerjene hitrosti vibriranja površine so bile v območju do  $5 \times 10^{-5}$  m/s. Obdelava meritve v

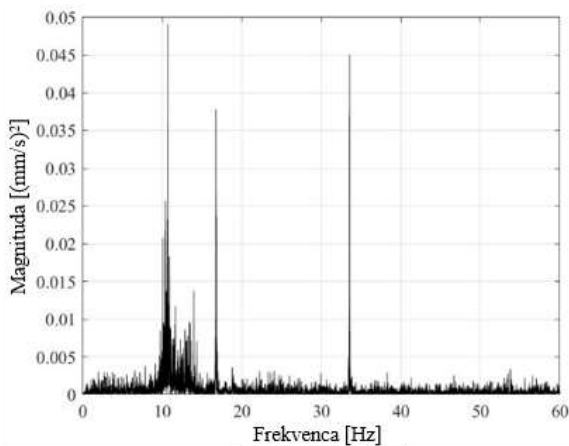
frekvenčnem spektru je razkrila tri glavne lastne frekvence stebra pri 10,8 Hz, 16,8 Hz in 33,6 Hz. Frekvenčni spekter meritev vibracij na stebri je prikazan na sliki 8.

Podobno kot steber v prelivnem polju je tudi stena v strojnici HE v popoldanskem času, ko se je umirilo ambientalno vzbujanje, nihala s precej nižjimi amplitudami ( $6 \times 10^{-5}$  m/s). Na slikah 9 in 10 je primer 150 s zajema vibracij z lokacije S2, in to na južni steni v strojnici, v času gradbiščnih del. Amplituda oscilacij vibriranja površine naraste na  $2,5 \times 10^{-4}$  m/s med gradbenimi deli, v primeru nenadnega, bolj intenzivnega dogodka na gradbišču pa tudi v tem primeru izmerjene amplitude naglo poskočijo.



**Slika 7:** Vibracije 1. stebra v prelivnem polju na vzbujanje z gradbišnimi deli v eksperimentalni točki P1.

**Figure 7:** Response of the 1st pillar in the spillway excited by the construction works, experimental point P1.

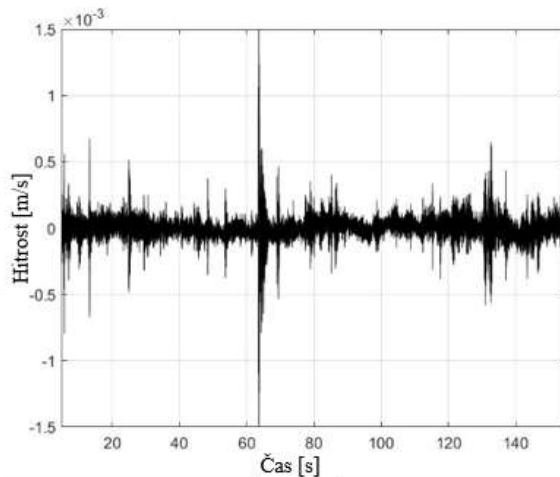


**Slika 8:** Frekvenčni spekter odziva stebra v prelivnem polju; merilno mesto P1.

**Figure 8:** Frequency spectrum of the pillar's response; captured at P1.

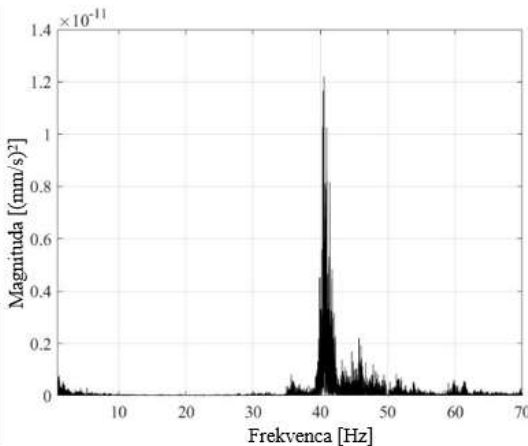
V primeru meritve v strojnici smo s preslikavo v frekvenčni spekter prepoznali najnižjo dominantno frekvenco stene pri 40,5 Hz.

Poleg meritev na konstrukciji smo merili vibracije neposredno na ohišju turbine. Turbine obratujejo s 107,14 vrtljajev na minuto, rotor turbine tehta približno 35 t, celotni agregat pa ima več kot 190 t. Nazivni pretok za posamezni agregat znaša 166 m<sup>3</sup>/s. Čeprav gre za zelo dovršene stroje, pri njihovem obratovanju prihaja do vibracij (zaradi



**Slika 9:** Vibracije južne stene strojnice na vzbujanje z gradbišnimi deli v eksperimentalni točki S2.

**Figure 9:** Response of the south wall in the powerhouse excited by the construction works, experimental point S2.



**Slika 10:** Frekvenčni spekter odziva južne stene strojnice; merilno mesto S2.

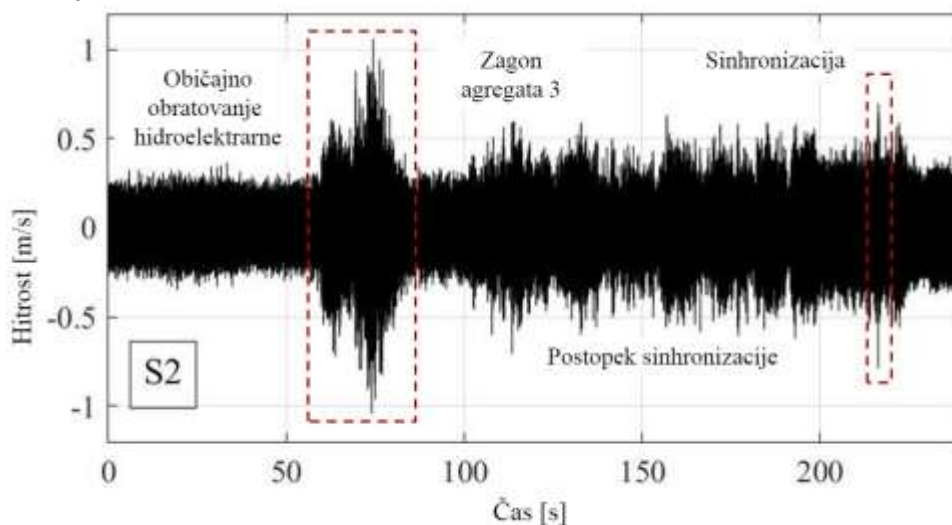
**Figure 10:** Frequency spectrum of the pillar's response in the spillway; captured at S2.

ekscentričnosti rotorja, statorja in različnih hidravličnih pojavov), ki se nato prenašajo na nosilno konstrukcijo. V ta namen smo med rednim obratovanjem turbine 1 na njej merili vibracije ter jih analizirali. V frekvenčnem spektru smo prepoznali frekvenco pri 1,8 Hz, ki predstavlja frekvenco vrtenja turbine, prepoznali smo tudi frekvenco 7,2 Hz, ki predstavlja frekvenco prehoda lopatic. Gonilnik turbine ima namreč štiri lopatice. Pojavljajo se tudi višje harmonične oblike

omenjenih frekvenc, najbolj izstopata tisti pri 21,4 Hz in 42,9 Hz. V frekvenčnem spektru prav tako izstopa vrh pri 100 Hz, ki ga povezujemo z vzbujanjem generatorja. Naštete vrednosti frekvenc so glavne vzbujalne frekvence agregata. Amplitude oscilacij merjenih hitrosti na ohišju turbine so bile med meritvijo v območju približno 1 mm/s.

Obratovanje HE je vir vzbujanja za betonsko konstrukcijo. Predstavili bomo nekaj najbolj zanimivih obratovalnih manevrov: oba tipa hitrih zapor (mehanska in električna) in zagon agregata. Slika 11 predstavlja primer odziva objekta ob zagonu agregata 3, s prikazom vibracij na merilnem mestu S2. V odzivu objekta lahko jasno prepoznamo faze zagona agregata. Približno po 52 s izvajanja meritve se je pričel postopek zagona z odpiranjem turbinskih loput, kar je omogočilo pritekanje vode na lopatice gonilnika. Pričetek vrtenja in pospeševanje gonilnika do nazivne hitrosti povzroči začetni porast izmerjenih amplitud vibracij, ki se vrnejo na izhodiščno raven kmalu

potem, ko gonilnik doseže nazivno hitrost vrtenja (po približno 10 s od pričetka vrtenja). Začetnemu zagonu nato sledi približno 2 min nestabilnega obratovanja v obdobju sinhronizacije generatorja. Trenutek sinhronizacije z omrežjem zaznamuje nagel hitri skok v vibracijah, nato pa amplituda vibracij pade in za čas rednega obratovanja ostaja približno konstantna. Vse omenjene faze in skoki amplitud so označeni na sliki 11. Cikel obratovanja agregata se zaključi z zaustavitvijo; na sliki 12 je prikazana zaustavitev agregata 3. Tudi zaustavitev poteka v stopnjah. Prične se s počasnim zapiranjem predturbinskih loput, temu čez nekaj sekund sledi odklop iz omrežja. Po razbremenitvi agregata z odklopom iz omrežja je treba turbino zaustaviti še mehansko, sicer bi začela ponovno pospeševati. Zaustavljanje je počasno in traja okoli 40–60 s. Maksimalne amplitude vibracij pri zagonu agregata so bile tipično v območju okoli 1 mm/s, pri redni zaustavitvi so dosegale vrednosti do približno 0,8 mm/s.



**Slika 11:** Zagon agregata 3 – časovna serija, zabeležena v točki S2. V času zagona HE že obratuje, v mrežo se je vklapljal dodatni agregat.

**Figure 11:** Start of Unit 3 – time-series captured at location S2. The powerhouse was already in operation; the measurement captures the start of the additional unit.

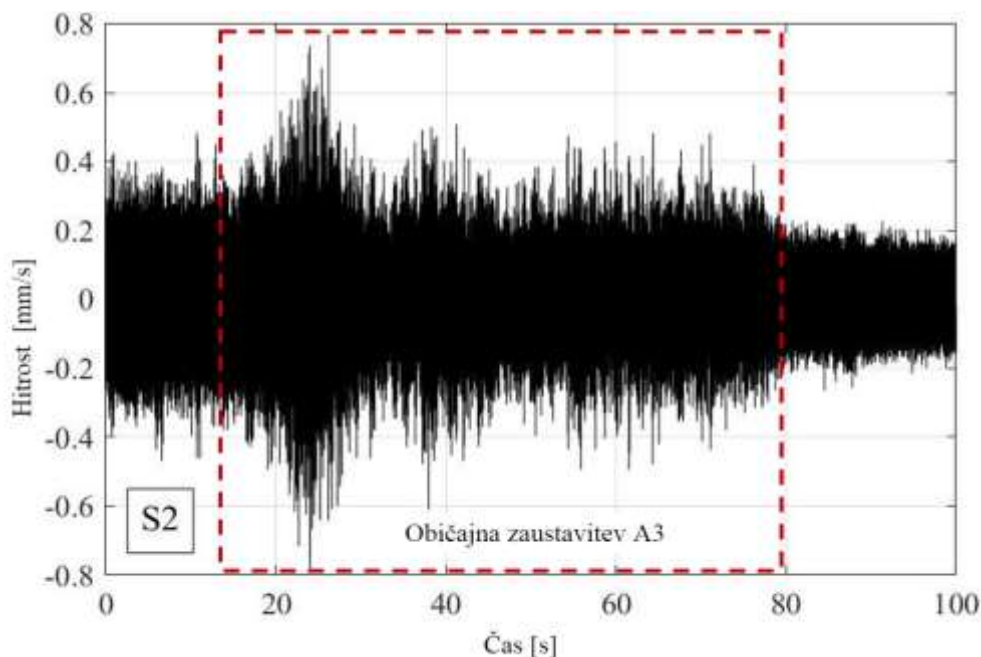
Za proženje varnostnih zapor skrbi avtomatika. Ko sistem zazna okvaro, ob kateri so izpolnjeni pogoji za pobeg turbine, se nemudoma aktivirata ali mehanska ali električna hitra zapora. Na slikah 13 in 14 sta prikazana dva primera vibracij konstrukcije ob proženju obeh zapor. Na sliki 13 prikazujemo primer, ko ob izpadu enega agregata iz

omrežja zgolj poskrbimo za varno zaustavitev tega agregata, s preostalimi delujočimi agregati pa nadomeščamo izpad. Ker ne prihaja do sprememb v krmiljenju ostalih agregatov, tudi ni dodatnega vzbujanja za objekt. V primeru na sliki 14, kjer opazujemo mehansko zaporo agregata 3, ima preostali agregat, ki je na mreži (agregat 2), nalogo

nadomestiti izpad proizvodnje. Dokler ne doseže novega ravnotežja na višji moči, je njegovo obratovanje neenakomerno, kar povzroča tudi povečane vibracije, ki se nato prenašajo na nosilno konstrukcijo.

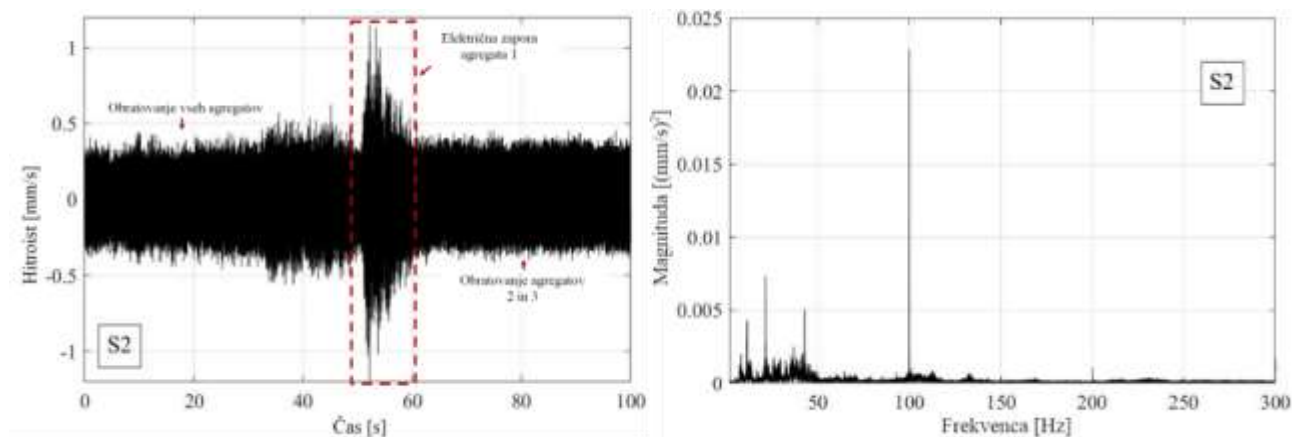
Poleg časovnega spektra prikazujemo tudi frekvenčni spekter meritev. Iz slik 13 in 14 lahko razberemo, da gre v obeh primerih za zelo hitra manevra, ki trajata le nekaj sekund (8–12 s). Če

pobljše pogledamo maksimalne izmerjene amplitude pri proženju hitrih zapor, so te za približno 20 % večje kot pri zagonu ter za približno tretjino večje kot pri običajni zaustavitvi. Na slikah 13 in 14 lahko opazimo zelo različna odziva konstrukcije po zaustavitvi agregata. Na sliki 13 namreč ne opazimo skokov v izmerjenih amplitudah, medtem ko je iz slike 14 razvidno izrazito spreminjanje amplitud.



*Slika 12: Običajna zaustavitev agregata 3, v času zaustavitve HE normalno obratuje.*

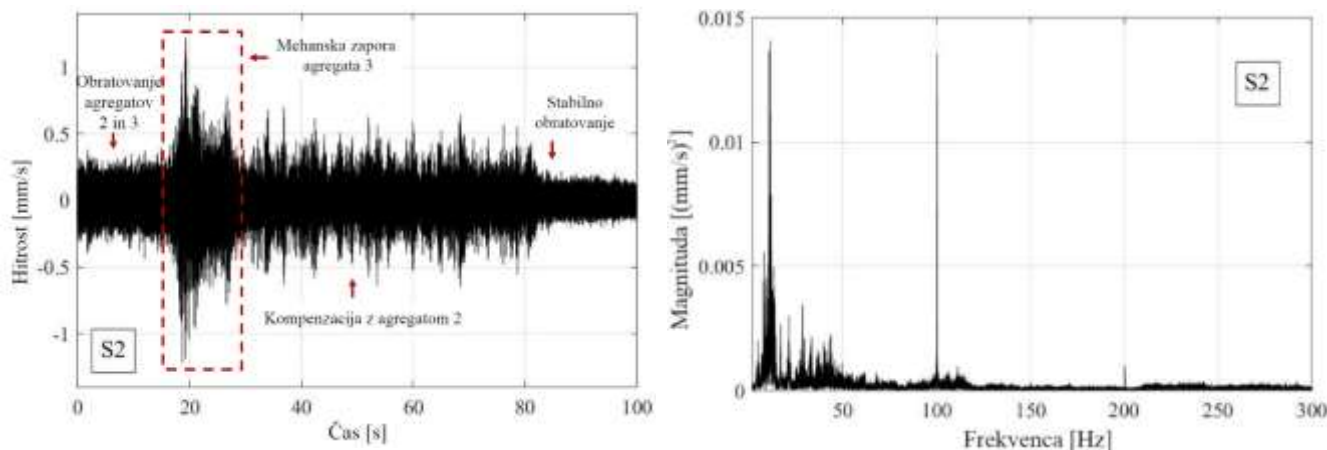
*Figure 12: Regular stop of unit 3 during normal powerhouse operation.*



*Slika 13: Električna zapora agregata 1 (levo: časovni spekter, desno: frekvenčni spekter).*

*Figure 13: Electrical brake on unit 1 (left: time spectrum, right: frequency spectrum).*





**Slika 14:** Mehanska zapora agregata 3 (levo: časovni spekter, desno: frekvenčni spekter).

**Figure 14:** Mechanical brake on unit 3 (left: time spectrum, right: frequency spectrum).

Frekvenčni spekter meritev je prikazan za primere zapor agregatov (glej slike 12, 13, 14). V izmerjenem odzivu smo prepoznali lastne frekvence konstrukcije kot tudi frekvence vzbujanja. Pri proženju zapor vedno močno izstopa vrh pri 100 Hz. Ta je posledica odklopa generatorja, zato je tudi magnituda tega vrha najvišja pri električni zapori, kjer se odklop generatorja zgodi takoj, sledi mehanska in šele nato običajna zaustavitev. Ta vrh prepoznamo tudi pri zajemu v času rednega obratovanja, saj je vsak generator nekoliko ekscentričen. V frekvenčnem spektru se pojavljajo tudi vrhovi pri 7,2 Hz, 21,4 Hz, 35,7 Hz, 42,9 Hz in 85,7 Hz, ki jih povezujemo z obratovanjem hidromehanske opreme. Poleg teh smo seveda izmerili tudi lastne vzbujene frekvence konstrukcije pri 6,1 Hz, 11,5 Hz, 16,8 Hz, 26,7 Hz in 40,5 Hz. Vsi ti vrhovi so bili jasno vidni v frekvenčnem spektru.

## 6. Numerično modeliranje

### 6.1 Numerični model

Eksperimentalne rezultate smo primerjali tudi z numeričnimi. Izdelali smo dva računski modela: model strojnice in model prelivnih polj. Za modeliranje smo uporabili programsko orodje Diana 10.2 (DIANA FEA, 2017). Numerični model prelivnih polj smo zgradili ob upoštevanju načela simetrije in modelirali polovice celotnega segmenta, kjer se nahaja pet prelivnih polj. Simetrijska os poteka v smeri osi vodotoka (v

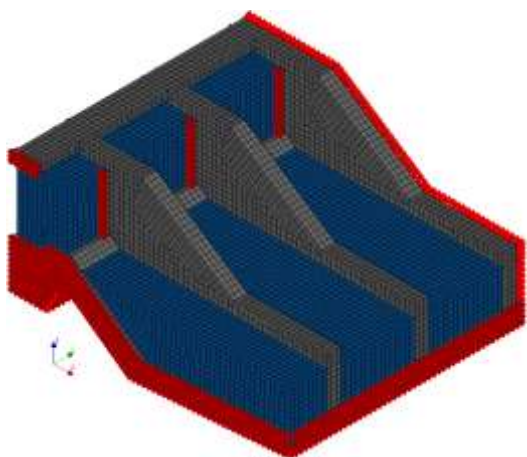
numeričnem modelu je to smer globalne osi X) in deli konstrukcijo na dva simetrična dela. Model z vsemi elementi je prikazan na sliki 15. Segmentne zapornice smo upoštevali preko robnih pogojev, zanemarili pa smo vpliv razbijačev v umirjevalnem bazenu in galerije v temeljnih betonih. Pri modeliranju smo upoštevali obratovalne nivoje vode v akumulaciji in v podslapju. Tekočino smo modelirali kot nestisljivo, na površini pa smo preprečili pojavljanje valov. Za beton smo predpostavili linearni materialni model. Stik vode z betonom smo modelirali preko stičnega elementa. To je ploskovni element, ki smo ga vstavili na mesto stika med konstrukcijskim in tekočinskim elementom. Na spodnjem robu modela so preprečeni pomiki v smeri osi X, Y in Z. Vpliv objekta strojnice je na boku nadomeščen s podporami v smeri osi Y. Pri delitvi na mrežo končnih elementov smo uporabili kvadratične elemente z omejeno največjo dovoljeno dolžino stranice na 1 m.

Model strojnice (slika 16) smo zgradili od nivoja nad masivnimi temeljnimi betoni, zato smo tudi predpostavili togo vpetje v podlago na spodnjem robu modela. Ta model sestavljajo masivni betonski blok, na nivoju turbinske etaže z odprtini turbinskih traktov ter vertikalni elementi do nivoja jeklene strehe. Južna stena, na kateri je bilo precej eksperimentalnih točk, je debela 40 cm z dodatnimi devetimi stebri, dimenzij 60 × 60 cm, ki podpirajo žerjavno progo. Streho smo modelirali z linijskimi elementi, ki smo jim pripisali geometrijo profilov

HEA in IPE ter materialne lastnosti konstrukcijskega jekla S235 v skladu s standardom Evrokod 3.

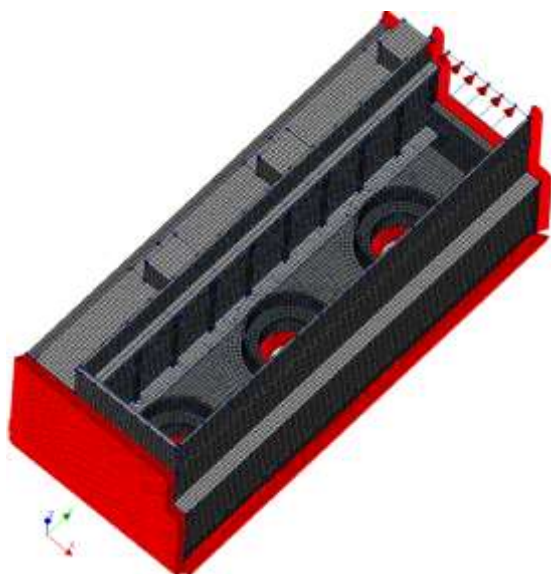
Za beton smo predpostavili linearno-elastično obnašanje, za materialne lastnosti smo privzeli projektne vrednosti betona v trdnostnem razredu C25/30 v skladu s standardom Evrokod 2.

Diskretizacijo smo izvedli s končnimi elementi kvadratne oblike z maksimalno dolžino stranice 0,5 m.



*Slika 15: Model prelivnih polj.*

*Figure 15: Spillway section model.*

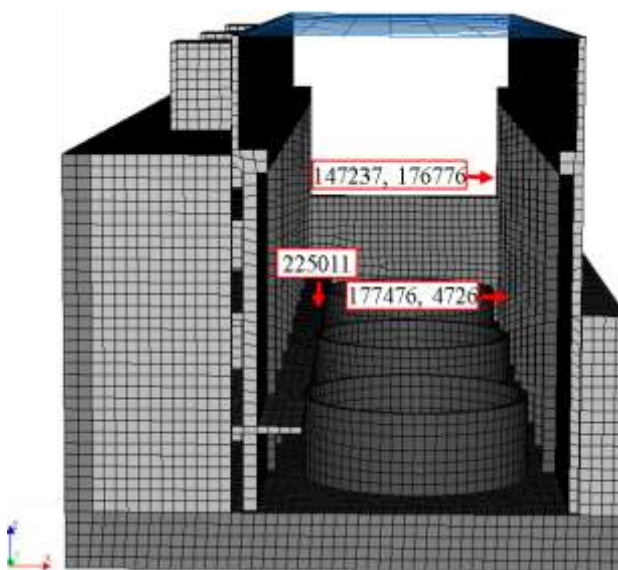


*Slika 16: Model strojnice.*

*Figure 16: Powerhouse model.*

## 6.2 Numerična analiza in rezultati

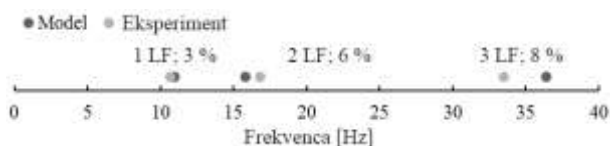
Oba numerična modela smo uporabili za analizo eksperimentalnih točk na objektu, izračun lastnih frekvenc objekta, primerjavo z meritvami in za simuliranje staranja objekta. Z numeričnim modelom smo potrdili primernost merilnih mest s stališča nihajnih oblik konstrukcije. Ta mesta so za model strojnice prikazana na sliki 17.



*Slika 17: Vozlišča v numeričnem modelu, ki sovpadajo z lokacijami eksperimentalnih točk na pregradi.*

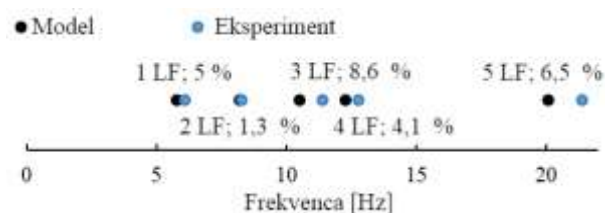
*Figure 17: Nodes in the numerical model that coincide with the experimental points at the dam.*

Izmerjene vrednosti lastnih frekvenc predstavljajo dejanske lastnosti objekta. Upravičeno so lahko pričakovana odstopanja od projektnih vrednosti. Poudariti moramo, da je bil numerični model zgrajen na podlagi projektnih materialnih vrednosti, a smo kljub temu ugotovili odlično ujemanje med merjenimi in računsko določenimi vrednostmi lastnih frekvenc. Odstopanja med numeričnimi in eksperimentalnimi vrednostmi so bila 3–5 % za prvo lastno frekvenco, pri drugi lastni frekvenci je v modelu strojnice prišlo le do 1,3 % razlike, na primeru stebra v prelivnem polju za 6 %, v primeru tretje lastne frekvence pa na obeh modelih zasledimo približno 8 % odstopanje, kar je tudi prikazano na slikah 18 in 19.



**Slika 18:** Primerjava numeričnih vrednosti lastnih frekvenc stebra v prelivnem polju (v smeri globalne osi Y) z eksperimentalnimi.

**Figure 18:** Measured eigenfrequencies of the pillar in the spillway (in the global Y-direction) with respect to the numerical values.



**Slika 19:** Primerjava numeričnih vrednosti lastnih frekvenc na južni steni v strojnici (v smeri globalne osi X) z eksperimentalnimi.

**Figure 19:** Measured eigenfrequencies (in the global X-direction) on the south wall of the powerhouse with respect to the numerical values.

Staranje objekta smo v računskem modelu opisali z nižanjem vrednosti modula elastičnosti betona. Predpostavka je temeljila na vrednosti projektnega modula elastičnosti betona ter ob pričakovanju, da bo, zaradi staranja in razraščanja mikro- in makrorazpok prišlo do mehčanja in zmanjšanja vrednosti modula elastičnosti betona za vsaj 10 %. Nato smo izvedli večje število simulacij ob postopnem padanju vrednosti modula elastičnosti ter opazovali, kako to vpliva na lastne frekvence objekta. Prvi dve lastni frekvenci stebra med prelivni polji sta pri vrednostih 10,98 Hz in 14,8 Hz. Zmanjšanje vrednosti modula elastičnosti za 12 % se je pokazalo v nižji vrednosti prvih dveh lastnih frekvenc za približno 6 %. Kot je razvidno iz preglednice 3, sta končni vrednosti prvih dveh lastnih frekvenc pri vrednostih 10,04 Hz in 14,09 Hz. Do podobnih rezultatov smo prišli tudi na modelu strojnice, prav tako je zaradi zmanjšanja vrednosti modula elastičnosti za 12 % sledilo zmanjšanje vrednosti lastnih frekvenc za pribl. 6 %.

**Preglednica 3:** Rezultati modela prelivnih polj s predpostavljenim staranjem.

**Table 3:** Results of the spillway section model under the influence of aging.

Modul elastičnosti [ $\times 10^7$ kN/m <sup>2</sup> ]	1. lastna frekvenca [Hz]	2. lastna frekvenca [Hz]
3,1	10,58	14,86
3,07	10,53	14,78
3,03	10,46	14,69
2,99	10,39	14,59
2,96	10,34	14,52
2,92	10,27	14,42
2,89	10,22	14,34
2,85	10,15	14,25
2,82	10,09	14,17
2,79	10,04	14,09

## 7. Razprava

Iz rezultatov statistične analize obratovalnih dnevnikov s HE Brežice, HE Krško in HE Vrhovo smo potrdili raziskovalno hipotezo, da so obratovalni cikli na obravnavanih objektih drugačni od splošno predvidenih na takih tipih HE. Zagoni in zaustavitve agregatov se statistično gledano zgodijo vsaj 1-krat tedensko, kar je bistveno več kot nekaj predvidenih zagonov na leto. Iz literature in našega eksperimentalnega dela je razvidno, da zagoni in zaustavitve predstavljajo izrazitejši vpliv na konstrukcijo kot običajno obratovanje. Izmerjene amplitude oscilacij konstrukcije v eksperimentalnih točkah so med rednim obratovanjem HE med 0,3 in 0,5 mm/s, med zagonom narastejo preko 1 mm/s, v času izvajanja sinhronizacije in manevriranja med obratovanjem pa se gibljejo nad 0,5 mm/s. Povečanja vibracij v stebrih prelivnih polj, ki bi nastale zaradi obratovanja HE, nismo zaznali, kar smo zaradi konstrukcijskih pogojev (dilatacije na stiku) tudi pričakovali.

Raziskava je potekala v času gradnje in poskusnega obratovanja objekta. V tako kratkem časovnem obdobju do pojava staranja objekta seveda še ni prišlo. Smo pa z meritvami v zgodnjem življenjskem obdobju pregrade zabeležili začetno stanje objekta s poudarkom na dinamičnih lastnostih, kar je odlična osnova za napovedi in ugotavljanje morebitnih sprememb. Prepogosto se meritve začnejo izvajati na objektih, ko že pride do poškodb, in tako o začetnem stanju objekta lahko le sklepamo iz projektne dokumentacije, pri tem pa zanemarimo odstopanje med projektnimi in dejanskimi vrednostmi. Staranje smo simulirali z računskimi modeli strojnice in prelivnih polj. Oba modela sta potrdila predpostavko, da sprememba vrednosti modula elastičnosti betona značilno vpliva na vrednosti lastnih frekvenc. Spremembo lastnih frekvenc lahko zaznamo z analizo meritev vibracij na objektu in tako spremljamo proces staranja betona ter spremembe konstrukcije pravočasno zaznamo.

Z računskim modelom smo potrdili primernost izbranih eksperimentalnih točk na objektu, saj se nahajajo na mestih, kjer je mogoče izmeriti vsaj prve tri lastne frekvence. Pokazali smo, da padec vrednosti modula elastičnosti za 12 % povzroči znižanje vrednosti lastnih frekvenc za približno 6 %. Do podobnih rezultatov smo prišli tako na modelu strojnice kot tudi na modelu prelivnih polj.

Analiza frekvenčnega spektra je pokazala, da so nekatere frekvence, ki so posledica mase, oblike in delovanja vgrajenih turbin, precej blizu lastnim frekvencam konstrukcije, kar seveda ni zaželeno. V območju nizkih frekvenc je kritično območje 7–16 Hz ter območji okoli 21 Hz in 42 Hz. Frekvenca prehoda lopatic turbine je 7,2 Hz, lastni frekvenci objekta sta izmerjeni pri 6,1 Hz in 10,8 Hz, medtem ko je tretja lastna frekvenca pri 14,1 Hz, kar je povsem blizu 14,4 Hz, ki je tudi prepoznana kot frekvenca vzbujanja, vendar ima nizko moč. Višje frekvence in pojavnost višjih harmonikov so povezani z obratovanjem zunaj optimalnih pogojev in povečanih pulzacij v vodnem toku ter tudi z obrabo mehanske opreme. Svoje meritve smo izvajali v času, ko obrabe še ni bilo in ko so turbine obratovale na nazivnih močeh.

## 8. Zaključki

V članku smo obravnavali problematiko hidroenergetskih pregrad ter načinov za spremljanje njihovega kondicijskega stanja s spremljanjem vibracij. Predstavili smo problematiko obratovalnih obtežb na HE pretočnega tipa v Sloveniji ter njihovega vpliva na pospešeno staranje objektov. Namen te raziskave je prva podrobna in celovita obravnava problema staranja hidroenergetskih pregrad. Pregrado HE Brežice smo začeli opazovati takoj po zaključku gradbenih del, izvedli smo analizo obratovalnih vzorcev in merili vibracije konstrukcije pod vplivom različnih obratovalnih manevrov. V raziskavi smo tudi upoštevali izkušnje z drugih, konstrukcijsko sorodnih objektov, ki so v obratovanju že dlje časa, pri čemer nekateri že kažejo znake staranja, z ne povsem pojasnjenimi vzroki. Glavne ugotovitve lahko strnemo v naslednje točke:

- Vpliv rednih in izrednih obratovalnih manevrov smo zaznali v odzivu konstrukcije pregrade. Vpliv obratovanja turbin se prenaša tudi v masivne betone. Vsiljene vibracije zaradi obratovanja turbin je mogoče zaznati po celotni konstrukciji pregrade in ne samo v bližini agregatov.
- Zaradi kumulativnega učinka obratovalnih obtežb, ki so na hidroenergetskih pregradah prisotne vsaj 60 % časa v letu, je obravnava in spremljanje njihovega vpliva nujna, še posebej, ker vemo, da je utrujanje betona zelo kompleksen pojav. Pojav mikrorazpok v betonih v stiku z vodo pa predstavlja resno tveganje za varnost hidrotehničnih objektov.
- Iz analize obratovalnih dnevnikov je jasno, da je število obratovalnih ciklov znatno večje, kot se je predvidevalo v času zasnove objektov, zato se je treba problematiki natančno posvetiti.
- Pokazali smo, da je spremljanje vibracij koristen sestavni del sistema spremljanja kondicijskega stanja hidroenergetskih pregrad ter da je mogoče uporabljati tudi brezkontaktno metode.



- Z računskim modelom smo pokazali, da se spremenjene lastnosti materiala konstrukcije lahko prepozna v frekvenčnem spektru objekta.

## Zahvala

Delo je nastalo v okviru doktorskega študija prve avtorice in je bilo delno sofinancirano iz raziskovalnega programa P2-0180 Vodarstvo in geotehnika, ki ga financira Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije.

## Viri

- ANCOLD (2018). Register of Large Dams in Australia. Dostopno na: [https://www.ancold.org.au/?page\\_id=24](https://www.ancold.org.au/?page_id=24) (pridobljeno 6. 12. 2018).
- Bernstone, C. (2006). Automated performance monitoring of concrete dams. Thesis, Engineering geology, Faculty of Engineering, Lund University, 94 p.
- Birtharia, A., Jain, S. K. (2015). Applications of Ambient Vibration Testing: An Overview. *Int. Res. J. Eng. Technol.* **2(4)**, 969–976.
- Brincker, R., Ventura, C. (2015). Introduction to operational modal analysis. John Wiley & Sons, Ltd, 372 p.  
<https://doi.org/10.1002/9781118535141>.
- Bukenya, P., Moyo, P., Beushausen, H., Oosthuizen, C. (2014). Health monitoring of concrete dams: a literature review. *J. Civ. Struct. Heal. Monit.* **4(4)**, 235–244.  
<https://doi.org/10.1007/s13349-014-0079-2>.
- Courtney, T. H. (2005). Mechanical Behaviour of materials, 2nd ed. Waveland press, Inc., Long Grove, Illinois, 733 p.
- DEWESoft (2019). DEWESoft measurement innovation User manual.
- DIANA FEA (2017). User's Manual - Release 10.2. Diana FEA BV. Delft, Netherlands.
- Halkon, B. J., Rothberg, S. J. (2017a). Taking laser Doppler vibrometry off the tripod: correction of measurements affected by instrument vibration. *Opt. Lasers Eng.* **91**, 16–23.  
<https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.006>.
- Halkon, B. J., Rothberg, S. J. (2017b). Restoring high accuracy to laser Doppler vibrometry measurements affected by vibration of beam steering optics. *J. Sound Vib.* **405**, 144–157.  
<https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.05.014>.
- Hillgren, N. (2011). Analysis of hydraulic pressure transients in the waterways of hydropower stations. Thesis, University of Uppsala, 70 p.
- Hočevar, M. (2018). Introduction to turbine machinery. Fakulteta za strojništvo, Ljubljana, 190 p.
- Hsieh, K. H., Halling, M. W., Barr, P. J. (2006). Overview of Vibrational Structural Health Monitoring with Representative Case Studies. *J. Bridg. Eng.* **11(6)**, 707–715. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)1084-0702\(2006\)11:6\(707\)](https://doi.org/10.1061/(asce)1084-0702(2006)11:6(707)).
- ICOLD Committee on Dam Ageing (1994). Ageing of dams and appurtenant works Review and recommendations Bulletin 93. ICOLD - CIGB, Paris, 237 p.
- ICOLD Technical Committee on Dams for Hydroelectric Energy. (2019). Dams for hydroelectric energy (Bulletin Preprint). CRC Press, Paris, 77 p.
- Killingtveit, Å. (2019). Hydropower, in: Letcher, T. M. B. T.-M. G. W. (Ed.), Manageing Global Warming An Interface of Technology and Human Issues. Academic Press, 265–315.  
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814104-5.00008-9>.
- Klun, M., Zupan, D., Lopatič, J., Kryžanowski, A. (2019). On the application of laser vibrometry to perform structural health monitoring in non-stationary conditions of a hydropower dam. *Sensors (Switzerland)* **19(17)**. <https://doi.org/10.3390/s19173811>.
- Lopez, F., Restrepo Velez, L. (2003). Assessment and structural rehabilitation with post-tensioning and CFRP of a mass concrete structure subjected to dynamic loading, in: FIB Symposium Concrete Structures in Seismic Regions. Athens, Greece.
- Martin, P., Rothberg, S. J. (2011). Methods for the quantification of pseudo-vibration sensitivities in laser vibrometry. *Meas. Sci. Technol.* **22(3)**.  
<https://doi.org/10.1088/0957-0233/22/3/035302>.
- Mikec, S. (2018). Prehodnost vodnih turbin tipa Kaplan za dolvodne ribje migracije - Passibility of Kaplan turbine for downstream fish passage. Univerza v Ljubljani, 65 p. (in Slovenian).
- Rothberg, S. (2006). Numerical simulation of speckle noise in laser vibrometry. *Appl. Opt.* **45(19)**, 4523–4533. <https://doi.org/10.1364/AO.45.004523>.



- Rothberg, S. J., Baker, J. R., Halliwell, N. A. (1989). Laser Vibrometry: Pseudo-Vibrations. *J. Sound Vib.* **135**(3), 516–522. [https://doi.org/10.1016/0022-460X\(89\)90705-0](https://doi.org/10.1016/0022-460X(89)90705-0).
- Seleznev, V., Liseikin, A., Bryksin, A. (2014). What Caused the Accident at the Sayano–Shushenskaya Hydroelectric Power Plant (SSHPP): A Seismologist’s Point of View. *Seismol. Res. Lett.* **85**(4), 817–824. <https://doi.org/10.2166/wst.2007.821>.
- SLOCOLD (2021). List of Large Dams in Slovenia, SLOCOLD - Slovenian National Committee on Large Dams. Dostopno na: [http://www.slocold.si/e\\_pregrade\\_seznam.htm](http://www.slocold.si/e_pregrade_seznam.htm) (pridobljeno: 1. 5. 2021).
- Smolar-Žvanut, N., Meljo, J., Kodre, N., Prohinar, T. (2019). Multipurpose water uses of reservoirs in Slovenia, in: Sustainable and Safe Dams around the World. Canadian dam association, Ottawa, Canada, 1619–1629.
- Strean, R. F., Mitchell, L. D., Barker, A. J. (1998). Global noise characteristics of a laser Doppler vibrometer 1. *Theory. Opt. Lasers Eng.* **30**(2), 127–139. [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(98\)00014-1](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(98)00014-1).
- The MathWorks (2018). MATLAB release 2018a. Natick, Massachusetts, USA.
- Trivedi, C., Gandhi, B., Michel, C. J. (2013). Effect of transients on Francis turbine runner life: A review. *J. Hydraul. Res.* **51**(2), 121–132. <https://doi.org/10.1080/00221686.2012.732971>.
- Urquiza, G., García, J. C., González, J. G., Castro, L., Rodríguez, J. A., Basurto-pensado, M. A. (2014). Failure analysis of a hydraulic Kaplan turbine shaft. *Eng. Fail. Anal.* **41**, 108–117. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.02.009>.
- USBR (2018). National Inventory of Dams Dataset Dostopno na: <http://nid.usace.army.mil/> (pridobljeno: 1. 5. 2021).
- Zenz, G. (Ed.) (2008). Book of Extended Abstracts symposium Hydro Engineering, in: Book of Extended Abstracts Symposium Hydro Engineering. ICOLD, Vienna, Austria. <https://doi.org/10.3217/978-3-85125-613-0>.
- Zhang, L. M., Peng, M., Chang, D., Xu, Y. (2016). Dam failure mechanisms and risk assessment. John Wiley & Sons Singapore Pte. Ltd, 450 p.