

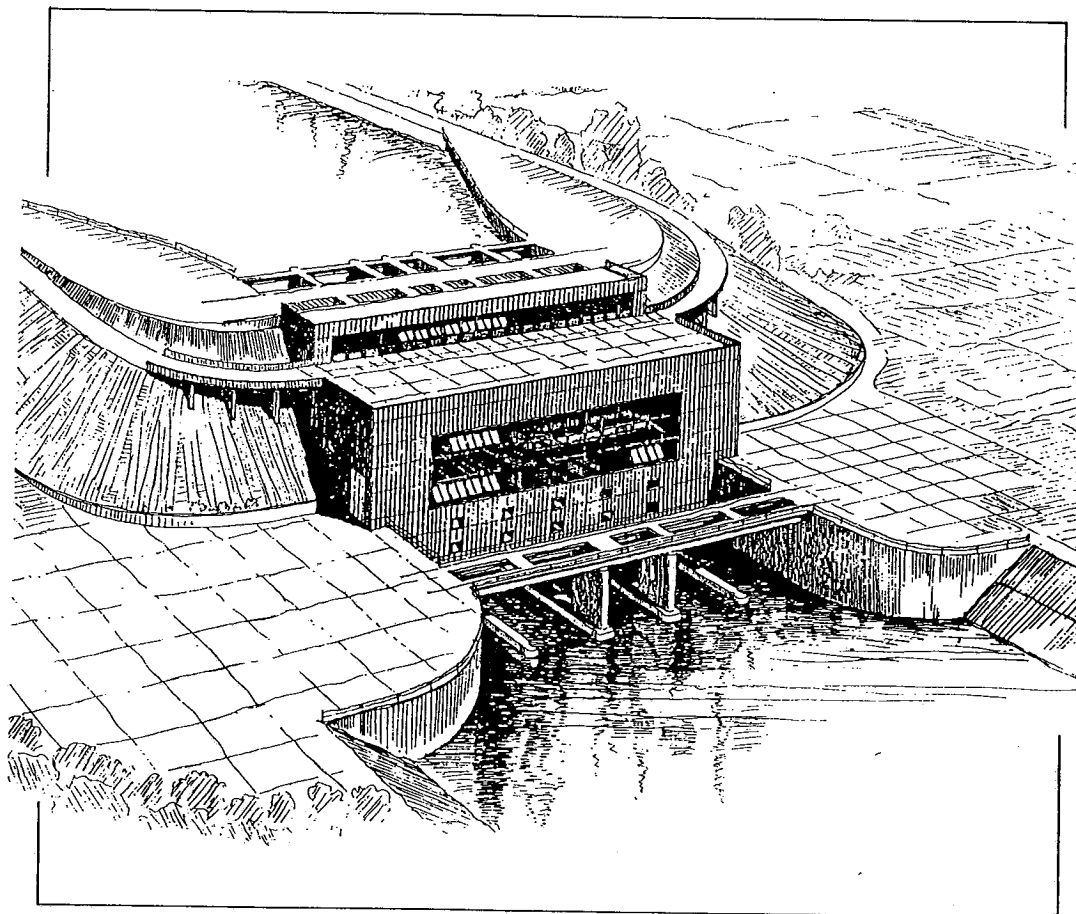
2. POSVETOVANJE

SLOVENSKI NACIONALNI KOMITE ZA VELIKE PREGRADE — SLOCOLD

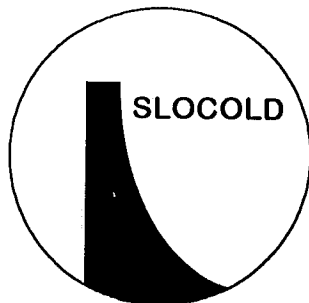
z b o r n i k p r i s p e v k o v

— urednika —

A. Krupenko / B. Zadnik



Ljubljana, april 1995



2. POSVETOVANJE
SLOVENSKI NACIONALNI KOMITE
ZA VELIKE PREGRADE - SLOCOLD

zbornik prispevkov

Andrej Krupenko / Branko Zadnik (urednika)

Ljubljana, april 1995

UVOD

Zbornik vsebuje prispevke, predstavljene na 2. posvetovanju Slovenskega nacionalnega komiteja za velike pregrade - SLOCOLD v Ljubljani, 13. aprila 1995.

Posvetovanje je namenjeno vsem, ki se ukvarjajo s problematiko pregrad in spremljajočih objektov okoli njih, kot tudi zagotavljanju varnosti le-teh ter njihovemu vzdrževanju. Urednika sva zbrala prispevke predvsem s področja vzdrževanja objektov, čeprav je bila želja, da bi bil predstavljen tudi kakšen prispevek s področja regulative s področja velikih pregrad. Vsi vemo, da se veljavnost obstoječih jugoslovanskih predpisov izteka in bi bilo sprejetje ustreznih predpisov s tega področja nujnost. Informacija o dogajanju na tem področju bi bila za vse, ki se na tem področju udeležujemo, zelo dobrodošla.

Pri dosedanjih posvetovanjih in podobnih srečanjih na tem in podobnih področjih se je pokazalo, da so taka posvetovanja koristna in potrebna. Glede na majhno številnost članstva našega društva je število prispevkov preseglo pričakovanja. Upava samo, da bomo avtorji prispevkov ravno tako entuziastični pri pripravi prispevkov, kot doslej in da bodo taka posvetovanja redna in na takem nivoju, kot je bilo to.

Posamezni prispevki so v zborniku objavljeni v obliki, kot so jih pripravili avtorji. Zato je vsak avtor odgovoren za jezikovno in vsebinsko ustreznost prispevka. Za trud, s katerim so nedvomno prispevali k širjenju znanj s tega področja, se jim iskreno zahvaljujemo. Vsi prispevki so bili predstavljeni na visokem kvalitetnem nivoju z vso razpoložljivo opremo za take predstavitve, ki nam je v tem trenutku na voljo.

Pri oblikovanju naslovne strani je sodeloval Matjaž Rogel, za kar se mu prav tako iskreno zahvaljujemo.

Na naslovni strani pogled na HE Srednja Drava II.

Ljubljana, aprila 1995

Andrej Krupenko
Branko Zadnik

VSEBINA

Branko Zadnik Andrej Krupenko	Varnost pregradnega objekta HE Mariborski otok	1
Matjaž Četina	Hidravlični izračun valov vsled porušitev pregrad	9
Igor Čehovin	Položaj hidravličnih modelnih raziskav hidrotehničnih objektov v slovenskem prostoru	15
Andrej Kryžanowski	Ekološke sanacije v EES - primer sanacije Zbiljskega jezera	19
Savo Janežič Božo Kogovšek	Jez na Savi za Jedrsko elektrarno Krško - opazovanje in vzdrževanje jezua	26
Rudi Brinšek	Analiza stanja drenažnega sistema pregrade Moste	34
Zoran Stojič Meta Povž	Umetno drstišče pod pregrado za HE Mavčiče	42
Branko Zadnik	Ocena varnosti obstoječih pregrad na reki Dravi v Sloveniji	46
Andrej Kryžanowski	Samodejni dvig zapornice na pregradi Mavčiče	54

VARNOST PREGRADNEGA OBJEKTA HE MARIBORSKI OTOK

dr. Branko Zadnik, dipl. ing., IBE d.d.
Andrej Krupenko, dipl. ing., IBE d.d.

POVZETEK

V pričujočem prispevku je kratko prikazano kako smo analizirali in ocenili varnostno stanje obstoječega pregradnega objekta HE Mariborski otok. Uporabljeni so bili statistični in deterministični modeli numeričnih preiskav. Rezultati kažejo zadovoljivo "kondicijo" objekta ob normalnih statičnih obtežbah. Na potresno obtežbo objekt še ni bil analiziran, kar bi bilo za kompletiranje slike o varnostnih razmerah ob nastopu takšnega dogodka nujno potrebno.

ABSTRACT

The paper presents the safety assessment procedure for the existing dam Mariborski otok HPP. The statistic and deterministic numerical models have been used. The results show the satisfactory "condition" of the dam at normal statical loads. The dynamic analysis of the earthquake loads has not been performed yet. Such an analysis would be necessary to complete the dam safety assessment.

1. SPLOŠNO

Pregrade so objekti grajeni za zelo dolgo življenjsko dobo. V preteklosti je prevladovalo prepričanje, da so le-te, tako kot vse ostale hidrotehnične zgradbe, praktično večne. Danes, ko so pionirski časi gradnje tovrstnih objektov mimo, se pojavlja čedalje večje število objektov, ki s svojim stanjem zahtevajo določene ukrepe, s katerimi se lahko zagotovi podaljšanje življenjske dobe in njihovo varno obratovanje. V svetu, in tudi pri nas, je veliko starih pregrad, ki so bile zasnovane in grajene po takrat veljavnih standardih in zakonodaji. Kasneje se je pri mnogih ugotovilo, da ne ustrezajo aktualnim tehničnim zahtevam, standardom in današnjemu poznavanju naravnih vplivov na tovrstne konstrukcije.

Kako obvladati takšno, kontradiktorno stanje med realnostjo starih objektov in zahtevami novih spoznanj, je ena od glavnih tem raziskovanja, predvsem v industrijsko razvitih državah, ki imajo v uporabi največje število starih pregrad. Razvoj znanosti, tehničnih standardov, socialnih in zakonodajnih zahtev vodi k bistvenim spremembam pri kriterijih varnosti na tem področju.

Pomembna korelacijska zahteva izhaja tudi iz visokih stroškov, ki nastopijo praktično ob vsaki intervenciji na obstoječi stari pregradi, pa naj gre za konstrukcijske ojačitve pregradnega telesa, preprečitve pronicanja vode v telo konstrukcije, obravnavanje temeljenja ali povečevanje kapacitet pretočnih organov, itd. Stroški ne nastajajo le z

direktnimi, že omenjenimi posegi, temveč tudi ob upoštevanju izgub zaradi neobratovanja objekta v času rekonstrukcije, menjave hidravlične opreme, uvajanja modernih sistemov opazovanja in zgodnjega javljanja, itd..

Pregrade v obratovanju so izpostavljene procesu "staranja", ki mora biti zaradi pomembnosti teh objektov, nadzorovano z dveh zornih kotov.

- fizičnega: zaradi stalnega in neizogibnega spreminjanja lastnosti materialov konstrukcij, ki so posledica vplivov notranjih in zunajih sil, ciklično ponavljajočih se obtežb in tudi spreminjanja vplivov okolja in
- projektnega oziroma nadzornega: zaradi možnosti, ki jih nudi in zahteva splošen razvoj znanja in poznavanja problematike v zvezi s pregradnimi objekti. Pri tem je potrebno poudariti, da preverjanje varnostnega stanja pregrade ne more podati enoznačnega in dokončnega odgovora o "varnostnem faktorju" objekta.

V pričujočem prispevku prikazujemo, kako smo analizirali varnostno stanje na konkretnem pregradnem objektu HE Mariborski otok, ki je v obratovanju že pol stoletja in je zadnji dve desetletji deležen organiziranega opazovanja različnih parametrov, ki nam lahko marsikaj povedo o njegovi "kondiciji".

2. KRATEK OPIS OBJEKTA HE MARIBORSKI OTOK

Pregradni objekt HE Mariborski Otok je betonska konstrukcija, ki sestoji iz treh turbinskih stebrov lociranih v osi pravokotni na tok reke Drave. Med turbinskimi stebri, levim in desnim bregom so štiri pretočna polja, ki so intaktno, togo, povezana s turbinskimi stebri v nivoju temeljev. Mostne konstrukcije povezujejo zgornje dele stebrov. Temeljne plošče, stropne plošče vtoka, iztoka in generatorskih jaškov so izvedene iz masivnega betona in tvorijo skupaj z zunajimi stenami debelin do 2.75 m, togo škatlasto konstrukcijo. Pretočno polje je izvedeno iz masivnih betonov v obliki plošče minimalne debeline 2.0 m, ki je, kot predvidevamo, togo konstrukcijsko povezana s sosednjima turbinskima stebroma. Osnovne dimenzije pregrade :

- širina pretočnega polja : 18,5 m
- širina turbinskega stebra : 18,5 m

3. IZVRŠENE ANALIZE

3.1 Splošno

V sklopu študije smo analizirali globalno varnost objekta HE Mariborski Otok ob upoštevanju vseh obstoječih podatkov zbranih na osnovi projekta opazovanja pregradnega objekta (lit.1) v dosedanji življenjski dobi. Analiza trenutne, dejanske varnosti objekta je bila izvršena na osnovi pregleda in študija periodičnih opazovanj objekta, ki so že bila izvršena in popisujejo obnašanje objekta oziroma vplivov nanj v odvisnosti od časa (piezometrični tlaki, geodetske meritve pomikov objekta, spreminjanje kvalitete materiala,...). Pri analizi varnosti smo bili postavljeni pred zahtevno nalogo saj je bilo potrebno upoštevati dejansko stanje konstrukcije in same lokacije, ki je zadovoljivo dokumentirano le za čas in obseg opazovanja objekta, ki se je sistematično pričelo po letu 1970. Originalna projektna dokumentacija, ki bi lahko bila opora pri presoji današnje varnosti, nam ni bila na razpolago. V arhivih elektrarne smo uspeli dobiti le grafičen del projekta (tudi ne popolnega), dočim originalnih statičnih izračunov nismo uspeli najti. Zaradi tega vrednosti nekaterih parametrov danes ne moremo primerjati s projektnimi in zaključki bazirajo le na ugotovitvah današnjih analiz.

Ocena varnosti temelji predvsem na statičnih analizah in psevdostatičnem obravnavanju potresne obtežbe določene na osnovi seizmološke karte (lit.2), ki je izdelana za 1000 letno povratno dobo potresa in 63% verjetnostjo njegovega nastopa. Za izdelavo dinamičnih analiz, ki bi lahko eksaktnije prikazale načine obnašanja objekta v primeru nastopa potresa, in njegovo varnost v tem primeru, bi bilo potrebno izdelati študijo s katero bi se določili projektni parametri konkretno za lokacijo. Sam objekt sicer v času projektiranja ni bil preverjen na potresno obtežbo, saj se je potresno inženirstvo pričelo razvijati šele v sedemdesetih letih.

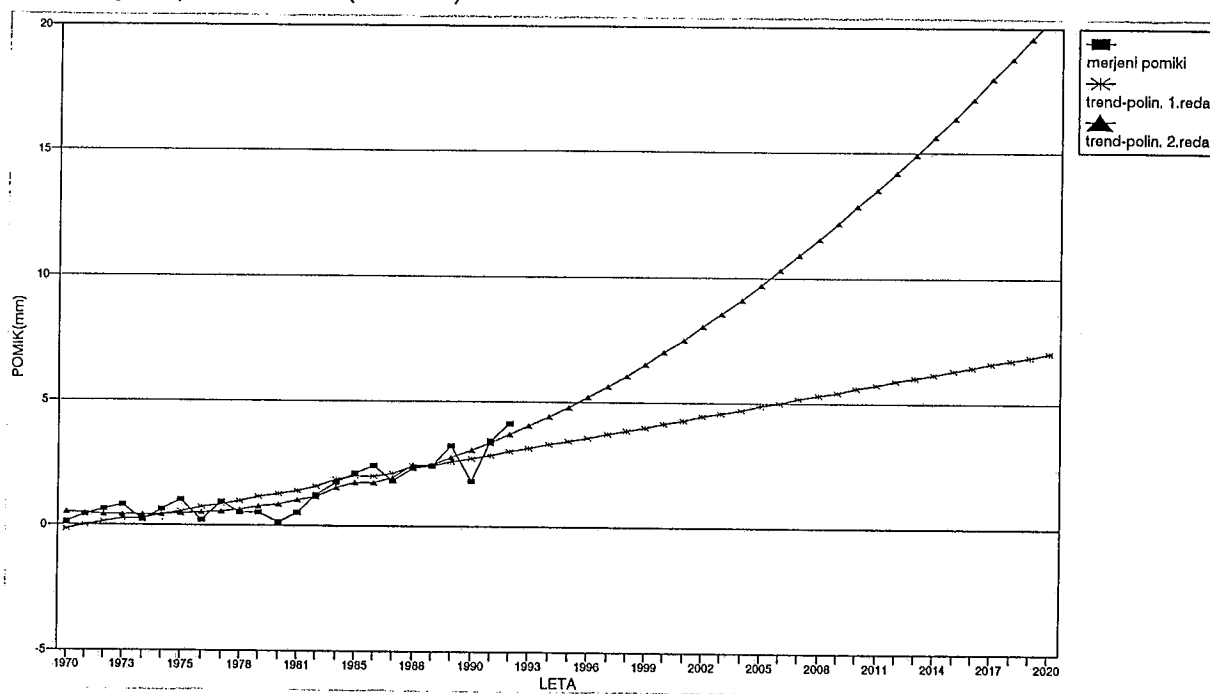
V sklopu študije smo izvedli več analiz, ki dajejo vsaka zase svoj pogled na varnost objekta. Končna presoja in ocena stanja konstrukcije ter stopnje varnosti ni bila in ne more biti izražena z eno številko, npr. nekakšnim skupnim faktorjem varnosti, temveč je podana v obliki opisne ocene, ki temelji na dognanjih posameznih analiz. Zaradi tega smo izvedli več analiz, ki bi jih lahko v grobem delili v analize, ki pripadajo statističnim modelom preiskave in analize, ki temeljijo na determinističnem modelu preiskave pregrade.

- Statistični model smo uporabili za analizo merjenih nagibov pregrade ter horizontalnih oziroma vertikalnih pomikov opazovanih točk. S pomočjo regresijske analize smo prognozirali trend obnašanja opazovanih točk v bodočnosti.
- Med deterministične modele, ki smo jih uporabili prištevamo analize stabilnosti objekta s končnimi rezultati v obliki faktorjev varnosti na zdrs in/ali prevrnitev, numerično analizo značilnega prereza turbinskega stebra, s katero smo določili napetostno stanje v telesu pregrade, pomike ob dani obtežbi in dinamične analize, od katerih pa smo izvedli, zaradi že omenjenega pomanjkanja podatkov o seizmičnosti lokacije, le določitev lastnih frekvenc in lastnih nihajnih oblik objekta.

4. REZULTATI

4.1 Statistični pristop

S pomočjo nelinearne regresijske analize smo analizirali merjene podatke o deformacijah objekta in sicer za zasuke, horizontalne pomike in vertikalne pomike v opazovanih točkah. Na osnovi teh podatkov smo s pomočjo regresijske analize prognozirali obnašanje konstrukcije v prihodnosti (Slika 5).



Slika 3. Regresijska analiza horizontalnih pomikov opazovalne točke 3h s poskusom napovedi obnašanja v bodočnosti.

4.2 Deterministični pristop

4.2.1 Analiza stabilnosti

Pri analizi stabilnosti pregradnega objekta smo se omejili na analizo značilnega, reprezentativnega dela objekta, to je turbinskega stebra v sodelovanju s pretočnim poljem. Pri tem smo upoštevali, da turbinski stebel in pretočno polje sodelujeta kot enotno telo, ki prevzema vse obtežbe v njunem območju in skupaj, v sodelovanju, zagotavljata stabilnost neodvisno od nadaljnih navezav v celotni pregradni objekt. Analizirali smo stabilnost konstrukcije na zdrs in prevrnitev. Kot torno karakteristiko v kontaktni ploskvi med betonom in tlemi smo privzeli vrednost 1.00 kar odgovarja vrednosti $\text{tg}\phi$ za kot notranjega trenja $\phi = 45^\circ$. Potrebno je poudariti, da je to privzeta vrednost in da nimamo podatka, ki bi bil eksperimentalno preverjen. V kolikor bi bila dejanska vrednost ϕ manjša od navedene, bi lahko prišlo do neugodnih zaključkov pri analizi stabilnosti na zdrs. Zaradi tega smo predlagali, da bi bilo primerno to osnovno predpostavko naknadno preveriti z eksperimentom.

Stabilnost smo analizirali le glede na vpliv statičnih obtežb kot so obtežbe zaradi vpliva zgornje vode v akumulaciji, kot tudi spodnje vode. Vzgonski tlaki so bili določeni teoretsko glede na potencialno črto, ki povezuje zgornjo in spodnjo vodo, s čemer smo glede na vrednosti merjenih piezometričnih pritiskov v vrtinah K, v kontrolnem hodniku, na varni strani. Potresna obtežba je bila upoštevana kot psevdostatična obremenitev. Vključena je tudi lastna masa težke opreme, betonskih masivnih delov konstrukcije kot tudi kombinacija praznih ali polnih vtokov, špirale in sesalnih cevi.

TABELA I. - Varnosti na zdrs in prevrnitev za posamezne obtežne primere.

Obt. komb	Opis konstrukcije	Višinska kota vode	Potr. obt.	Varnost proti zdrsu	Varnost proti prevrnitvi
1	Celotna konstr. vtok poln	Zg.v.=267,20 Sp.v.=253,40	Da	1,33	3,55
2	Celotna konstr. vtok poln	Zg.v.=267,20 Sp.v.=259,00	Da	1,48	3,71
3	Celotna konstr. vtok z vodo	Zg.v.=267,20 Sp.v.=253,40	Ne	3,52	10,16
4	Celotna konstr. vtok prazen	Zg.v.=267,20 Sp.v.=253,40	Da	1,03	2,71
5	Celotna konstr. vtok prazen	Zg.v.=267,20 Sp.v.=259,00	Da	1,15	2,83
6	Celotna konstr. vtok prazen	Zg.v.=267,20 Sp.v.=253,40	Ne	2,41	7,26

4.2.2 Analiza napetostnega stanja v telesu pregradnega objekta

Analiza napetostnega stanja v telesu pregradnega objekta je bila izvedena globalno za tipičen prerez turbinskega stebra skupno s sodelovanjem dela temeljnih tal. Sodelovanje pretočnega polja v teh analizah ni bilo upoštevano. Uporabljena je metoda končnih elementov kot je vgrajena v programskem paketu COSMOS/M 1.52.

Obravnavali smo ravninski matematični model konstrukcije, za katerega je bil reševan sledeči sistem ravnotežnih enačb:

$$M \cdot U'' + C \cdot U' + K \cdot U = \vec{F}$$

kjer popisuje:

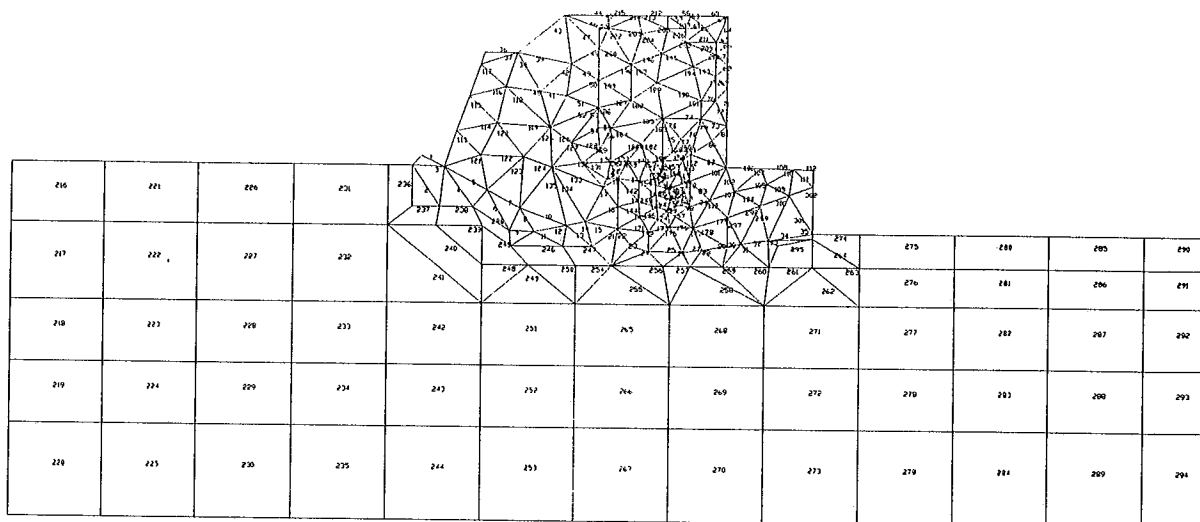
M - masno matriko

C - matriko dušenja

K - togostno matriko

U, U', U'' - vektor pomika, hitrosti in pospeška

F - vektor zunanje obtežbe



Slika 4. Matematični model značilnega prereza turbinskega stebra z delom temeljnih tal

4.2.3 Dinamična analiza

Za popolnost slike o varnostnih razmerah v telesu pregradnega objekta je potrebno konstrukcijo analizirati tudi na dinamične obtežbe pričakovanega potresa. Kot že omenjeno, ne razpolagamo s podatki o seizmičnosti lokacije, ki bi bili zadosti kvalitetni za analizo objekta takšne pomembnosti kot je HE. Zaradi tega dinamične analize ni bilo možno izvesti ne za stabilnostne razmere kot tudi ne za presojo napetostnega stanja in deformacij samega telesa pregrade. Kvazi dinamično obtežbo (nadomestno statično silo) smo sicer uvedli v presojo stabilnosti že pri statičnih obtežbah, kar pa ne more nadomestiti dinamične analize. Smatramo, da bo potrebno izvesti za lokacijo HE Mariborski otok dodatno študijo s katero se bo določilo potresne parametre lokacije in nato tudi preverilo pregradno konstrukcijo na potresno obtežbo.

Za dinamično analizo se bo uporabilo isti matematični model, konstruiran na osnovi MKE, kot smo ga uporabili pri statičnih analizah. V tej fazi študije smo lahko za ta model določili le lastne nihajne oblike, frekvence in čase.

5. ZAKLJUČKI

- a. Rezultati vseh do sedaj opravljenih meritev in pregledov, ki so dokumentirani v navedeni literaturi v splošnem ne kažejo sprememb, ki bi pri statičnih obremenitvah bistveno vplivale na statično varnost objekta.
- b. Kljub navedenim ugodnim rezultatom meritev in izračunov je v splošnem opaziti trend naraščanja absolutnih vrednosti merjenih količin. To je opazno predvsem pri meritvah vertikalnih in horizontalnih pomikov opazovanih točk. Pri merjenju rotacij objekta obstoji premalo podatkov, da bi lahko prognozirali jasnejši trend obnašanja konstrukcije v bodočnosti. Takšen statističen pogled na možno obnašanje konstrukcije v bodočnosti, narekuje v tem trenutku predvsem kontinuirno nadaljevanje kakovostnega opazovanja objekta tudi v bodočnosti ter pravočasno reagiranje s primernimi konstruktivnimi ukrepi.

- c. Nekateri rezultati psevdodinamične analize stabilnosti na zdrs kažejo, da se faktorji varnosti na zdrs gibljejo v bližini mejne vrednosti, praktično brez običajne varnostne rezerve. Za popolnejšo analizo tega problema bi bilo potrebno izdelati dinamično presojno na pričakovane potrese na tej lokaciji.
- d. Pregradni objekt še ni bil analiziran na potresno obtežbo, kar bi bilo zelo koristno za pridobitev kompletne slike o njegovi varnosti tudi ob nastopu takšnega dogodka. Korektna dinamična analiza v sklopu te študije ni bilo možno izvesti zaradi tega, ker ni na razpolago primernih seizmičnih parametrov lokacije.
- e. Skladno z veljavno tehnično zakonodajo bi bilo potrebno na pregradnem objektu vgraditi tudi seizmološko postajo, ki bi se vključila v obstoječi sistem monitoringa pregradnega objekta, in ki bi v primeru potresa tudi nudila dejanske podatke o dinamični obtežbi na osnovi katerih se bo dalo kvalitetno oceniti obnašanje objekta ob takšnem dogodku.

6. LITERATURA

1. "Poročilo o vzpostavitvi sistema opazovanja na HE Mariborski otok", ZRMK, DN 2051/69, september 1971.
2. "Seizmološka karta SFRJ", Zajednica za seizmologiju SFRJ, Beograd, april 1987.
3. "Poročilo o preiskavi vgrajenih betonov in pregledu konstruktivnih elementov na HE Mariborski Otok", IRMA d.o.o., DN 02-033-94/DV, Maribor 1994.
4. "Presoja varnosti pregradnega objekta, HE Mariborski otok", IBE, Študija št. A-300/79-10, Ljubljana, marec 1994.

HIDRAVLIČNI IZRAČUNI VALOV VSLED PORUŠITEV PREGRAD

doc. dr. Matjaž Četina, dipl. ing. gradb.

Univerza v Ljubljani, FGG - Hidrotehnična smer, Hajdrihova 28, 61000 Ljubljana

Povzetek. V prispevku je podan pregled računalniških programov za hidravlični račun valov, ki nastanejo zaradi morebitne porušitve pregrade. Posebej so poudarjeni dvodimenzionalni modeli, ki so danes zaradi hitrega razvoja zmogljivih računalnikov vse bolj uporabni tudi za praktične preračune. Njihovo uporabo predvideva tudi predlog novega "Pravilnika za izdelavo dokumentacije o hidravličnih posledicah porušitev pregrad" v primerih velikih razširitev iz ožjih dolin v ravnine ali pri razlitju vala iz stranske doline v prečno glavno dolino. Za ilustracijo možnosti, ki jih programi nudijo, so prikazani nekateri že izvedeni primeri izračunov porušitvenih valov: enodimenzionalni račun za akumulacijo Božna, poenostavljen dvodimenzionalni račun za pregrado na pritoku Soče Učejci ter polna dvodimenzionalna simulacija porušitvenega vala v hipni razširitvi pravokotnega kanala.

Summary. A review of the computer codes describing dam-break flows is presented in the paper. Two-dimensional models which are advised to be used according to the new Slovene legislation are described more in detail. Due to raising computer power 2D computations can be used in some more complicated situations such as sudden expansions of narrow valleys and relatively flat flood plains far enough from the dam site. At the end, three practical examples are presented: simulation of the Božna (1D model) and Učejca (simplified 2D model) dam-break waves and flow in a sudden expansion (fully 2D model).

1.0 UVOD

S problematiko valov, ki nastanejo zaradi morebitne porušitve pregrade, se v hidrotehnični praksi tako pri nas kot v svetu razmeroma pogosto srečujemo. Predpisi največkrat zahtevajo, da je potrebno določiti maksimalne kote vala, čas njihovega nastopa ter višino in hitrost propagacije čela vala oz. čas potovanja do posameznih dolvodnih krajev.

V veliko pomoč pri reševanju omenjene problematike so nam lahko matematični modeli, ki so pri enodimenzionalnih problemih valov v ozkih dolinah pod pregradami že skoraj v celoti nadomestili dražje fizične modele. V zadnjem času pa še poseben razmah doživljajo dvodimenzionalni matematični modeli, kar lahko v prvi vrsti pripišemo izredno hitremu razvoju vedno zmogljivejših računalnikov. Njihova uporaba se iz akademskih krogov in ustanov, kjer so nastajali, vedno bolj seli k reševanju zahtevnejših praktičnih problemov porušitvenih valov v vsakdanji hidrotehnični praksi.

Na Katedri za mehaniko tekočin z laboratorijem se skupina prof. Rajarja z razvojem matematičnih modelov za simulacijo porušitvenih valov ukvarja že od leta 1968, v obdobju zadnjih desetih let pa še posebno pozornost posveča zahtevnejšim dvodimenzionalnim modelom. Večinoma razvijamo in uporabljamo lastne modele, ki jih preverjamo, umerjamo in vrednotimo z meritvami na laboratorijskih modelih in v naravi ter na osnovi primerjave z že preizkušenimi tujimi programi. V želji, da bi obstoječo programsko opremo čim bolj približali projektantom in upravljalcem pregrad, zadolženih za varno obratovanje teh zahtevnih objektov, v prispevku podajamo njen kratek pregled. Na kratko so podane še potrebne teoretične osnove in prikazani nekateri zanimivejši primeri praktične uporabe.

2.0 ZAKONODAJA O IZDELAVI DOKUMENTACIJE

V bivši Jugoslaviji je l. 1975 Savezni komitet za poljoprivredu izdal pravilnik: "Uputstvo o izradi dokumentacije za određivanje posledica usled iznenadnog rušenja ili prelivanja visokih brana". Pravilnik je predpisoval, kako je treba za vsako visoko pregrado v državi izdelati izračune hidravličnih posledic eventuelne porušitve in izdelati vso predpisano dokumentacijo. Zaradi dejstva, da je osamosvojena Slovenija potrebovala novo zakonodajo na tem področju, ki pa ne bi smela biti kopija starega, je raziskovalna skupina prof. Rajarja ob sodelovanju strokovnjakov IBE in ZRMK izdelala predlog novega Pravilnika za R. Slovenijo. V njem so upoštevane vse spremembe in dopolnila, ki so se na podlagi dolgoletnih izkušenj možnih porušitev, kot tudi na osnovi raznih domačih in mednarodnih sodelovanj, pokazale za nujne oziroma racionalne. Sredi leta 1994 je bil Pravilnik usklajen v okviru stroke, pravniško ustrezno formuliran in predan naročniku RUZR. Vendar novi Pravilnik zaradi nesoglasij glede pristojnosti med Ministrstvom za obrambo (oz. RUZR), Ministrstvom za gospodarske dejavnosti in Ministrstvom za okolje in prostor še ni pravno formalno veljaven. Upamo pa, da bodo nejasnosti kmalu usklajene in Pravilnik sprejet, saj gre zlasti zaradi neposredne bližine vojne za občutljivo področje varnosti državljanov R. Slovenije.

Ena bistvenih novosti novega Pravilnika je določba, da se namesto nerealne trenutne in popolne porušitve pregrade upošteva postopna in delna, še zlasti pri nasutih zemeljskih pregradah. Druga pomembna novost pa je, da je v primeru razširitve toka iz ožjih dolin v ravnine možno uporabiti dvodimenzijske (2D) matematične modele, ki so mnogo cenejši od fizičnih, ki so se uporabljali v preteklosti.

3.0 TEORETIČNE OSNOVE MATEMATIČNIH MODELOV

3.1 Klasifikacija modelov

Glede na način, kako zajamemo prostor, v katerem simuliramo pojav porušitvenega vala, v osnovi ločimo eno- in dvodimenzijske modele. Pri enodimenzijskih (1D) modelih aproksimiramo odsek z več celicami vzdolž ene smeri, tako lahko npr. simuliramo val v ozki dolini pod pregrado, kjer je prevladujoča smer toka in propagacije vala vzdolž doline. Pri dvodimenzijskih (2D) modelih pa razdelimo področje na mrežo celic v ravnini, navadno v tlorisu. Tipični primeri so simulacije širjenja vala v primerih velikih razširitev iz ožjih dolin v ravnine ali pri razlitju vala iz stranske doline v prečno glavno dolino in podobno. Poleg hidrostatične razporeditve tlakov se v isti celici predpostavlja, da so hitrosti toka konstantne po globini, torej računamo z globinsko povprečnimi vrednostmi.

3.2 Osnovne enačbe in metode reševanja

1D model temelji na osnovnih St. Venantovih enačbah v t. im. konservativni obliki [1]:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial S}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{S} \right) + gS \frac{\partial z}{\partial x} = -gSI \quad (2)$$

Oznake pomenijo: x - vzdolžna razdalja, t - čas, S - presek, Q - pretok, z - kota gladine, g - zemeljski pospešek, $I = Q^2 \cdot n^2 / S^2 \cdot R^{4/3}$ - naklon energijske črte, kjer je R hidravlični radij, n pa Manningov koeficient hrapavosti.

Za reševanje enačb (1) in (2) je zaradi hitrih sprememb hitrosti in globin, ki nastopajo v primeru porušitvenih valov, uporabljena eksplicitna Lax-Wendroff metoda končnih razlik [2]. Definijsko področje x - t se razdeli na mrežo prečnih profilov in vnaprej določenih konstantnih časov t z intervalom Δt . V času $t + \Delta t$ se v sečiščih mreže računajo vrednosti odvisnih spremenljivk S in Q od levega do desnega roba polja na osnovi že znanih vrednosti v prejšnjem časovnem koraku. Zaradi zagotovitve stabilnosti računa moramo pri izbiri časovnega koraka upoštevati Courantov pogoj, ki narekuje izbor zelo majhnih Δt . Poleg tega moramo v primeru zelo neprizmatičnih strug v dinamično enačbo (2) vključiti še lokalne energijske izgube, predvsem za divergentne odseke dolin, sicer se prav tako lahko pojavijo težave s stabilnostjo.

2D modele za račun porušitvenih valov najpogosteje uporabljamo v horizontalni tlorisni ravnini. V tem primeru lahko kontinuitetno (3) in dinamični enačbi (4) in (5) za nestalni globinsko povprečni tok s prosto gladino v konservativni obliki napišemo takole:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial x} - gh \frac{\partial z_b}{\partial x} - ghn^2 \frac{u\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x}(hv_{ef} \frac{\partial u}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_{ef} \frac{\partial u}{\partial y}) \quad (4)$$

$$\frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial h}{\partial y} - gh \frac{\partial z_b}{\partial y} - ghn^2 \frac{v\sqrt{u^2+v^2}}{h^{4/3}} + \frac{\partial}{\partial x}(hv_{ef} \frac{\partial v}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y}(hv_{ef} \frac{\partial v}{\partial y}) \quad (5)$$

Pomen oznak: h - globina vode, u in v - komponenti hitrosti v x in y smeri, t - čas, z_b - kota dna, n - Manningov koeficient hrapavosti, g - zemeljski pospešek in v_{ef} - efektivni koeficient turbulentne viskoznosti.

Zadnja dva člena na desni strani enačb (4) in (5) izražata vpliv turbulentne viskoznosti in sta pri nestalnem toku vsled porušitve pregrade običajno zanemarjena ([3], [4]), moramo pa ju upoštevati pri računu tokov z izrazitimi recirkulacijskimi področji [5]. Koeficient v_{ef} se v vsaki točki računskega polja določi s pomočjo globinsko povprečne verzije $k - \varepsilon$ modela turbulence, ki uporablja dodatni transportni enačbi za turbulentno kinetično energijo k in stopnjo njene disipacije ε [6].

Povezan sistem parcialnih diferencialnih enačb (3) do (5) je rešen s pomočjo Patankar-Spaldingove metode kontrolnih volumnov [7], [8]. Osnovne značilnosti metode so premaknjena mreža, hibridna shema (kombinacija centralnodiferenčne in sheme gorvodnih razlik) ter iterativni postopek popravkov globin (SIMPLE). Za integracijo po času je uporabljena polna implicitna shema, ki je stabilna in dovolj točna tudi pri relativno visokih Courantovih številih. Privzet kriterij konvergence je, da mora biti v vsakem časovnem koraku vsota napak v vseh točkah mreže manjša od 1% karakterističnega pretoka skozi področje.

3.3 Začetni in robni pogoji

Zgornje parcialne diferencialne enačbe za 1D in 2D modele rešujemo ob uporabi ustreznih začetnih in robnih pogojev. Začetni pogoji pomenijo začetno stanje, robni pogoji pa so v bistvu matematično opisani vzroki, ki povzročajo posamezne pojave. Zaradi njihove raznolikosti na tem mestu ne podajamo njihovega splošnega pregleda, temveč so omenjeni posebej pri opisu posameznih računalniških programov.

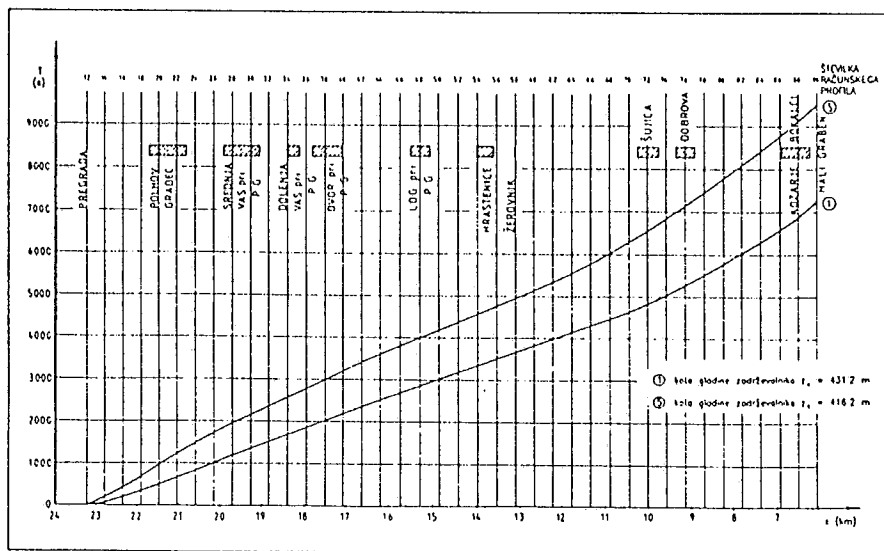
4.0 OPIS RAČUNALNIŠKIH PROGRAMOV IN PRIMERI UPORABE

V nadaljevanju podajamo kratek pregled programske opreme, ki je večinoma plod lastnega razvoja na Hidrotehnični smeri FGG. Prikazani so tudi nekateri primeri praktične uporabe.

4.1 Enodimenzionalni problemi

Program **LAXDEL** je namenjen računu valov, ki nastanejo po trenutni in popolni ali delni in postopni porušitvi pregrad. Zanje so ponavadi značilne velike hitrosti, ekstremno hitre spremembe gladin in v primeru trenutne in popolne porušitve lahko tudi navpično čelo vala, ki potuje dolvodno v obliki potujočega vodnega skoka. Možno je simulirati tudi lokalno deroči tok in prehode iz deročega v mirni tok in obratno. Račun poteka po celotnem področju od gorvodnega roba akumulacije preko pregradnega profila do čela vala, ki predstavlja dolvodni robni pogoj. Pri zemeljskih pregradah lahko kot interni robni pogoj računamo tudi postopno erozijo telesa pregrade, ki je bila podrobneje raziskana tudi na fizičnem modelu [9]. Možno je upoštevati propagacijo tako po nekem začetnem pretoku kot tudi po suhem dnu (začetni pogoj), kjer se propagacija čela vala računa po posebnem postopku [2]. Ustrezne opcije izberemo že pri vnašanju vhodnih podatkov, kjer s prečnimi profili podamo še topografijo akumulacije in doline pod pregrado, ustrezne hidravlične parametre (hrpavost, začetni pretok) ter robne pogoje v obliki krivulj $Q(t)$, $Z(t)$ ali $Q(Z)$.

Program je napisan v FORTRANU in je prirejen za uporabo na osebni računalnikih. Zaenkrat je možen samo numerični izpis rezultatov v obliki Q , Z , v in energijske višine v izbranih profilih in časih. Program je bil že velikokrat tudi praktično uporabljen, saj so bili z njim preračunani valovi v primeru porušitve vseh slovenskih velikih pregrad in tudi nekaterih v državah bivše Jugoslavije (npr. Grančarevo). Na sliki 1 je prikazan primer 1D računa vala vsled porušitve pregrade Božna.



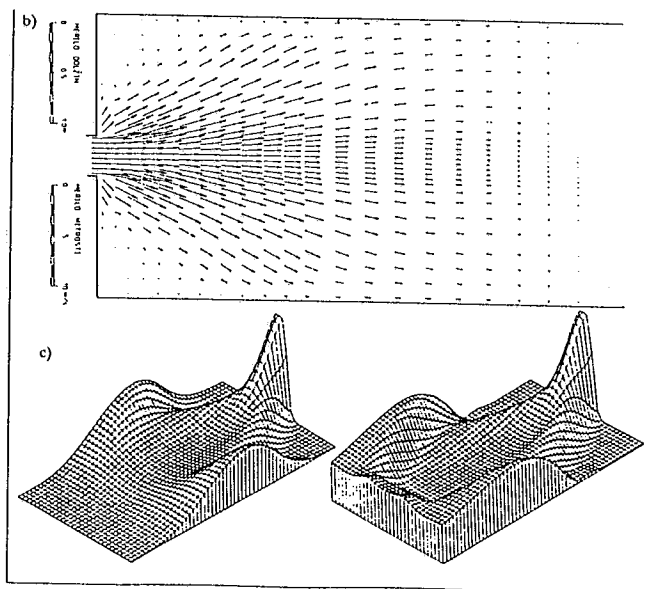
Slika 1: Časi potovanja čela vala do naselij pod pregrado Božna pri Polhovem Gradcu

PRLAX je program, ki je zasnovan na enakih principih kot **LAXDEL**, le da je posebej prirejen za obravnavo obratovalnih valov v dovodnih kanalih hidroelektrarn. Uporabimo pa ga lahko tudi za račun porušitvenih valov, če nas zanima njihova propagacija vzdolž posameznih odsekov pri znanem gorvodnem hidrogramu ali nivogramu. Program je napisan v programskem jeziku FORTRAN in teče na osebni PC računalnikih. Poleg numeričnih rezultatov v ASCII obliki program omogoča tudi grafični prikaz vzdolžnih profilov vala v posameznih časovnih korakih [10]. Ustrezni podprogrami skrbijo za kreiranje DXF datotek, tako da je možno slike poljubno naprej obdelovati v programskem paketu AutoCAD. Kot primer uporabe omenimo račun porušitvenega vala v dolini Drave v primeru porušitve pregrade Golica.

4.2 Dvodimenzionalni problemi

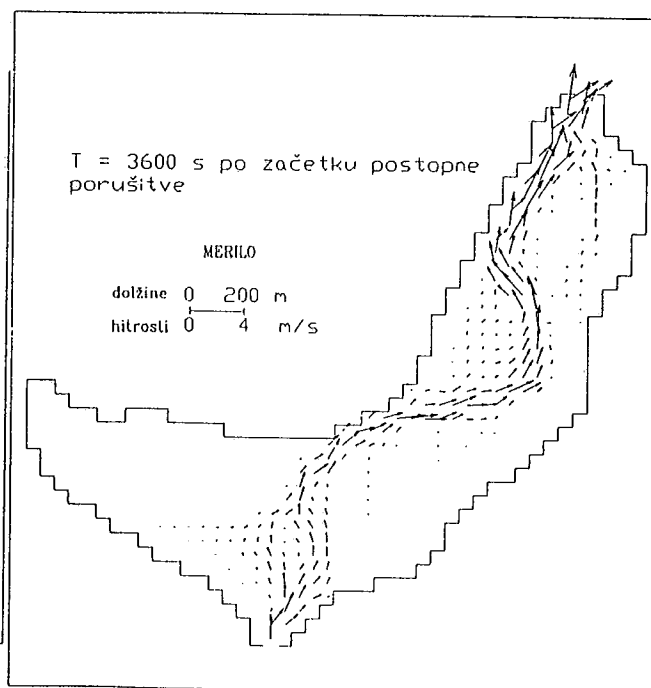
DVADIM [8] je program, ki temelji na uporabi polnih 2D globinsko povprečnih enačb (3)-(5). Osnovno verzijo programa TEACH smo dopolnili z možnostjo upoštevanja poljubne geometrije, globinsko povprečnega modela, nestalnosti in različnih robnih pogojev. Prav slednjim smo posvetili največ pozornosti, tako da je možno podati tudi bolj komplicirane robne pogoje kot so npr. dotoki in iztoki preko poševnih jezov ali zapornic, kritični tok ali odvisnosti $v(t)$, $Q(t)$, $Z(t)$ in $Q(h)$ v posameznih oz. skupini celic. Pomembno je, da lahko program zaradi uporabljene hibridne numerične sheme simulira tako mirni kot deroči tok in prehode med njima, kar močno povečuje uporabnost programa za praktične primere porušitev.

Program je napisan v FORTRANU, teče na osebnih računalnikih in ima urejen vnos podatkov preko vnaprej pripravljenih ASCII datotek. Potrebno je podati 2D matrike geometrije, kot dna in Manningovih koeficientov hrapavosti ter še ostale hidravlične parametre (pretoki, kote galdine, časovni korak, tipi robnih in začetnih pogojev z ustreznimi parametri) ter kontrolne parametre za numerično natančnost in željen izpis in izris rezultatov. Poleg matričnega izpisa rezultatov za u , v , h , Z , k , ϵ in v je preko vmesnih programov GRAFIK, BEDACAD, INTXY in 3DFOR možno pripraviti še DXF datoteke za grafični izris vektorjev hitrosti, tokovne funkcije, izolinije Froudovih števil ali poljubne izbrane spremenljivke ter aksonometrični prikaz gladine ali topografije terena. Med primeri uporabe, ki pa zahtevajo bistveno več računalniškega časa od 1D izračunov, omenimo simulacijo porušitvenega vala v hipni razširitvi pravokotnega kanala (slika 2).



Slika 2. Simulacija porušitvenega vala v hipni razširitvi pravokotnega kanala

- Vektorji hitrosti 3.5 s po prihodu vala v razširitev
- Izračunana gladina v časih 3.5 s in 10 s po prihodu vala v razširitev



Slika 3. Propagacija vala po Soči zaradi morebitne porušitve načrtovane pregrade v stranski dolini Učje. Vektorji hitrosti v glavnem sledijo strugi Soče.

Program XANTO uporablja poenostavljene 2D enačbe in je predvsem namenjen računu propagacije porušitvenega vala po suhem dnu [11]. Kontinuitetna enačba (3) je vzeta v polni obliki, pri dinamičnih enačbah (4) in (5) pa sta zanemarjena vztrajnostni člen (konvekcijski in lokalni) in zadnja

dva člena na desni strani enačb, ki izražata vpliv turbulentne viskoznosti. Tako iz enačb (4) in (5) dobimo razmeroma preproste enačbe stalnega neenakomernega toka. Enačbe (3)-(5) se rešujejo v pravokotni numerični mreži, kjer se globine računajo v centru celice, hitrosti pa na meji med njimi. Upoštevati je možno različne robne pogoje kot so: znan hidrogram ali hitrosti na mejah celic ter iztekanje iz področja pod kritičnimi pogoji ali pri normalnem toku. Za kontrolo kontinuitete se stalno vršijo računi volumna dotoka vode na področje in volumna celotne količine vode na področju.

Tako kot DVADIM tudi program XANTO potrebuje podatke o geometriji, kotah dna in koeficientih hrpavosti v matrični obliki. Izpis rezultatov pa je prirejen tako, da je možno uporabiti že pri programu DVADIM omenjene vmesne programe za pripravo izrisa vektorjev hitrosti ter aksonometrične slike maksimalnih kot in gladine v posameznih časih v grafičnem paketu AutoCAD. S programom XANTO so bili preračunani primeri propagacije vala po Soči vsled porušitve HE Učaja (slika 3), porušitve pregrade Prigorica ter prelivanja nasipov akumulacijskega bazena HE Podsused na Hrvaškem.

5.0 ZAKLJUČKI

Standardni 1D računi valov, ki nastanejo zaradi morebitnih porušitev pregrad, se v zadnjih dvajsetih letih v slovenski hidrotehnični praksi intenzivno uporabljajo in nadomeščajo dražje fizične modele. Vse hitrejši razvoj zmogljive strojne opreme pa odpira široke možnosti praktičnih aplikacij tudi za zahtevnejše 2D simulacije porušitvenih valov. Takšno možnost predvideva tudi predlog novega "Pravilnika za izdelavo dokumentacije o hidravličnih posledicah porušitev pregrad". Na Hidrotehnični smeri FGG skušamo slediti tem sodobnim trendom, zato razvijamo lastne 2D programe, ki jih že uporabljamo tudi za praktične izračune. Pri nadaljnjem delu nameravamo poleg vsebinskega izpopolnjevanja programov (predvsem 2D simulacije erozije na pregradi in širjenja 2D vala po suhem dnu) posebno pozornost posvetiti uporabniškim vmesnikom za vnos podatkov in grafični prikaz rezultatov.

6.0 LITERATURA

1. Rajar, R.: Recherche théorique et expérimentale sur la propagation des ondes de rupture de barrage dans une vallée naturelle. Doktorska disertacija, Univerza Paul Sabatier, Toulouse, 1972.
2. Rajar, R.: Hidravlika nestalnega toka. Učbenik, Ljubljana, 1980.
3. Popovska, C.: Numerical and Experimental Simulation of Two-Dimensional Dam-Break Propagation. Univerza Kiril in Metodij v Skopju, Fakulteta za gradbeništvo, Skopje, april 1989.
4. Uan, M.: Model Bidimensionnel d'Onde de Rupture du Barrage, Comparison Mesures-Calcul Pour un Cas Shematique. EDF-LNH, E 43/81-08, Chatou, Francija, 1981.
5. Četina, M.: Simulacija toka v kajakaški tekmovalni progi v Tacnu. Kuhljevi dnevi '90, Rogla, 27.-28.9.1990, Zbornik del, str. 258-265.
6. Četina, M.: Uporaba $k - \varepsilon$ modela turbulence pri računu toka vode s prosto gladino. Kuhljevi dnevi '89, Rogla, 19.-20.10.1989, Zbornik del, str. 253-262.
7. Patankar, S. V.: Numerical Heat Transfer and Fluid Flow. McGraw Hill Book Company, 1980.
8. Četina, M.: Matematično modeliranje dvodimenzionalnih turbulentnih tokov. Acta hydrotechnica, št. 5, Laboratorij za mehaniko tekočin, FAGG, Univerza v Ljubljani, 1988.
9. Rajar, R. in ostali: Matematično modeliranje poplavnih valov in tesnjenje akumulacij v Krasu. Poročilo o raziskovalni nalogi, Univerza v Ljubljani, FAGG, 1994.
10. Žagar, D.: Obdelava metod za račun nestalnega toka s prosto gladino, prireditelj za računalnik PC in izdelava grafičnega prikaza rezultatov. Diplomaska naloga, FAGG, Ljubljana, 1989.
11. Xanthopoulos, T., Koutitas, C.: Numerical Simulation of a Two-dimensional Flood Wave Propagation Due to Dam Failure. Journal of Hydraulic Research 14 (1976), No. 4.

POLOŽAJ HIDRAVLIČNIH MODELNIH RAZISKAV HIDROTEHNIČNIH OBJEKTOV V SLOVENSKEM PROSTORU

mag. Igor ČEHOVIN, dipl.ing. Inštitut za hidravlične raziskave

POVZETEK

V članku bo prikazan položaj hidravličnih modelnih raziskav za potrebe projektiranja in izgradnje hidrotehničnih objektov na področju elektro in vodnega gospodarstva. Prikaz je omejen samo na hidravlične modelne raziskave in testiranja gradbenih objektov in hidromehanske opreme. V članku so podane tudi ugotovitve analize spreminjanja intenzivnosti raziskav v zadnjih letih v Sloveniji in primerjava z raziskavami opravljenimi v Sloveniji za tuje naročnike. Kot osnova za analizo so privzeti podatki o opravljenih raziskavah v Vodogradbenem laboratoriju, ki se je transformiral v Inštitut za hidravlične raziskave.

ABSTRACT

In the present paper the level of hydraulic model tests for designing and building of hydrotechnical object in Slovenia is reviewed. The review is limited only on hydraulic model tests of object in the fields of civil engineering and capital equipment on hydropower stations. An analysis of hydraulic research intensity in last few years is shown. The data of hydraulic researches made in Hydraulic laboratory was analyzed.

1. UVOD

Hidravlične modelne raziskave hidrotehničnih objektov in konstrukcij na fizičnih modelih so v zadnjih letih v upadanju. Vzrokov za to je več. Nekateri med njimi so tudi objektivni kot na primer zmanjšanje investicij oziroma gradnje hidrotehničnih objektov. Precej več vzrokov lahko štejemo v drugo skupino:

- Nekateri investitorji so prepričani, da lahko z opustitvijo raziskav zmanjšajo investicijo, čeprav to običajno pomeni dražje vzdrževanje, slabši izkoristek, oziroma nevarnost za porušitev objekta;
- Takim pritiskom včasih podležejo tudi projektanti, ki kljub nesigurnem izračunu hidrodinamičnih obremenitev dokončajo projekt brez hidravličnih preiskusov. Primeri rezultatov raziskav, ko so projektanti kljub nasprotovanju investitorja vztrajali, kažejo opavičenost njihove previdnosti.
- Žal je eden od vzrokov tudi prepričanje nekaterih projektantov, da raziskave niso potrebne, kar je možno opaziti na prenekaterem objektu v Sloveniji.
- Nenazadnje naj omenimo tudi zakonodajo, ki ne zahteva hidravličnih raziskav v fazi projektiranja večjih objektov oziroma vsaj neodvisne strokovne revizije (tudi hidravlik) teh projektov pred izvedbo.

Med objektivne vzroke bi lahko šteli tudi vedno boljšo preučenost objektov na predhodnih hidravličnih raziskavah, če ne bi šlo za vedno drznejše konstrukcije s spremenjenimi robnimi pogoji, ki so samo na videz podobni že preiskanim.

2. ANALIZA OPAVLJENIH HIDRAVLIČNIH RAZISKAV V ZADNJIH LETIH

V tabeli št. 1 je podan pregled števila dokončanih hidravličnih raziskav v določenem letu v katerem so zajete tudi hidravlične študije za obdobje 1980 do 1994 [6][9]. Tako prikazani podatki nam sicer nakazujejo vztrajni trend padanja števila raziskav v zadnjih letih vendar ne kažejo dejanskih razmer, ki so še precej bolj kritične. V zadnjih letih je namreč vse več kratkih raziskav in raznih študijskih obdelav.

TABELA št. 1

Prikaz števila dokončanih hidravličnih raziskav v zadnjih 15 letih

Leto	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	Skupaj
Skupaj	11	9	11	7	10	6	4	4	10	8	9	7	6	6	4	112
Slovenija	11	6	7	7	9	5	3	4	9	5	9	7	6	5	4	97
Ost.JUG.		3	1			1	1		1							7
Tujina			3		1					3				1		8

Ker podatki o številu raziskav ne dajo pravega pregleda (v njih ni zajeto trajanje in vrednost raziskave), je v tabeli št. 2 prikazana vrednost raziskovalnih nalog v obdobju 92 do 94. Za obdobje pred letom 1992 je težko zajeti vpliv inflacije. Prikazani podatki kažejo na zmanjševanje sredstev za hidravlične raziskave namenjenih v Sloveniji.

TABELA št. 2

Vrednosti raziskovalnih nalog v določenem letu glede na bazno leto 1992

Leto	92	93	94	Delež
Skupaj	100%	103%	59%	100%
Slovenija	100%	54%	59%	81%
Tujina	0%	49%	0%	19%

V tabeli št. 1 je prikazan tudi delež števila hidravličnih raziskav opravljenih za različne naročnike. Po številu je delež tujih naročnikov sicer majhen vendar je njihov delež večji ob upoštevanju vrednosti opravljenih raziskav (tabela 2). Na upadanje hidravličnih raziskav za tuje naročnike je vplivala tudi zalivska vojna (Irak) in kasnejša vojna v nekdanji Jugoslaviji, ki žal še traja.

V tabeli št. 3 je prikazana vrednost hidravličnih raziskav za slovenske naročnike razdeljena po panogah. Lepo se vidi upadanje vrednosti hidravličnih raziskav za potrebe elektrogospodarstva v zadnjih treh letih.

TABELA št. 3

Prikaz vrednosti hidravličnih raziskav za naročnike v Sloveniji po panogah

Leto	92	93	94	Skupaj
Skupaj	100%	54%	59%	100%
Vodnog.	55%	34%	50%	65%
Elektrog.	41%	11%	6%	27%
Temeljne r.	4%	8%	3%	7%

3. NEKATERI ZANIMIVI PRIMERI

Kot zgleden primer vztrajanja projektanta kljub nasprotovanju investitorja naj navedemo raziskavo temeljnega izpusta za tujega naročnika. Rezultati raziskave so pokazali, da so bile projektirane dimenzije ozračevalnega dovoda poddimenzionirane. Prav tako je bilo potrebno rešiti zaprtje odtočnega profila, ki ga je povzročala že izvedena hidravlično neugodna oblika profila.[8]

Običajno so tuji investitorji bolj osveščeni oziroma jih v to silijo pogoji mednarodnih posojil. Zato so hidravlične raziskave sestavni del večine tenderjev. Take raziskave so pokazale povsem napačni koncept postavitve zapornic v temeljnem izpustu za elektrarno v Iraku.[7] Posledica bi bila lahko katastrofa. Nadaljevanje raziskav je preprečila zalivska vojna.

Za podslapje HE Buk Bjela sta bili opravljeni dve modelni raziskavi hidrodinamičnih obremenitev talnih in bočnih plošč v podslapju. Na osnovi prvih raziskav, je projektant preprojektiral podslapje. Kljub temu je investitor zahteval prevero novega projekta, ki je potrdila pravilnost nove oblike podslapja.[5], [1], [2].

Pri raziskavi talne zaklopke za Alžir je bila kvalitetno rešena problematika ozračevanja in določene so bile hidrodinamične obremenitve na zaklopko[4]. Po informacijah se pri nas pripravlja gradnja "male elektrarne" z zaklopko podobnih dimenzij. Višina zaklopke bo sicer manjša, kar pa seveda ne pomeni, da je problematika ozračevanja tudi manjša, prej nasprotno.

V določenih primerih se pri hidravličnih raziskavah uporablja sodelovanje fizičnega in matematičnega modeliranja. Tak primer je hidravlična modelna raziskava vodostana RHE Obrovac [3]. Izračun vodostana je bil opravljen z matematičnim modelom, ki ga je fizični model tudi potrdil, toda osnova za izračun so bile hidravlične karakteristike dušilke dobljene na fizičnem modelu.

Žal stojijo pri nas tudi objekti, pri katerih se vidi, da v fazi projektiranja ni sodeloval hidravlik z izkušnjami na velikih pregradah. Lahko, da se posledice še dolgo ne bodo pokazale, takrat pa bodo verjetno pripisane izrednim razmeram.

Zanimivo je, da so nekateri projektanti bolj dojemljivi za rezultate hidravličnih raziskav

in jih takoj vgradijo v svoje projekte, drugi pa kljub nedvoumnim rezultatom vztrajajo pri svojih rešitvah. Žal se posledice takih odločitev poznajo kot neoptimalno delovanje hidrotehničnega objekta.

Nenazadnje pa naj povdarimo, da tudi še tako dobro pripravljene in izvedene hidravlične raziskave ne morejo popraviti napak pri robnih podatkih (meritve na terenu, hidrološki podatki itd) in dati boljših rezultatov. Prav tako se lahko maščuje varčnost investitorja pri obsegu raziskav in modela.

4. ZAKLJUČEK

Iz povedanega lahko zaključimo, da je položaj hidravličnih raziskav za hidrotehnične objekte v Sloveniji nazaduje.

Analiza zmanjševanja vrednosti hidravličnih raziskav v Sloveniji, je pokazala, da gre velik delež zmanjšanja pripisati zmanšanju raziskovalnega dela na področju elektrogospodarstva.

Kljub relativno močni mednarodni konkurenci, je bilo v Sloveniji opravljenih nekaj raziskav za tuje naročnike. Še bolj zgovoren je podatek, da so tuji investitorji iskali ponudbe za izvajanje hidravličnih raziskav v pravej večji meri, kot jih je bilo kasneje realizirano pri nas. Kar kaže na potrebo po hidravličnih raziskavah, ki se je v tujini bolj zavedajo. Tudi delež vrednosti raziskav za tujino je relativno zelo visok.

Z urejeno regulativo na področju hidravličnega preiskovanja in preverjanja hidrotehničnih objektov (velike pregrade ...), bi dosegli optimalnejše in varnejše delovanje teh objektov.

5. LITERATURA

- [1] CIUHA D.,, Hidravlične modelne raziskave podslapja HE BUK BJELA (BiH), Vodogradbeni laboratorij, 1988
- [2] CEHOVIN I., Meritve hidrodinamičnih veličin na hidravličnih modelih, FAGG (magistrsko delo), 1990
- [3] DJUROVIĆ V., Hidravlične modelne raziskave vodostana RHE Obrovac, Vodogradbeni laboratorij, 1981
- [4] HALLER T., Hidravlične modelne raziskave na talni zaklopki hidrotehničnega objekta BOU HANIFIJA (Alžir), Vodogradbeni laboratorij, 1989
- [5] LEGIŠA D.,, Hidravlične modelne preiskave podslapja HE BUK BJELA (BiH), Vodogradbeni laboratorij, 1986
- [6] LEGIŠA D., Kratek opis del opravljenih v petdesetih letih dela Vodogradbenega laboratorija in nekateri statistični podatki....., VGI-FAGG, Ljubljana 1987
- [7] PEMIČ A., Hidravlične modelne raziskave temeljnega izpusta HE BEKHME (Irak), Vodogradbeni laboratorij, 1989
- [8] PEMIČ A., Hidravlične modelne raziskave temeljnega izpusta HE 15 th KHORDAT DAM (Iran), Vodogradbeni laboratorij, 1993
- [9] Arhiv Inštituta za hidravlične raziskave

EKOLOŠKE SANACIJE V EES - PRIMER SANACIJE ZBILJSKEGA JEZERA

mag. Andrej KRYŽANOWSKI dipl. ing.

Savske Elektrarne Ljubljana

POVZETEK Z izgradnjo HE Medvode na reki Savi (leto izgradnje 1953), je bilo ustvarjeno akumulacijsko jezero - Zbiljsko jezero, ki se razteza na dolžini 5 km, z volumnom 7,0 hm³ - od tega je izkoristljivega volumna 1,2 hm³. Izgradnja pregrade je pomenila velik poseg v tedaj nedotaknjeno okolje in je vplivala tako na spremembe v načinu življenja ljudi ob jezeru, kot na živelj v in ob jezeru. Največji problem pa predstavljajo sedimenti v obliki jezerskega mulja, ki jih je Sava tekom let odlagala v jezeru. Po meritvah je ocenjeno, da je zapolnjenih do 40% akumulacije - od tega živega volumna do 15%. Zamuljenost jezera je dosegla tak obseg, da so praktično zamrle vse rekreacijsko-turistične aktivnosti na jezeru.

Aktivnosti v zvezi s sanacijo jezera trajajo že dobro desetletje. Razdelano je bilo več možnosti odstranitve sedimentov: z uporabo v kmetijstvu, ureditev deponij na območjih opuščeni gramoznic in sosednjih dolin. V sedimenti so tudi prisotne škodljive snovi in je zato njihovo odlaganje na večini lokacij, ki se pretežno del nahajajo v varstvenih območjih varovanja podtalnice za pitno vodo. Ostale lokacije ne pridejo v poštev zaradi ekonomičnosti transporta sedimentov. Zato je bilo predlagan način: s pregraditvijo dela jezera z nasipom je ustvarjen deponijski prostor, v katerega se s prečrpavanjem deponira mulj iz jezera. Po končani sanaciji in konsolidaciji terena bodo površine rekultivirane in namenjene za turistično-rekreacijske namene.

Sanacija Zbiljskega jezera je prvi primer ekološke sanacije akumulacijskih bazenov hidroelektrarn v Sloveniji. Prioriteta pri zasnovi sanacije je bila izboljšanje kvalitete življenjskih pogojev ljudi ob jezeru, ob sočasnih ukrepih varovanja življa v jezeru z ohranitvijo naravnega ravnovesja. Tako je obseg črpanja sedimentov lokalno omejen na območje pod naseljem Zbilje, druga območja, kjer so se na plitvinah in prodiščih razvila drstišča in gnezdišča pa bodo ostala v nespremenjenem stanju.

ABSTRACT With the construction of the Medvode HPP on the Sava River, completed in 1953, a 5 km long impoundment - Lake Zbilje - was created. Its total storage is 7.0 hm³ and the useful storage volume is 1.2 hm³. Damming of the river had considerable impact on the natural environment and had an effect on the people living along the lake shore as well as on the wildlife and fish population in the river. The biggest problem is the sediment which has been brought by the river in many years. The investigation has shown that 40% of the storage capacity - i.e. 15% of usable storage volume is reduced by sediment. Sedimentation has reached such an extent that initially well-developed recreational activities have almost completely ceased.

The plans to recover the integrity of the lake are more than ten years old. Various possibilities for sediment removal have been studied: use of the sediment mud for agricultural purposes, construction of disposal facilities at the sites of the existing gravel excavation pits or in the nearby valleys. Since sediment contains substances which are toxic the idea of usage for agricultural purposes was abandoned. The sites of possible deposition are to be found in the area of protected ground water supply sources. Other landfill sites have not been considered because of the costly sediment transport. Finally, the method of lake recovery has been decided as follows: landfill site will be formed by constructing an embankment followed by pumping the mud into the space behind. Upon completion of works and consolidation, the areas will be re-cultivated and used for tourist and recreational purposes.

The Lake Zbilje project case is an example of environmental restoration of a storage reservoir performed for the first time in Slovenia. In the concept priority is given to the improvement of the living conditions of the people living by the lake. At the same time the necessary measures to preserve wildlife and maintain ecosystem balance are taken into account. Therefore, sediment pumping is limited to the area below the settlement of Zbilje, while locations of the spawning grounds and nesting sites will remain.

1.0 UVOD

Voda je edini naravni vir, ki ga je v sicer surovinsko siromašni Sloveniji v izobilju. Ugodna geografska lega na stičišču južnih Alp in Mediterana vpliva na obilje padavin iz katerih s napajajo vodotoki v osrednji Sloveniji. Najpomembnejši med njimi je reka Sava, katero porečje obsega 53,6 % (10.872 km²) površine Slovenije. Reka Sava je tudi izdaten vir kakovostne pitne vode za oskrbo okoli 20 % prebivalcev Slovenije.

Tradicionalno obliko izkoriščanja hidropotenciala reke Save, ki so jo predstavljali mlini in žage, je z naraščajočo industrializacijo na začetku petdesetih letih in povečano potrebo po električni energiji nadomestila izgradnja velikih hidroenergetskih objektov ob razvijajočih se industrijskih centrih v osrednji Sloveniji. Kot prve so bile dograjene elektrarne, ki so bile glede na potrebe in sezonski značaj vodotoka, načrtovane kot akumulacijske (HE Moste) oz. akumulacijsko-pretočne (HE Medvode). V nadaljnih planih je bila načrtovana sklenjena veriga hidroelektrarn na Savi do meje s Hrvaško, ki pa zaradi najrazličnejših razlogov ni bila realizirana. Izgradnja pregrad na ločenih lokacijah je prinesla spremembe v hidravliki in hidrologiji vodotoka in s tem vrsto nevšečnosti za upravljalce objektov in prebivalce ob vodotoku.

2.0 OPIS PROBLEMATIKE

Prva elektrarna v nizu načrtovanih elektrarn v srednjem toku reke Save je HE Medvode, ki je bila dograjena l. 1953. Jezovna zgradba je temeljena na dolomitnem pragu; na mestu kjer se stikujejo vodonosni kvartarni skladi Kranjsko-Sorškega in Ljubljanskega polja. Pregrada je betonsko-težnostna, kombinirano stebersko-obreznega tipa z akumulacijskim bazenom, ki služi kot kompenzacijski bazen pri vršnem obratovanju gorvodno ležeče HE Mavčiče (leto izgradnje 1986). Elektrarna obratuje v dnevno-pretočnem režimu, z zagotavljanjem biološkega minimuma 12 m³/s in vršno, v verigi s HE Mavčiče, v konicah potrošnje električne energije.

Z zaježitvijo reke Save je bilo ustvarjeno umetno jezero - Zbiljsko jezero - dolžine 5 km, površine 0,72 km² in volumnom 7,0 hm³. Vpliv zaježbe sega do HE Mavčiče. Po vodnogospodarski odločbi lahko elektrarna, pri normalnih obratovalnih pogojih denivelira gladino za 1,7 m, pri čemer znaša izkoristljivi volumen akumulacije 1,2 hm³. Pri izjemnih pogojih obratovanja je dovoljena denivelacija gladine za 3,4 m, pri čemer znaša izkoristljivi volumen 2,7 hm³. Jezero se je pretežno formiralo v mejah stare rečne struge in delno s potopitvijo nizkih obrežnih teras. Na najozjemem delu je široko 40m, na najširšem delu pred elektrarno pa 250 m. Na najglobljem delu, pred pregrado znaša globina 20 m. Pregraditev Save je pomenila korenit poseg v dotedaj nedotaknjeno okolje s spremljajočimi vplivi:

sociološkimi vplivi Z nastankom jezera je predvsem bližina velikih urbanih središč (Ljubljana, Kranj) pripomogla k razvoju turizma, kar je v okolju s pretežno kmečkim prebivalstvom pomenila možnost preusmeritve v terciarne dejavnosti (turizem, gostinstvo, obrt), s čim se še danes ukvarja petina aktivnega prebivalstva. Z organizacijo športnih in družabnih aktivnosti na jezeru je le-to hitro postalo priljubljena izletniška točka. že dodobra razvite turistične akcije pa so skoraj v celoti zamrle zaradi najrazličnejših vzrokov.

vplivi na živelj v jezeru Pred izgradnjo pregrade je bila Sava salmonidna reka, v kateri sta prevladovali predvsem potočna postrv in lipan. Po ojezeritvi so se razmere bistveno spremenile: pretrgane so bile vse migracijske poti rib ob drstitvi in z ustvarjanjem plitvin pogoji za naselitev ciprinidnih vrst rib (klen, rdečooka, ščuka), ki so skoraj v celoti prevladale v jezeru. Od salmonidnih vrst je prisotna le neavtohtona šarenka, ki jo vlagajo v jezero predvsem zaradi športnega ribolova.

vplivi na živelj ob jezeru Z ojezeritvijo in zaraščanjem dna z rečno vegetacijo so nastali ugodni pogoji za številne vrste ptičev, ki se zadržujejo na jezeru. Nekatere vrste se zadržujejo tekom vsega leta (mali ponirek, siva čaplja, labod), ob gnezditvi (čopasti ponirek, mlakarica), večji del pa ob preletu in zimovanju (veliki kormoran, siva gos, ribji orel,..). Opaziti je tudi vrste, ki v Sloveniji štejemo za ogrožene (vodomec).

vplivi na okolje Zaradi majhne površine jezera ni opaznih vplivov na mikroklimo. Poseben problem je zaprodovanje oz. zamuljevanje jezera. Sava ima v gornjem toku izrazito hudourniški značaj z značilno prodonosnostjo. Novonastalo jezero je postalo naravni usedalnik za rečne naplavine, ki so predvsem zaradi vsebnosti škodljivih snovi pereč ekološki problem.

Na podlagi večletnih meritev je bilo ugotovljeno, da je Sava v času obratovanja HE Medvode do izgradnje HE Mavčiče odložila v Zbiljskem jezeru do 100.000 m³ sedimentov na leto. Ocenjeno je, da je zasute približno 40% celotne akumulacije, kar znaša 2,6 hm³. Pri normalnih pogojih obratovanja (dnevna denivelacija: -1,7m) je izgubljene 10-15% koristne akumulacije, medtem, ko je pri izjemnih pogojih obratovanja (izjemna denivelacija: -3,3 m) izgubljeno 20-25% koristne akumulacije. Zaradi spremenjenih hidravlično-hidroloških pogojev z izgradnjo uzvodne pregrade predvidevamo, da se bo obseg usedanja delcev zmanjšal.

Struktura sedimentov se vzdolž zaježitve spreminja: v korenu zaježbe prevladuje prodnati material, v spodnjem delu pa pretežno mulj, pomešan z naplavinami. Situacija je problematična v osrednjem delu, pod naseljem Zbilje, kjer je zaradi razširitve struge in upočasnitve toka Sava odlagala mulj, pomešan z naplavinami na potopljeno obrečno teraso. Ustvarila je veliko plitvino, površine 4 ha, ki je le minimalno potopljena. Ze ob manjši denivelaciji segajo blatne površine nad gladino in tako onemogočajo dejavnosti na jezeru, kazijo izgled kraja; produkti razkrajanja organske snovi v blatu motijo prebivalce in obiskovalce na jezeru. Temu je tudi vzrok, da je turizem ob jezeru praktično zamrl. Glede na to, da je zaledje gornje Save precej industrializirano in so bili v preteklosti tovarniški izpusti speljani direktno v reko, obstaja bojazen, da vsebujejo sedimenti okolju nevarne snovi. Na podlagi analiz vzorcev na vsebnost težkih kovin, radioaktivnih izotopov, pesticidov in ostalih snovi je bilo ugotovljeno, da so koncentracije pod dopustnimi vrednostimi, ki jih predpisuje EU za kmetijska zemljišča. Da pa zamuljevanje jezera le nima samo negativnih strani, potrjuje to, da so s formiranjem plitvin, poraslih z rečnim rastlinjem bili ustvarjeni ugodni pogoji za drst ciprinidnih ribjih vrst; največje drstišče je prav na območju pod naseljem Zbilje.

3.0 AKTIVNOSTI V ZVEZI S SANACIJO

S povečevanjem stopnje zamuljenosti Zbiljskega jezera so v začetku 80 let je postala vprašljiva realizacija planov lokalne skupnosti in turističnega društva za nadaljni razvoj turizma ob jezeru. V sodelovanju z lokalno skupnostjo so se na pobudo investitorja Savskih Elektran po l. 1983 aktivnosti v zvezi s problematiko intezivirale. Opravljene so bile meritve stanja usedlin v strugi, izdelane so bile analize kakovosti sedimentov, študije možnosti izrabe mulja v kmetijstvu ter podan okvirni predlog za sanacijo. V l. 1989 je bila imenovana posebna strokovna komisija za sanacijo Zbiljskega jezera, ki je opredelila in potrdila naslednje prednostne naloge: opredeliti količine usedlin in lokacije v jezeru kjer je finančno in tehnično opravičljivo izvesti sanacijo, določiti fizikalne in kemične lastnosti usedlin, razdelati možnosti uporabe v kmetijstvu, določiti lokacije za deponije, opredeliti tehnične pogoje za izvedbo sanacije jezera ter izdelati oceno vplivov sanacije na okolje. Razdelano je bilo več možnosti za odstranitev oz. uporabo usedlega blata:

1. uporaba sedimentov v kmetijstvu Posebej detajlno je bila razdelana možnost uporabe mulja v kmetijstvu z namenom uporabiti blato kot nadomestilo za gnojilo ali pa izboljšanje poplavnih območij ob Savi. Na osnovi opravljenih analiz sedimentov in testnih preizkusov ni zadržkov za uporabo mulja v kmetijstvu; pri tem ostajajo problemi, predvsem logistične narave: transport mulja na polja, razgrinjanje in izsuševanje. Zaradi zahtevnega transporta je možen samo transport na bližnje kmetijske površine, ki pa se večji del nahajajo na vođozbirnih območjih obstoječih in potencialnih vodnih virov. Zaradi majhne vsebnosti organskih snovi v blatu je potrebno dodatno gnojenje in v tem primeru bi lahko izcedki iz blata predstavljali potencialno nevarnost za vodne vire.

2. ureditev deponij na območjih obstoječih gramoznic in izkopih V širši okolici jezera so opuščene gramoznice, kjer bi bilo možno urediti deponijski prostor. V tem primeru je problem v ureditvi ustreznega načina transporta blata in varovanje podtalnice pred izcedki iz blata, saj ležijo gramoznice pretežno v varstvenih območjih varovanja podtalnice Kranjsko-Sorškega polja. Zato je bila raziskana druga možnost ureditve deponije z izkopom jame v aluvialnih naplavinah višje obrečne terase, neposredno ob jezeru. Čeprav je ta rešitev najbolj ekonomična, zaradi pretanke plasti aluvialnih sedimentov, v načrtovanem obsegu ni mogoče realizirati.

3. ureditev deponij v sosednjih dolinah V bližnji okolici jezera je nekaj grap, kjer bi bilo možno urediti deponije. Na osnovi pregleda terena in geoloških ocen so bile označene možne lokacije. Pri realizaciji se pojavljajo problemi tehnične narave (transport mulja, odvodnjavanje deponij) in okoljevarstvene narave (obremenitev naravnega okolja s sedimenti).

4. ureditev deponije na območju zajeznega prostora Vidimo, da rešitve odstranitve mulja obstajajo, da pa je vrsta zadržkov, predvsem tehnične in okoljevarstvene narave. Glede na vse to smo kot najustreznejšo možnost predlagali, da se rešitev deponije mulja poišče v območju jezera. Izbrati je potrebno tako tehnologijo izkopa in deponije mulja, da je čim manjši vpliv na okolico in živelj v jezeru.

4.0 IZVEDBA SANACIJE

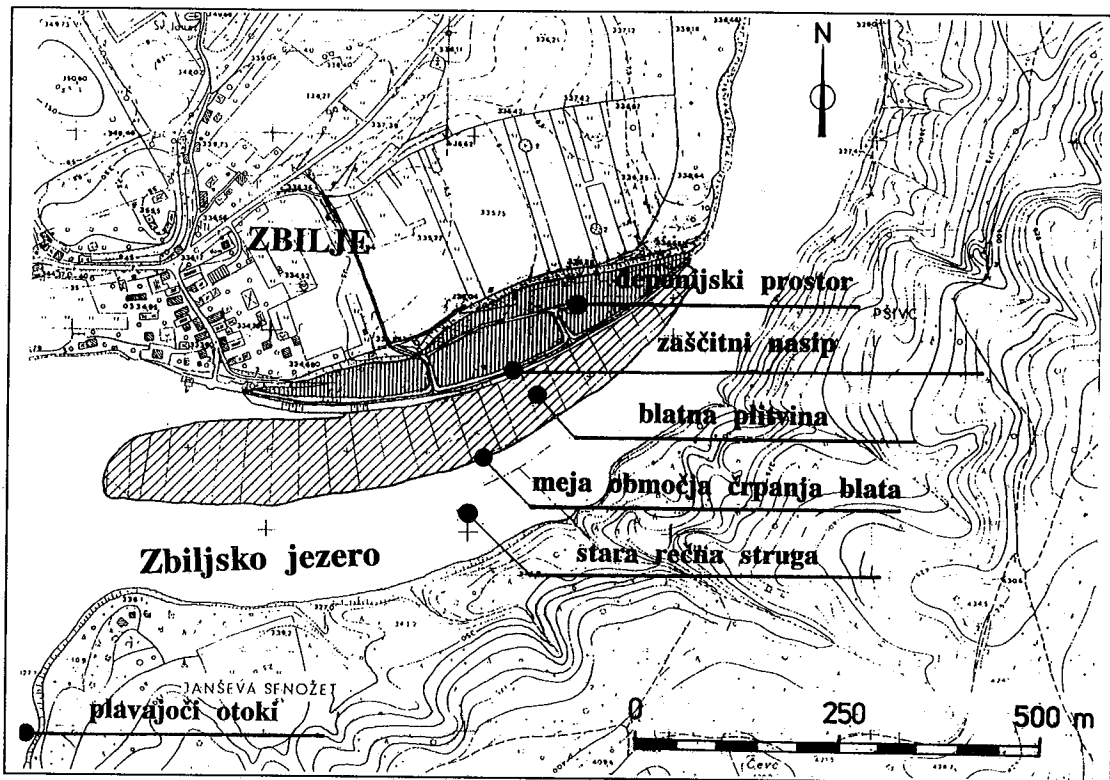
Kjer je kvaliteta sedimentov ustrezna, je smiselna eksploatacija materiala za potrebe v gradbeništvu. Tak način čiščenja bazenov pride v poštev na manjših pregradah in zavisi od: obsega izkopa, kvalitete materiala in ekonomičnosti eksploatacije. Na velikih pregradah je problem količinski obseg sedimentov v bazenih in v zadnjem času, zaradi pretirane onesnaženosti slovenskih rek, postaja zato vse bolj vprašljiva tudi kvaliteta materiala za uporabo v gradbeništvu. Zatorej se ta način sanacije na velikih pregradah uporablja pri nas le v omejenem obsegu. Bolj uporabljan način čiščenja sedimentov pri nas je bila tehnika izpiranja akumulacijskih bazenov, ki pa se zaradi negativnih izkušenj v preteklosti vse bolj opušča. Tekom let obratovanja so se v bazenih odlagale tudi škodljive snovi iz industrijskih odplak in onesnažile vodo v taki meri, da je nedopustno praznenje bazenov zaradi vplivov na živelj nizvodno. Zadnja praznitev akumulacije HE Moste na Šavi v letu 1974 je zaradi visoke koncentracije suspendiranih snovi v vodi bila vzrok za množičen pogin rib vse do Medvod.

Zaradi negativnih izkušenj z izpiranjem bazenov je bil z naravovarstvenega stališča postavljen pogoj, da se mora v prihodnje uporabiti taka tehnologija čiščenja sedimentov, ki omogoča maksimalni učinek z najmanjšimi možnimi škodljivimi vplivi na okolje. Ker v Sloveniji ni tovrstnih izkušenj je sanacija Zbiljskega jezera v tem pomenu vzorčna za ostale primere. Ekonomsko utemeljena je odstranitev tistega dela sedimentov, ki zapolnjujejo izkoristljivi volumen akumulacije: po oceni okoli 200.000 m³. Z upoštevanjem omejitev, ki so vezana na upoštevanje okoljevarstvenih pogojev in velikost možnega deponijskega prostora, smo se odločili, da izvedemo izkop sedimentov samo na območju pod Zbiljami, z namenom izboljšati bivalne razmere prebivalcev ob jezeru ob najmanjših posegih v prostor. Izhodišča so bila naslednja:

- Z upoštevanjem višje instalacije na HE Mavčiče ($Q=260 \text{ m}^3/\text{s}$) se je zmanjšala potreba po velikosti akumulacije. Zato ni zaželeno, da bi v želji povečati izkoristljiv volumen, negativno vplivali na ekološko sprejemljivost izvedbe sanacije.
- Posegi v prostor morajo biti naravnani tako, da v čim manjši meri vplivajo na vspostavljeno ravnovesje v naravi.
- Tekom izvajanja sanacije in po sanaciji skrbeti, da ni možnosti onesnaženja podtalnice in vode v jezeru.
- Z ureditvijo deponije, bo na novo pridobljenih površinah urejen prostor, ki bo namenjen turistično-rekreativnim dejavnostim.

Kota zajezbe HE Medvode znaša 328,5 m, pri normalni dnevni denivelaciji -1,7 m je gladina na 326,8 m. Kota dna saniranega območja je 1,0 m pod dnevno denivelacijo (325,8 m) in omogoča pri normalnih pogojih obratovanja nemotene rekreacijske dejavnosti na jezeru. Na podlagi geodetskih meritev je na celotnem področju, na površini 6 ha potrebno odstraniti 63.200 m³ mulja. Izbrani način sanacije je naslednji: na lokaciji pod naseljem Zbilje se s pregraditvijo dela akumulacijskega prostora z nasipom ustvari deponijski prostor za usedlo blato (slika 1.).

Deponijski prostor je proti jezeru varovan z zaščitnim nasipom iz lomljenca. Trasa nasipa je speljana tako, da se vizuelno in funkcionalno vklaplja v okolje: nasip je temeljen na potopljeno teraso, trasa nasipa pa poteka vzporedno s staro rečno strugo. Zaščitni nasip sestoji iz glavnega, zaščitnega nasipa in dveh priključnih nasipov iz lomljenca, ki služita za čas gradnje kot pristopne poti in ločujeta deponijski prostor na tri ločene prekate. Celotna dolžina nasipa znaša 600m, višina do 7,5m,

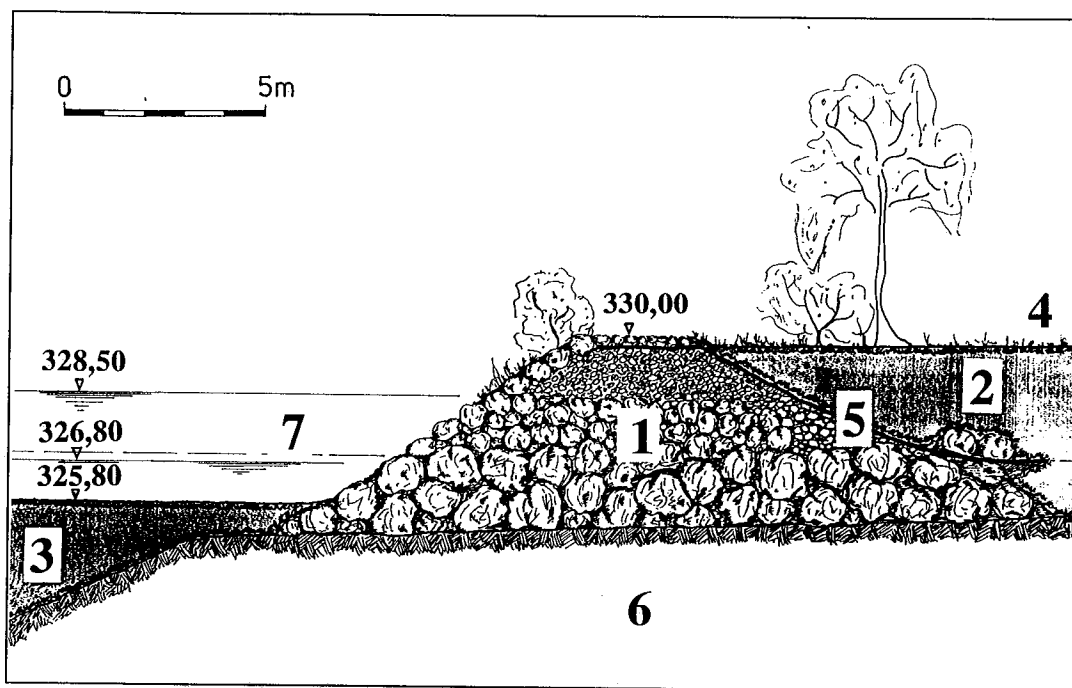


Sl. 1 Pregledna situacija (Skutnik, 1994)

v najširšem delu je nasip oddaljen 60 m od sedanjega brega. Nasip je trapezne oblike: v baznem delu je širok do 11 m, krona nasipa je široka 3,5 m. Po kroni nasipa je speljana intervencijska pot, ki je namenjena za izvajanje rednih vzdrževalnih del na nasipu (slika 2.). Kota krone nasipa je zaradi negativnih izkušenj pri obratovanju HE Mavčiče nadvišana za 1 m (kota krone nasipa 330,0 m), kar je varnostni ukrep za zavarovanje deponijskega prostora pred visokimi vodami. V glavni nasip in priključne nasipe je vgrajeno okoli 30.000 m³ lomljenca. Z izkopom mulja bomo, kljub posegom v akumulacijski prostor, pridobili nazaj okoli 25.000 m³ živega volumna; kar predstavlja približno 12% zasutega volumna.

Trasa nasipa je speljana preko zamuljenih površin. Da je izključena vsaka možnost onesnaženja vode v jezeru, potekajo dela pri izvedbi nasipov v suhem, pri največji možni denivelaciji (do -2,8 m). Da bi zagotovili kvaliteten stik temeljev nasipa s podlago (na najglobljem delu do 4m) in na podlagi izkušenj pri gradnji priključnih nasipov je določeno: predhodno je potrebno v čelnem delu z bagranjem izkopati mulj do raščeneh tal, sledi temeljno nasutje v debelini do 3 m iz skal (diskontinuirne sestave do 100 cm), dalje izravnalni sloj iz lomljenca (kontinuirne sestave do 40 cm) in nad tem povozni sloj iz lomljenca (kontinuirne sestave do 20 cm) do nazivne kote nasipa. S takim načinom gradnje je zagotovljen kvaliteten stik nasipa z temeljno podlago. Na dolvodni strani je nasip izveden v skalometu, na gorvodni strani je izvedena zaščita brežine nasipa z geotekstilom, ki preprečuje izcejanje mulja skozi nasip v jezero.

Znotraj prostora, ki ga omejuje zaščitni nasip z brežino je zajetih okoli 2 ha zamuljenih površin. Na preostalem delu, v območju bazena, je predvideno odstranjevanje sedimentov s postopkom mokrega črpanja, ki sestoji iz pontona, na katerem je nameščena črpalna oprema (črpalka z rezkalcem). Z rezkalcem razrahljamo vrhnji sloj mulja v debelini 1 do 2m, s črpalno kapacitete 500 m³/h pa sesamo mešanico vode z muljem (razmerje voda : mulj je 1:4) v deponijski prostor izza zaščitnega nasipa. Večje kose naplavljenega materiala, ki se nahaja v mulju je potrebno odstraniti z dvigalom iz pontona. Gladina vode v jezeru je za čas črpanja na normalnih obratovalnih nivojih. Deponijski prostor je z glavnimi in delilnimi nasipi razdeljen v tri različne nivojske prekate - usedalnike.



Sl. 2 Prečni prerez čez nasip in deponijo

1. zaščitni nasip; 2. deponija; 3. blato v jezeru po sanacijskih delih; 4. rekreacijske površine; 5. filc; 6. temeljna podlaga; 7. nivo blata v jezeru pred sanacijo.

Suspenzija se pretaka iz najvišjega, prvega prekata do najnižjega tretjega iz katerega je speljan izpust preko iztočnega meniha nazaj v jezero. Glede na izkušnje, ki jih ima izvajalec pri tovrstnih projektih in na kapaciteto črpalke bo trajalo črpanje usedlin približno 60 dni.

Izvajanje sanacije je v teku. V skladu s pogoji soglasjedajelcev (ribiči, ornitologi) je izvajalec (PUV Celje, Gradis-Lj.) zgradil zaščitni nasip v predpisanem roku. V teku so priprave za pričetek črpanja. Po terminskem planu bodo dela v območju bazena zaključena do poletne sezone.

Velik poudarek pri izvajanju sanacije je na ekologiji: plitvina pod Zbiljami se je tekom let formirala v največje drstišče rib v jezeru. Z odstranitvijo usedlin bo nepovratno izgubljena velika drstna površina in zato predvidevamo, da bo trajalo nekaj let preden se bodo populacije rib stabilizirale in se bo število rib normaliziralo. Delno smo izgubo nadomestili z izgradnjo drstišča pod HE Mavčiče, za naprej pa je predvideno, da se bo v letih po sanaciji jezera z vlaganjem mladice v jezero in omejevanjem športnega ribolova skušalo umetno vzpostaviti normalne razmere. S sanacijo plitvine bodo izgubljene tudi lokacije gnezdišč ob jezeru. V skladu z zahtevami ornitologov bosta izdelana dva plavajoča otoka, ki bosta humunizirana, zatravljena in posajena z grmičevjem. Otoka bosta zasidrana na na mestu, kjer velja prepoved gibanja in bodo tako omogočene normalne razmere za gnezditve ptic. Tekom izvajanja sanacijskih del in spremljanja procesa konsolidacije deponije bo posvečena velika pozornost zagotavljanju kvalitete jezerske vode. Sistem zaščite pred izcejanjem iz deponijskega prostora in iztoka v jezero za čas izvajanja sanacije je zasnovan tako, da fizično onemogoča iztok škodljivih snovi nazaj v jezero ali v podtalnico. Organizirana je tudi stalna služba spremljanja kvalitete v skladu s podrobno izdelanimi postopki, predpisanih z elaboratom zagotavljanje kvalitete.

Celotna investicija znaša po feasibility študiji 200.000.000 SIT. Za zagotovitev sanacije prve faze, ki obsega samo izvedbo nasipa in črpanja mulja z izpolnitvijo vseh okoljevarstvenih zahtev je potrebno zagotoviti 130.000.000 SIT. Potrebna sredstva smo delno pridobili iz državnega proračuna na podlagi namenskih sredstev za ekološke sanacije v elektrogospodarstvu Slovenije, delno pa iz lastnih sredstev iz amortizacije.

5.0 Zaključek

Gradnja velikih pregrad na vodotokih korenito spremeni značaj vodnega toka in v kolikor nismo bili tekom gradnje, načrtovanja ali upravljanja pozorni na spremljajoče hidravlično-hidrološke pojave se lahko kaj hitro zgodi, da se z vzpostavitev novega ravnovesja ustvarijo take razmere, ki škodijo ali tudi onemogočajo osnovno funkcijo in namembnost objekta. V HE Medvode na Savi že od vsega začetka spremljamo fenomen usedanja sedimentov v akumulacijskem bazenu, ki predstavlja naravni usedalnik za rečne naplavine. Zaprodovanje jezera je doseglo tak obseg, da se ob zmanjšani možnosti energetske izkoristljivosti bazena kažejo tudi negativni učinki, ki vplivajo na življenje in zdravje ljudi, ki živijo ob jezeru. Po drugi strani so novonastale plitvine življenskega pomena za številne ribje in ptičje vrste, ki naseljujejo ta prostor.

Sanacijski ukrep je omejen na območje jezera pod naseljem Zbilje in je usmerjen z namenom izboljšati življenske razmere ljudi, ki živijo ob jezeru, ob upoštevanju ekološke sprejemljivosti izvedbe glede na vzpostavljeno naravno ravnovesje življa v jezeru. Temu ustrezno je bila, na podlagi pozitivnih izkušenj iz tujine, izbrana tehnologija sanacije jezera s črpanjem usedlin. S tem so bili izpolnjeni tudi strogi naravovarstveni pogoji pri varovanju kvalitete vode in ohranjanju normalnih življenskih razmer za ribji živelj v jezeru tekom izvajanja del.

Rezultat sanacije so Sanacija Zbiljskega jezera je primer ekološke sanacije akumulacijskega prostora hidroenergetskega objekta, kjer energetika in ekonomika nista prioriteti, temveč sta podrejeni kvaliteti izboljšanja življenskih pogojev in se v taki obliki izvaja prvič v Sloveniji. Pridobljene izkušnje bomo uporabili nato na ostalih podobnih projektih po Sloveniji.

LITERATURA:

1. **Breznik, M. 1988:** Influence of the Mavčiče reservoirs on the environment, Proc. 16th Congress on Large Dams, San Francisco 1988, Q60, R46.
2. **Bricelj, M. 1991:** Reka in človek - Sava, Državna založba Slovenije, Ljubljana.
3. **Demšar, V. 1992:** Revitalizacija Zbiljskega jezera, diplomska naloga, Univerza v Ljubljani.
4. **Gregori, J. 1992:** Zbiljsko jezero - naravovarstveno stanje in smernice z ornitološkega stališča, Poročilo September 1992, Prirodoslovni muzej, Ljubljana.
5. **Povž, M. 1994:** Zbiljsko jezero, Ribič, L. 53, Ljubljana, 2-8.
6. **Rajar, R., Kryžanowski, A. 1994:** Self induced opening of spillway gates on the Mavčiče dam, Proc. 18th Congress on Large Dams Durban 1994, Q71, R8.
7. **Skutnik, B. 1994:** Sanacija Zbiljskega jezera, Poročilo 45, PUV, Celje.
8. **Zupan, F. 1990:** Sanacija Zbiljskega jezera, Poročilo 30, Tening, Ljubljana.

Janežič Savo, dipl.gr.ing., IBE Ljubljana, Slovenija
Kogovšek Božo, dipl.gr.ing., IBE Ljubljana, Slovenija

JEZ NA SAVI ZA JEDRSKO ELEKTRARNO KRŠKO - OPAZOVANJE IN VZDRŽEVANJE JEZU -

POVZETEK

Jez na Savi je bil zgrajen v sklopu objektov za oskrbo jedrske elektrarne Krško s hladilno vodo. V prispevku je kratek opis jezovne zgradbe, opazovanje jezua ter njegovo vzdrževanje. Vrši se redno geodetsko opazovanje (pri čemer se merijo horizontalne in vertikalne deformacije), vizualno opazovanje (opazujejo se razpoke in meri delovanje dilatacijskih stikov) ter občasni pregled podslapij in del struge nizvodno od jezua (deloma v osušenem podslapju, deloma podvodno s pomočjo potapljačev).

Erozijske poškodbe podslapja so doslej v celoti sanirane v dveh prelivnih poljih (uporabljeni so epoksidni premaz in epoksidna malta).

SUMMARY

The dam on the Sava River was constructed as one of the structures provided to supply the Krško Nuclear Power Plant with cooling water. This article contains a short description of the dam structure, its monitoring and maintenance. Permanent periodic surveying (horizontal and vertical movements monitoring), visual observations (observation of cracks and measuring of expansion joint deformations) and temporary observations of the stilling basin and a part of the downstream river bed (partly in the pumped out condition and partly under water, by help of a diver) are being practiced.

Up to now the damages caused by erosion have completely been repaired in the two spillway openings of the dam (the epoxy grout and coatings were used).

KRATEK OPIS JEZU

Jez je bil zgrajen v letih 1977 do 1979 po projektih, ki jih je izdelal Elektroprojekt Ljubljana (1). Gradbena dela je izvajala HIDROELEKTRA Zagreb, hidromehansko opremo pa je dobavila in montirala Metalna Maribor.

Vloga jezua je, da se nivo vode v reki Savi dvigne na potrebni nivo, ki omogoča črpanje hladilne vode za potrebe jedrske elektrarne Krško. Krona betonskega prelivnega praga jezua se nahaja na taki absolutni višini, da je zajamčena preskrba z nujno vodo za hlajenje reaktorja ("essential service water") tudi v primeru katastrofe, če bi se porušila celotna hidromehanska oprema jezua.

Jez je v celoti temeljen na nevezanih terciarnih meljih, ki so sicer dobro nosilni, pač pa povsem neodporni na erozijske učinke vode. To je razlog, da je izvedena tesnilna armiranobetonska diafragma na nizvodnem koncu jezua in je jez statično dimenzioniran na polni vzgonski pritisk.

Prelivna polja jezov so opremljena z avtomatiziranimi segmentnimi zapornicami, ki omogočajo v času nizkih in srednjih vodnih pretokov vzdrževanje konstantne zajezne gladine, v času visokih voda pa nemoteno odvajanje prodnega nanosa iz bazena in s tem zaščito vtoka hladilne vode pred zaproditvijo.

Prelivne odprtine jezov so sposobne odvajati tisočletno visoko vodo ($Q_{0.1\%}$), zaščita področja jedrske elektrarne pred še višjimi vodami (desettisočletna voda ali PMF - "possible maximal flood") pa je dosežena s tem, da je desnoobrežni nasip ob bazenu nižji od levoobrežnega. V primeru nastopa ekstremno visoke vode bi prišlo do rušenja desnoobrežnega nasipa in voda bi se evakuirala tudi po širokem denudacijskem področju na desnem bregu Save.

Jez je dilatiran samo v sredini in je torej sestavljen iz dveh monolitnih delov, katerih vsak obsega tri prelivna polja s pripadajočimi vmesnimi in obrežnim stebrom.

Na priloženih slikah (sl. 1, sl.2, sl.3, sl.4) je prikazana situacija ter podolžni in prečni presek jezov.

Karakteristični podatki jezov so sledeči:

Čelotna dolžina jezov	115 m
Število prelivnih polj	6
Širina prelivnega polja	15 m
Skupna širina vseh prelivnih polj	90 m
Širina stebrov med polji	3 m
Kota zgornjega roba mostne konstrukcije	157.50 m
Kota fundiranja jezov	142.00 m
Kota spodnjega roba diafragme	138.00 m
Dolžina jezov s podslapjem	18.00 m
Tisočletna voda ($Q_{0,1\%}$)	3765 m ³ /sek
Desettisočletna voda ($Q_{0,01\%}$)	4272 m ³ /sek

OPAZOVANJE IN VZDRŽEVANJE JEZOV

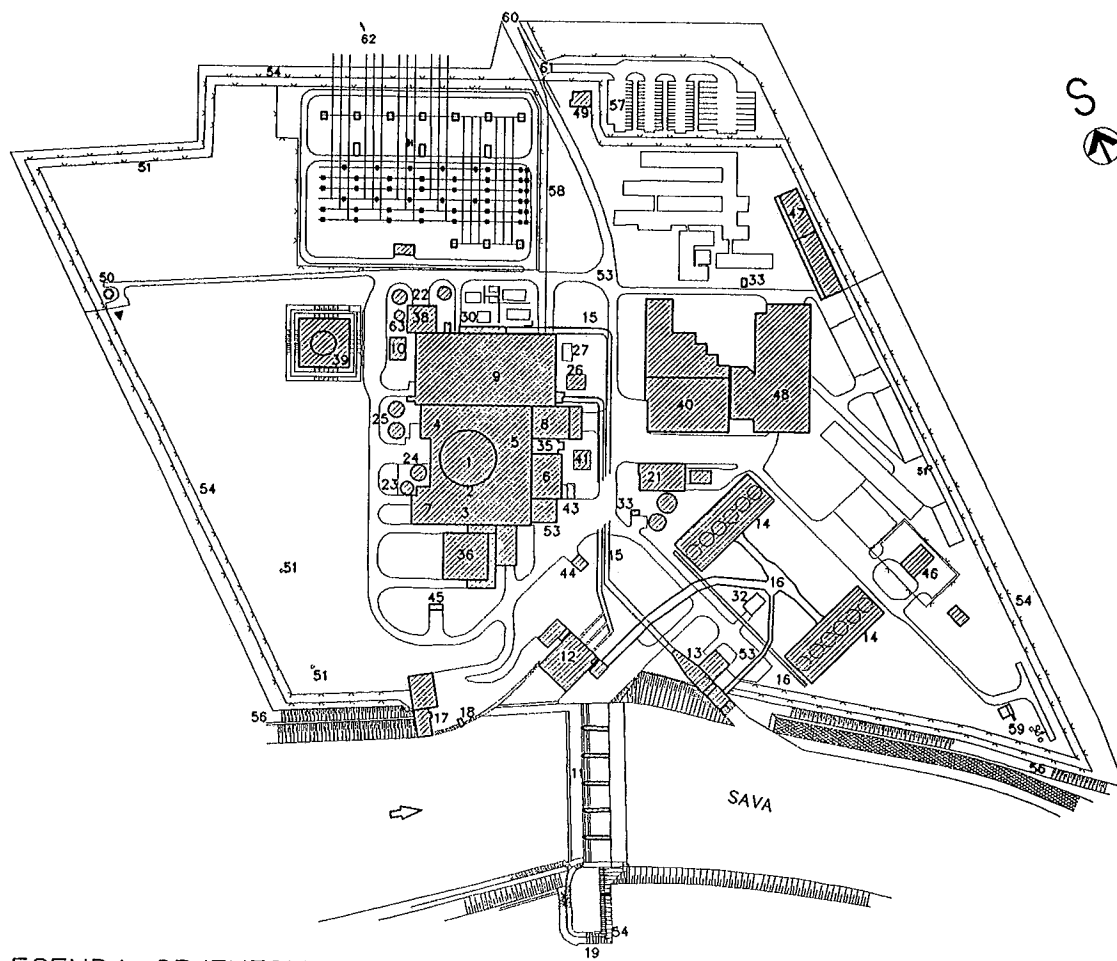
Da se zagotovi varno obratovanje jedrske elektrarne, je v sklopu rednega opazovanja gradbenih objektov predvideno tudi redno opazovanje jezov. To opazovanje se vrši po projektu opazovanja, v katerem so določene vrste opazovanj, definirane opazovalne točke in podan časovni program opazovanj in meritev (2), (3).

Do leta 1990 je bilo s projektom tehničnih opazovanj, ki ga je izdelal Elektroprojekt Ljubljana v letu 1979 (2) na osnovi tedaj veljavnega "Pravilnika o tehničnem opazovanju visokih jezov (Ur. list SFRJ št. 7/66) urejeno redno in sistematično opazovanje za jez. Na drugih pomembnejših objektih elektrarne so se redno opazovali le vertikalni pomiki, druga opazovanja pa so bila le vizuelna, občasna, v smislu potreb po vzdrževanju.

Leta 1989 je tedanja komisija za jedrsko varnost zahtevala, da se pri vsakoletnem ocenjevanju varnosti elektrarne ovrednoti tudi varnost gradbenih objektov. Na osnovi te zahteve je Elektroprojekt leta 1990 in z dopolnitvami v letih 1992 in 1993 izdelal Projekt tehničnega opazovanja za gradbene objekte Nuklearne elektrarne Krško (3), s katerim je bilo uvedeno redno pa tudi izredno sistematično opazovanje 24 najpomembnejših objektov, ki vključujejo tudi jez. Treba je poudariti, da je navedeni projekt vsebinsko oprt na Pravilnik o opazovanju visokih jezov in na smernice za opazovanje mostov, ker za jedrske objekte tedaj ni bilo ustreznega predpisa.

NUKLEARNA ELEKTRARNA KRŠKO

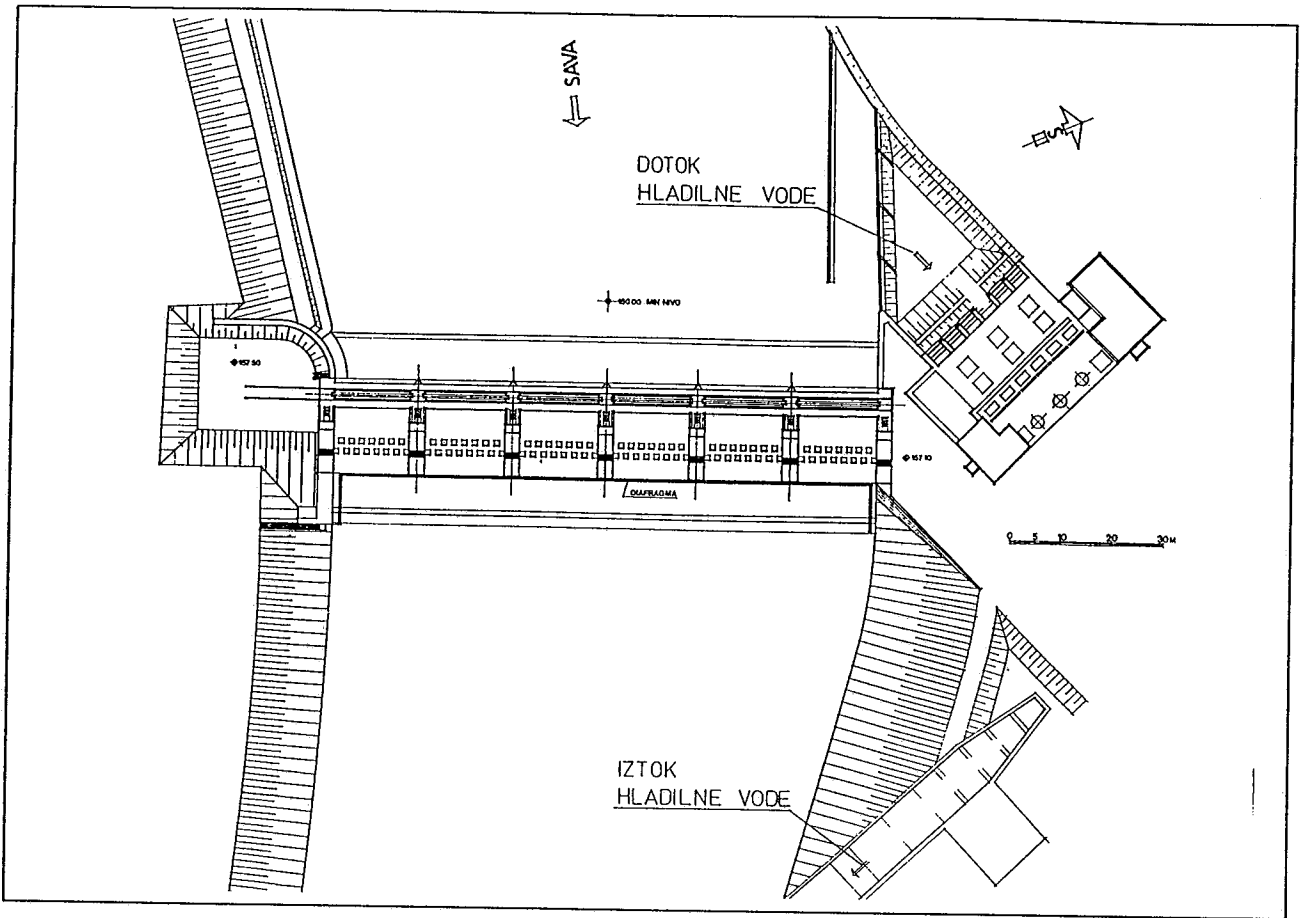
SITUACIJA OBJEKTOV



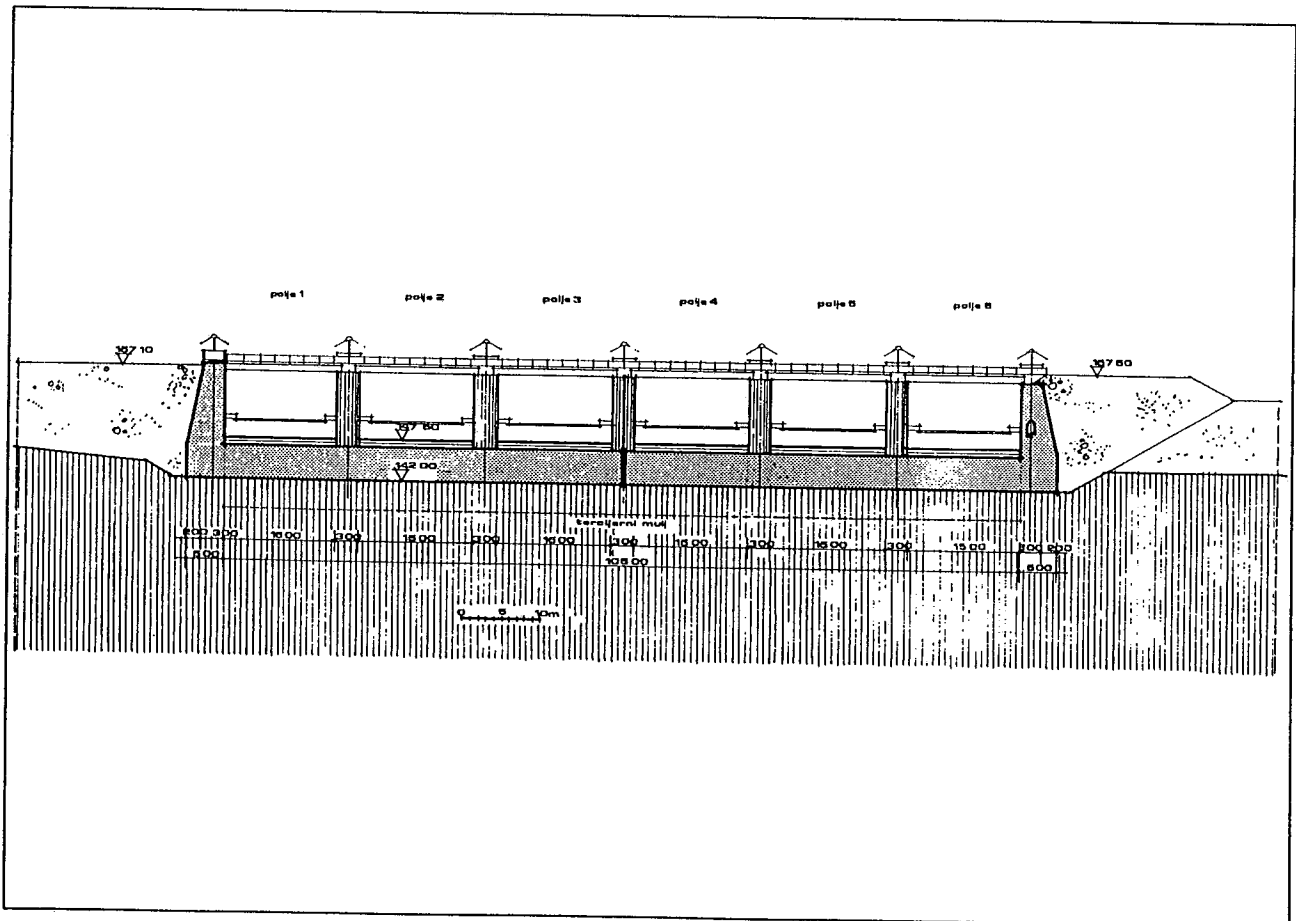
LEGENDA OBJEKTOV

- | | | | |
|----|--|-----|---|
| 1 | REAKTORSKA ZGRADBA | 34 | ZUNANJI ELEKTOENERGETSKI RAZVODI |
| 2 | ZADRŽEVALNI HRAM(Containment) | 35 | ZGRADBA ZA RADIOLOŠKO ZAŠČITO |
| 3 | POMOŽNA REAKTORSKA ZGRADBA | 36 | SKLADIŠČE RADIOAKTIVNIH ODPADKOV |
| 4 | VMESNA ZGRADBA | 37 | OZEMLJILNA MREŽA |
| 5 | KOMANDNA ZGRADBA | 38 | POMOŽNA KOTLOVNICA |
| 6 | ZGRADBA ZA RAVNANJE Z GORIVOM | 39 | SKLADIŠČE GORIVA ZA POMOŽNO KOTLOVNICO |
| 7 | ZGRADBA ZA SISTEME ZA HLAJENJE KOMPONENT | 40 | UPRAVNO TEHNIČNA ZGRADBA |
| 8 | ZGRADBA ZA DIESEL GENERATORJA | 41 | REZERVOAR GORIVA ZA DIESEL GENERATORJA |
| 9 | TURBINSKA ZGRADBA | 42 | ZUNANJI RAZVOD OGREVNE VODE |
| 10 | REZERVOARJA ZA TURBINSKO MAZALNO OLJE | 43 | SKLADIŠČE VODIKA IN DUŠIKA |
| 11 | JEZ NA SAVI IN UTRDITEV OBALE SAVE | 44 | SKLADIŠČE VODIKA |
| 12 | ČRPALIŠČE HLADILNE VODE | 45 | SKLADIŠČE KISIKA |
| 13 | IZLIV HLADILNE VODE | 46 | SKLADIŠČE TEHNIČNIH PLINOV |
| 14 | HLADILNI STOLPI | 47 | GARAŽE S POMOŽNIMI PROSTORI |
| 15 | DOVOD IN ODVOD HLADILNE VODE | 48 | SKLADIŠČE REZERVNIH DELOV |
| 16 | KANALI ZA OBTOČNO HLADILNO VODO | 49 | VRATARNICA Z VHODOM V ELEKTRARNO |
| 17 | ČRPALIŠČE NUJNE VODE | 50 | METEOROLOŠKI STOLP S POSTAJO |
| 18 | IZTOČNI OBJEKT NUJNE VODE | 51 | OPAZOVALNICE ZA MERJENJE RADIOAKTIVNOSTI |
| 19 | VODNJAKI ZA TEHNOLOŠKO VODO | 52 | SKLADIŠČE BUTANA |
| 20 | RAZVOD TEHNOLOŠKE VODE | 53 | ZUNANJA UREDITEV(ceste,ploščadi,zelenice) |
| 21 | ZGRADBA ZA DEKARBONATIZACIJO VODE | 54 | VARNOSTNE OGRAJE |
| 22 | REZERVOAR DEMINERALIZIRANE VODE | 55 | ZUNANJA RAZSVETLJAVA |
| 23 | REZERVOAR REAKTORSKE DODAJNE VODE | 56 | VISOKOVODNI NASIPI |
| 24 | REZERVOAR VODE ZA MENJAVO GORIVA | 57 | PARKIRIŠČE |
| 25 | REZERVOARJA KONDENZATA | 58 | INDUSTRIJSKI TIR NA PLATOJU |
| 26 | NEVTRALIZACIJSKI BAZEN | 59a | METEORNA KANALIZACIJA-ČRPALIŠČE |
| 27 | USEDALNIK IONSKE MASE | 59 | KANALIZACIJA - ČRPALIŠČE |
| 28 | ZUNANJI RAZVOD PITNE VODE | 60 | DOVOZNA CESTA |
| 29 | ZUNANJE HIDRANTNO OMREŽJE | 61 | DOVOZNI TIR |
| 30 | TRANSFORMATORSKE PLOŠČADI | 62 | DALJNOVODNI PRIKLJUČEK |
| 31 | STIKALIŠČE 380kV IN 110kV | 63 | REZERVOAR POŽARNE VODE |
| 32 | STIKALIŠČE HLADILNIH STOLPOV | | |
| 33 | TRANSFORMATORSKE POSTAJE | | |

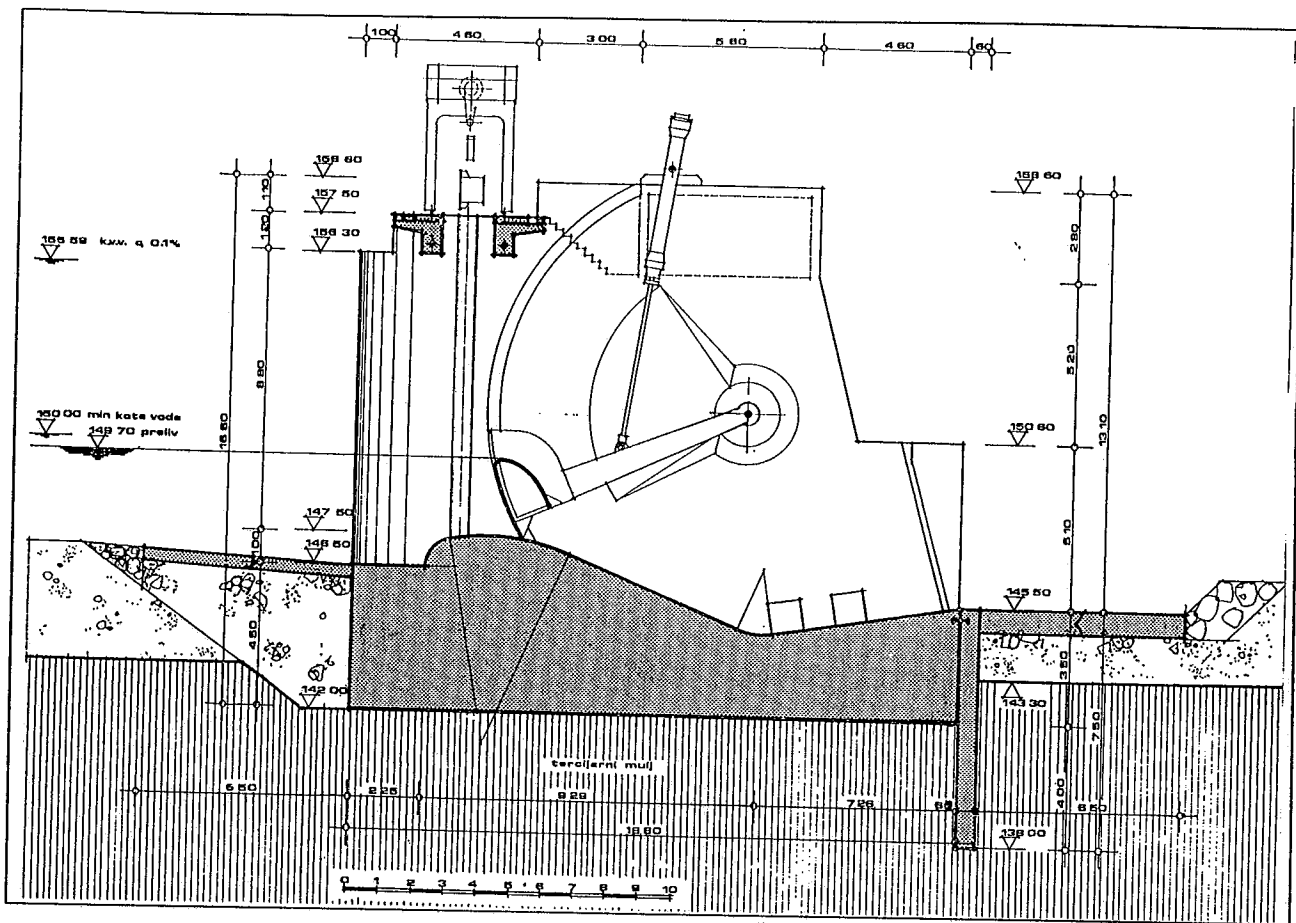
Slika 1 - SITUACIJA NUKLEARNE ELEKTRARNE KRŠKO



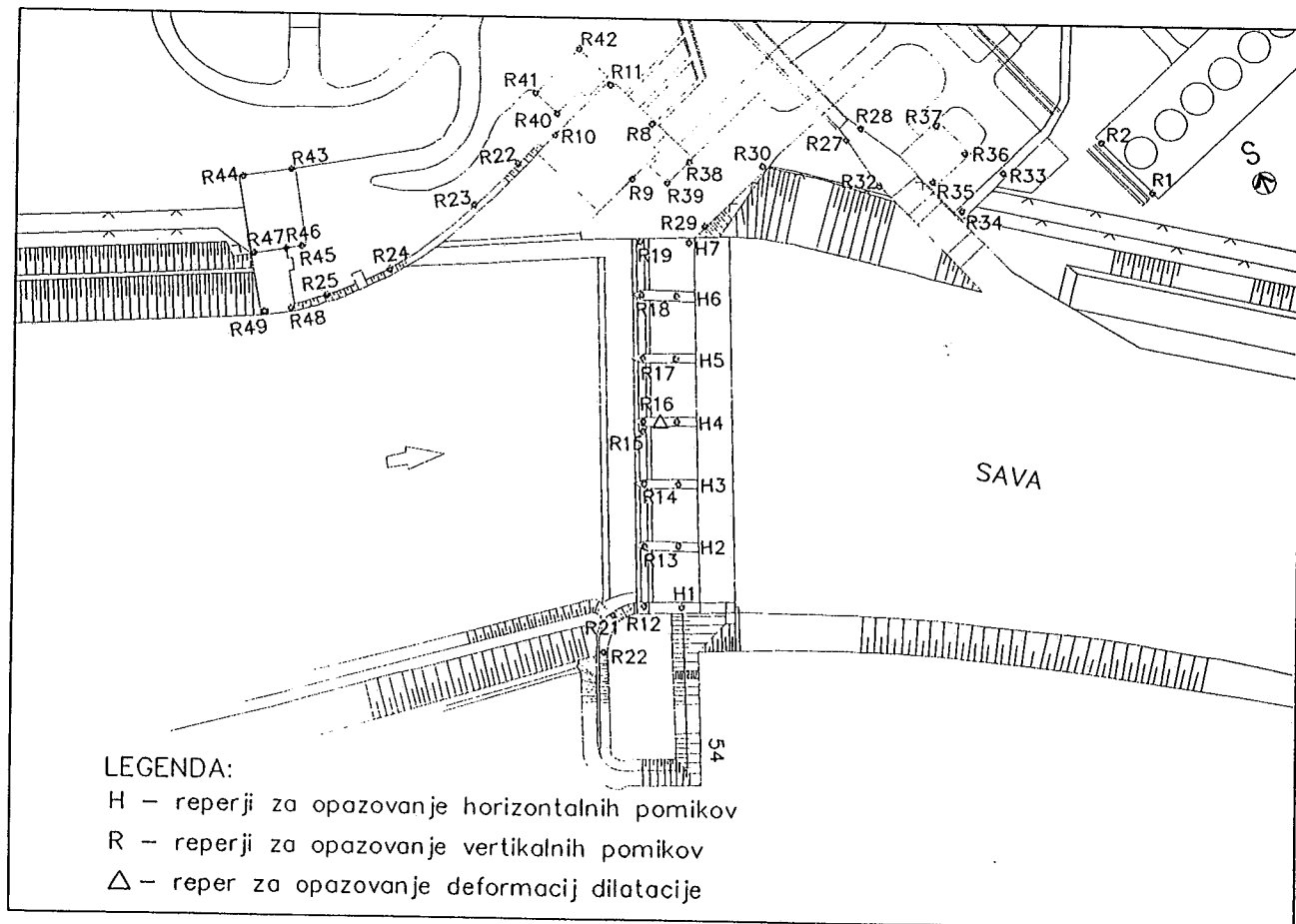
Slika 2 – SITUACIJA JEZU NA SAVI ZA NEK



Slika 3 – VZDOLŽNI PREREZ



Slika 4 – PREČNI PREREZ



Slika 5 – SITUACIJA REPERJEV ZA OPAZOVANJE POMIKOV

Rezultati jedrskih opazovanj: poročila o opazovanjih, analize rezultatov, strokovna mnenja se vsako leto kompletirajo v dveh elaboratih: Tehnična opazovanja gradbenih objektov Nuklearne elektrarne Krško in Kataster opazovanj, ki ju sestavi IBE v sodelovanju z ZRMK Ljubljana.

Rezultati opazovanj služijo kot osnova za ocenjevanje varnosti in trajnosti objektov, obenem pa jih uporablja Služba za vzdrževanje v NE Krško za določanje planov in prioritete pri vzdrževalnih in sanacijskih delih.

Na jezcu se vršijo sledeča opazovanja:

- Meritve vertikalnih deformacij (meritve vrši Elektroprojekt Ljubljana) (4),
- Meritve horizontalnih deformacij (meritve vrši Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo Ljubljani) (5),
- Meritve delovanja dilatacijskih stikov in spremljava katastra razpok na vidnih površinah betona (opazovanje vrši ZRMK Ljubljana) (6),
- Občasni pregledi osušenega dela podslapij (del jezcu med gorvodno in nizvodno tramovno zapornico) (7), (9), (10),
- Občasni potapljaški pregledi tistih delov jezovne zgradbe, ki jih ni možno osušiti (del prelivnega praga pred tramovno zapornico, vrh diafragme, zaščita korita nizvodno od diafragme) (11), (12).

Slika 4 prikazuje situacijo reperjev na jezcu za opazovanje vertikalnih in horizontalnih pomikov in za opazovanje dilatacije.

Dosedanji rezultati geodetskega opazovanja horizontalnih in vertikalnih deformacij pregrade so pokazali, da deformacije ne presegajo pričakovanih vrednosti. (8)

Rezultati in opazovanja razpok na stebrih med prelivnimi polji kažejo na to, da so razpoke nastale zaradi krčenja betona in vpliva hidratacijske toplote in niso posledica napetostnega stanja v konstrukciji.

V letu 1994 je bil izvršen ogled osušenega podslapja prelivnih polj št. 2 in 3. (9), (10). Rezultat tega pregleda je ugotovitev, da so erozijske poškodbe betonskih površin, ki jih je povzročil neprekinjen pretok vlečenega nanosa reke Save tolikšne, da so sanacijski ukrepi neobhodno potrebni. Do tako močnih poškodb je prišlo iz razloga, ker sloj površinskega porfirnega betona ni bil delan skladno z navodili projektanta jezcu, temveč je bil porfirni material uporabljen le za frakcije večje od 16 mm, za finejše frakcije pa navaden prodni material. Zato je prišlo v prvi fazi do abrazije finejših frakcij med porfirnimi zrni, v naslednji fazi pa do izpadanja večjih porfirnih zrn.

Parcialna sanacija površine podslapja, izvršena leta 1989 je utrpela v petih letih obratovanja le delne poškodbe, kar kaže na dobro abrazijsko odpornost uporabljenih materialov (epoksidna malta s kremenčevim peskom) in dobro zlepljenost z osnovnim betonom (premaz s čistim epoksidom). Tudi za sanacijska dela v letu 1994 so bili zato uporabljeni isti materiali in tehnologija dela. V letu 1994 je bila izvršena sanacija podslapja v pregledanih poljih 2 in 3, v letu 1995 pa je predvidena sanacija polj 4 in 5. Nujnost sanacijskih del v poljih 1 in 6, kjer so ugotovljene erozijske poškodbe najmanjše (zaradi koncentracije proda v srednjih poljih), bo ugotovljena pri pregledu osušenih polj.

V letu 1994 je bil izvršen tudi potapljaški pregled gorvodnega roba prelivnega praga in vrha diafragme po celotni dolžini jezua ter z betonsko oblogo zaščitenega dela rečnega dna nizvodno od diafragme na vseh prelivnih poljih, razen na polju št. 3. (11), (12)

Rezultat potapljaških pregledov je ugotovitev, da poškodbe še niso do te mere alarmantne, da bi bila potrebna takojšnja sanacija poškodovanih mest, pač pa je potrebno spremljati časovno napredovanje poškodb in izvršiti sanacijska dela, čim bo ugotovljeno kritično napredovanje poškodb. (13)

DOSLEJ IZVRŠENA SANACIJSKA DELA:

Vzdrževanje gradbenih objektov NE Krško - sanacijska dela so v pristojnosti Tehnične operative-gradbeno vzdrževanje.

Vsa dosedanja gradbena vzdrževalna in sanacijska dela na gradbenih objektih v elektrarni je izvajal Gradis-Ljubljana, delno tudi ZRMK-Ljubljana.

Glede na principe zagotavljanja kvalitete se vsaka sanacija izvaja po naprej pripravljenih pismenih postopkih, izdelanih na osnovi postopkov za zagotavljanje kvalitete (QA) v NE Krško.

Na jezua je bila v letu 1989 v podslapju prelivnega polja št. 2 izvršena parcialna sanacija erodiranih delov površine betona z epoksidnimi premazi in epoksidno malto, nanešeno na predhodno površino, očiščeno s pranjem z vodo pod visokim pritiskom. Ker je pregled tega polja v letu 1994 pokazal, da so tako zaščiteni deli površine dobro zdržali obremenitve v času petih let, je bila ista tehnologija uporabljena tudi pri sanacijskih delih izvedenih na podslapjih prelivnih polj št. 2 in 3 v letu 1994. Celotna površina podslapij je bila očiščena, premazana z lepilnim slojem epoksida, vse erozivne vdolbine zapolnjene s epoksidno malto in nato na celotno površino podslapja nanešena plast epoksidne malte povprečne debeline 2 cm. Zgornja zaglajena površina je bila premazana z epoksidnim premazom. Dve razpoki iz katerih se je izcejala voda, ki je pronicala po stiku med primarnim in sekundarnim betonom, sta bili predhodno zainjektirani.

Razpoke na stebrih med prelivnimi polji, širše od 0.2 mm so bile zainjektirane in nato celotna površina stebrov opleskana z epoksidnim premazom.

V letu 1995 se predvideva poleg nadaljevanja saniranja preostalih prelivnih polj še sanacija nizvodnega dela poškodovanega roba podslapja, v naslednjih letih pa tudi sanacija vrha diafragme in gorvodnega praga prelivnega polja ter površine podslapja.

- (1) IB Elektroprojekt Ljubljana, Jez na Savi za NE Krško, PGD in PZI, 1976, 1977
- (2) IB Elektroprojekt Ljubljana, Projekt tehničnega opazovanja jezovne zgradbe na Savi za NE Krško, 1979
- (3) IB Elektroprojekt Ljubljana, Nuklearna elektrarna Krško, Projekt tehničnega opazovanja, gradbeni objekti, marec 1990
- (4) IB Elektroprojekt Ljubljana, Redna letna poročila o meritvah vertikalnih pomikov jezu na Savi od leta 1979 dalje
- (5) FAGG, Katedra za geodezijo Ljubljana, Redna letna poročila o meritvah horizontalnih pomikov jezu na Savi od leta 1979 dalje
- (6) ZRMK Ljubljana, Redna letna poročila o meritvah delovanja dilatacij in o kontrolnih pregledih in dopolnitvah katastra razpok na jezu na Savi od leta 1983
- (7) Gradis Ljubljana, Poročila o pregledih in o izvedbi sanacije prelivnih polj jezu v letih 1983
- (8) ZRMK Ljubljana, Geotehnično poročilo o analizah tehničnega opazovanja posevkov zgradb NE Krško v letih 1990, 1991, 1992, 1993
- (9) ZRMK Ljubljana, Beležka o sestanku strokovne komisije dne 20.6.1994, Sanacija preliva na jezu za NE Krško
- (10) ZRMK Ljubljana, Beležka o pregledu osušenega 3. prelivnega polja jezu v NE Krško z dne 4.8.1994
- (11) Krašovec - Hidro Speleo Ljubljana, Poročilo o izvedbi potapljaškega pregleda jezu na področju NE Krško, 22.10.1994
- (12) Gradis Ljubljana, Poročilo št. 1140/94: Izvedba potapljaškega pregleda površin ob zgornjih zagatnicah, prečnega profila a.b. površine diafragme, površine skalometa jezu na reki Savi v NE Krško, ugotovitve in predlog ukrepov, 28.10.1994
- (13) IB Elektroprojekt Ljubljana, Mnenje projektanta jezu na Savi za NE Krško o ugotovitvah potapljaškega pregleda podvodnih delov jezu v letu 1994, 7.2.1995

ANALIZA STANJA DRENAŽNEGA SISTEMA PREGRADE MOSTE

Rudi Brinšek, Savske elektrarne Ljubljana

POVZETEK

Namen članka je, na primeru ločno-gravitacijske pregrade Moste, zgrajene na reki Savi Dolinki približno 60 km severozahodno od Ljubljane, opozoriti na vpliv staranja betonskih pregradnih objektov v Sloveniji vsled kemične korozije betona in hribine. Korozija betona in stanje drenažnega sistema pregrade sta v neposredni odvisnosti, ki dolgoročno vplivata na zmanjševanje trdnosti materialov in znatno povečevanje vzgonskih sil. Pregrada Moste je stara 42 let.

SUMMARY

In this paper, using as an example the arch-gravity dam at Moste on the River Sava Dolinka approximately 60 km northwest of Ljubljana, the effects of the aging of concret on dam structures in Slovenia, due to chemical corrosion processes taking place in the concrete and the underlying rock, are described. The corrosion of the concret and the condition of the drainage system of the dam are in direct connection with one another, which has a long-term effect on the reduction of the strength of the materials, with a significant increase in the upthrust forces. The dam at Moste is 42 years old.

1.0 SPLOŠNO

Betonska ločnogravitacijska pregrada Moste je zgrajena na reki Savi Dolinki v soteski Kavčke pri Mostah na Gorenjskem. Gradnja pregrade je potekala v letih 1947 do 1952. Gradbena višina objekta od najnižje kote temeljenja (470.80) do kote roba preliva (524.75) znaša 53.95 m, do vrha mostne ograje pa 60.8 m. Krona pregrade je dolga 49.85 m. V pregradi se nahajata dva vzdolžna kontrolna hodnika, zgornji na koti 503.00, spodnji s prečnim krakom pa na koti 481.50. Razen elementov mostu in obloge preliva betonsko telo pregrade ni armirano. V desnem boku pregrade se nahaja talni izpust, premera 5.25 m in dolžine cca 90 m. V podslapju sta izdelana umirjevalni tolmun preliva in talnega izpusta.

Sotesko Kavčke omejujejo tektonsko poškodovani bloki dolomitizirnega apnenca. Med pregrado in umirjevalnim tolmunom preliva poteka v podlagi tako imenovani "savski prelom", ki razmejuje sklade apnenca od oligocenske morske sive meljne glin (sivice). Celotna apnenčasta hribina v pregradnem profilu je bila v geološki preteklosti verjetno narinjena na poševno podlago oligocenske sivice. Ob prelomu je sivica mestoma rdeče barve in premešana s samicami ter drobirjem apnenca. Zaradi stika z vodo je tu razmehčana.

Za zmanjšanje vzgonskih tlakov je bila na vzvodni strani pregrade in njenih bokih izdelana dvo do troredna cementna in glinena injekcijska zavesa, v telesu pregrade in podslapju pa drenažni sistem.

2.0 STANJE DRENAŽNEGA SISTEMA

Drenažni sistem pregrade Moste predstavljajo naslednji podsistemi (glej sliko 1):

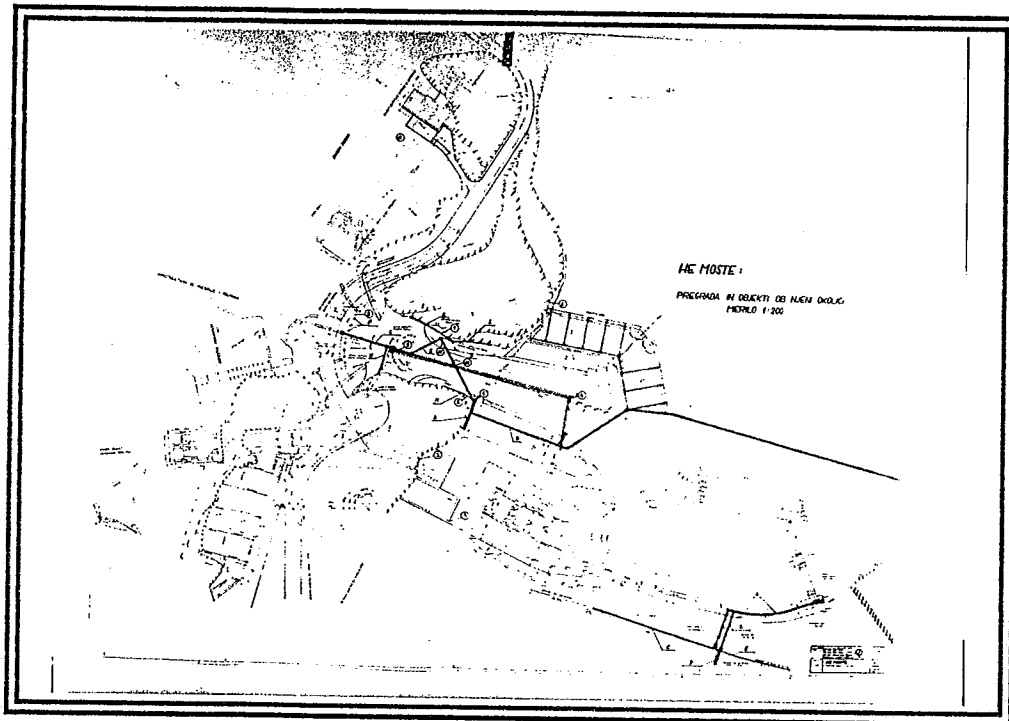
- desnobrežni podsistem v podslapju (A, B, C, D, E in šrafirani del)
- podsistem pregradnega telesa in bočnega kontakta s hribino (F, G, H, I, J, K, L, M, N, O)
- podsistem levega plazišča v podslapju,

Poleg navedenih podsistemov lahko s prečrpavanjem kot učinkovitejša drenaža nastopa tudi

- sondažni jašek in rov pod pregrado in umirjevalnim tolmunom (šrafirani del).

Odtok drenažne vode iz navedenih podsistemov zagotavlja

- levobrežni odtočni kanal.



Slika 1: Situacija pregrade HE Moste in drenažnega sistema

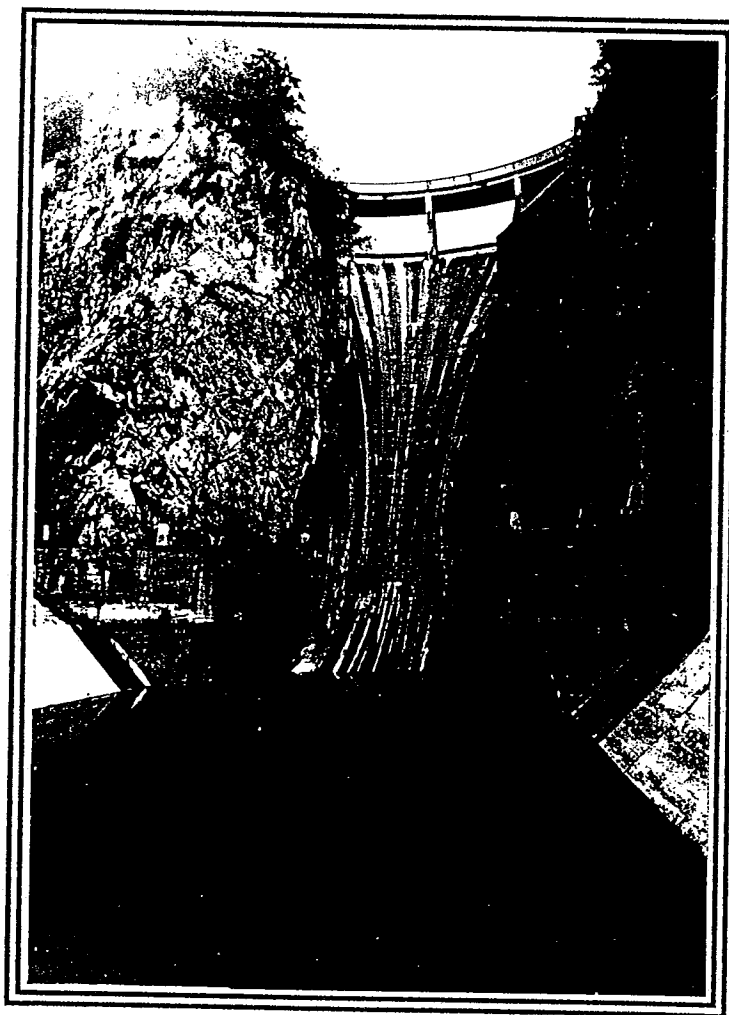
Drenažni podsistem pregradnega telesa in bočnega kontakta s hribino sestavljajo vertikalne cevi Φ 20 cm v profilu vzdolžnih kontrolnih hodnikov (F), cevi Φ 25 cm desnega in levega bočnega kontakta (H, K, L, M), drenažni rov med podslapjem in desnim bokom pregrade (N) in glavna odtočna cev Φ 60 cm pod prečnim kontrolnim hodnikom pregrade (G, I, J) ter desnim bokom umirjevalnega tolmana preliva (O).

Z detajlnim pregledom tega drenažnega podsistema je bilo ugotovljeno, da je iztok vode iz vertikalne drenaže v profilu vzdolžnih kontrolnih hodnikov (F) zaradi delne zamašitve s sigo praktično v celoti onemogočen. Drenažne cevi, na medsebojnih razdaljah 2 m, so zasigane predvsem na spodnjih zožanih iztočnih jeklenih delih Φ 2", ki se nahajajo v kontrolnih hodnikih. Dreniranje infiltrirane vode v betonu iz akumulacije in delno iz bokov pregrade je z zamašitvijo te drenaže preprečeno. Infiltracija vode iz akumulacije v beton verjetno v glavnem poteka po horizontalnih delovnih stikih. S pregledom je bilo ugotovljeno tudi, da so drenažne cevi ob bočnih

kontaktih s hribino (H, L, M) praktično v celoti zasigane.

Neustrezno delovanje obravnavanega drenažnega podsistema povzroča povečani notranji vzgon v telesu pregrade, zaradi zastajajoče vode pa tudi vse večji vpliv kemične korozije betona, ki je hkrati tudi edini vzrok mašitev drenaž.

Dreniranje zaledne vode je zadovoljivo le na območju drenažne cevi ob levem kontaktu s hribino (K). Ker sta drenaži L in M zamašeni, se vsled tega pojavljajo obsežne mokre cone na obeh spodnjih obrežnih platojih pregrade (slika 2), ki jih na fotografiji (slika 3), posnetih kmalu po izgradnji objekta, ni opaziti. Glavna odtočna cev Φ 60 cm je na območju prečnega kontrolnega hodnika (G, I) v večjem delu zamuljena (mulj pomešan s sigo), na odseku, ki preči od levega proti desnemu boku (J) pa je cev do polovice višine zasigana. Drenažni rov (N) je v ustreznem stanju.



Slika 2: Nizvodno lice pregrade danes

Sondažni jašek in rov pod pregrado in umirjevalnim tolmunom preliva (šrafirani del) sta bila izdelana z namenom raziskati kvaliteto in stratigrafijo materialov na območju "savskega" preloma. Sondažni jašek ima premer 2 m, eliptični sondažni rov pa višino cca 1.5 m. Sondažni rov je situiran približno v osi pregrade. Višinsko se nahaja cca 28.5 m pod temeljno spojnico pregrade

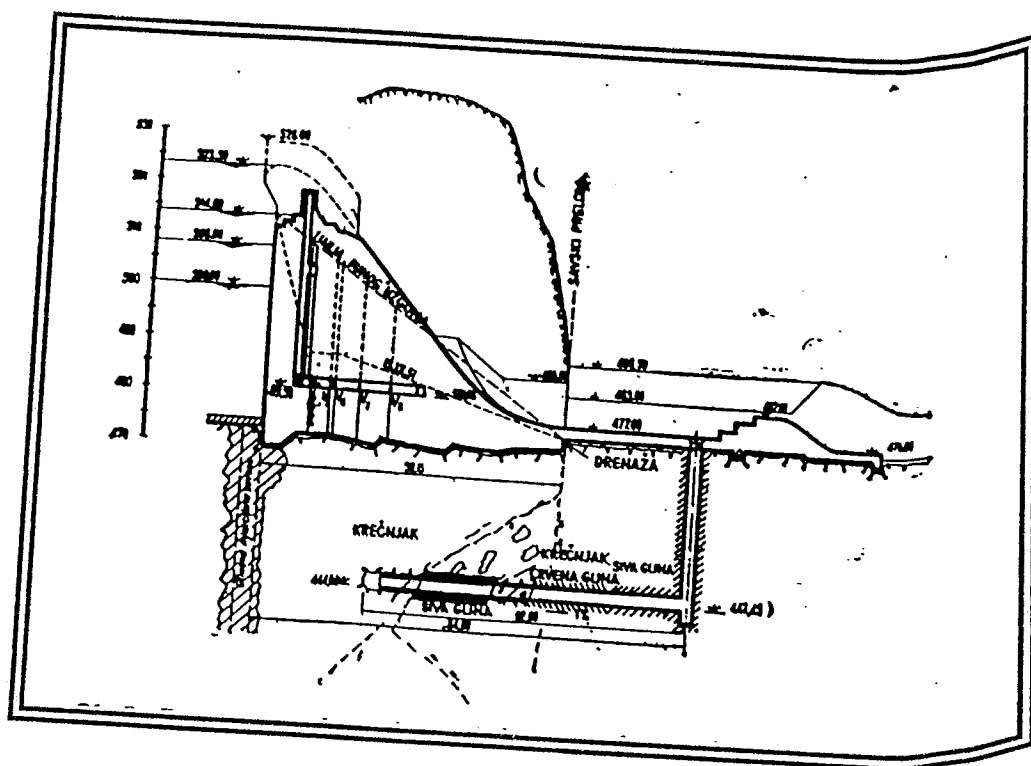
(slika 4). Razen čela rova sta sondažni jašek in rov obdana z betonsko oblogo. Čelo rova je oddaljeno cca 22 m od injekcijske zavese oziroma vzvodnega lica pregrade, cona "savskega" preloma v višini rova pa cca 47 m. Na območju preloma so skalne samice apnenca vtisnjene v sivico, ki je tu v tanjši plasti rdeče barve. Na sivici so v celoti fundirani umirjevalni tolmun in ostali elementi podslapja.

Kontinuirano črpanje in s tem dodatno dreniranje podlage pregrade je potekalo s pomočjo potopne črpalke, sicer bi voda sistem preplavila približno do kote dna umirjevalnega tolmana preliva. Po nepreverjenih podatkih je črpanje vode iz podsistema potekalo do leta 1958, kasneje pa so bile te aktivnosti opuščene.



Slika 3: Nizvodno lice pregrade po končani gradnji

Desnobrežni podsistem v podslapju (A, B, C, D, E in šrafirani del), podsistem levega plazišča v podslapju in levobrežni odtočni kanal niso direktno vezani na dreniranje telesa pregrade.



Slika 4: Sondažni rov in jašek pod pregrado

3.0 ANALIZA RAZTOPLJENIH SNOVI V DRENAŽNIH VODAH IN VODAH IZ IZVIROV V PODSLAPJU

V času pregleda drenažnega sistema pregrade so bili odvzeti tudi vzorci drenažnih vod in izvirov iz apnenčaste hribine v podslapju. Namen preiskave je bil oceniti vpliv talne vode na kemično korozijo betona pregrade in bočne hribine. Preiskava je obsegla določitev izparilnih ostankov filtriranih vzorcev.

Oznaka vzorcev z mesti odvzema in izparilnimi ostanki so podani v naslednji tabeli. Mesta odvzema so z oznakami 1 do 12 prikazana na sliki 1.

Oznaka vzorca	Mesta odvzema	Izparilni ostanek (mg/l)
1	Glavna drenaža Φ 60 cm v pregradi (desni jašek ob pregradi)	209
2	Izvir iz skale ob pomožni zapornici talnega izpusta	181
3	Barbakana v vogalu sidranega podpornega zidu	174
4	Sondažni jašek (na koti 472.40)	162
5	Drenažna cev Φ 20 - odsek M	184
6	Izvir iz skale na levem boku (kota cca 470.00)	230
7	Jeklana cev Φ 2" - odsek K	180
8	Jeklana cev na levem čelu spodnjega vzdolžnega hodnika	152
9	Jeklana cev iz stropa spodnjega prečnega hodnika	239
10	Razpoka v cevi Φ 60 cm ob vzvodnem jašku - odsek J	201
11	Curek iz spodnje fuge obloge preliva	179
12	Akumulacija	175

Drenažna voda (1) na iztoku glavne drenaže Φ 60 cm v desnobrežnem jašku (odsek J) predstavlja glavni infiltrirane vode iz akumulacije in bokov v beton pregrade. Odtok infiltrirane vode skozi zračno stran preliva in umirjevalni tolmun je po oceni relativno majhen, saj se pod umirjevalnim tolmunom nahaja zelo slabo prepustna sivica.

Pretok vode iz drenažnega sistema pregrade znaša na merskem mestu v nizvodnem jašku odseka J 2 l/s. Kot je razvidno iz zgornje tabele znaša razlika v masi izparilnega ostanka vzorca vode iz akumulacije in vzorca drenažne vode iz navedenega jaška 34 mg/l. Pri pretoku cca 2 l/s se v tem primeru iz "potopljenega" dela betona pregrade v povprečju izloči cca 68 mg/s v vodi topnih snovi. V enem dnevu znaša masna izguba cca 5.8 kg. Ob predpostavki linearosti procesa znaša masna izguba v dosedanji 42-letni življenski dobi pregrade 88914 kg. Pri prostorninski masi nearmiranega betona 2400 kg/m³ se je iz "potopljenega" dela pregrade po tem računu do danes izločilo cca 37 m³ betona. Če se k temu prišteje še cca 7 m³ sige, odložene v drenažnih ceveh, "manjka" v pregradi cca 44 m³ betona. Na osnovi rezultatov dolgoletnih meritev vzgonskih tlakov na temeljni spojnici pregrade in geometrijskih podatkov je razvidno, da znaša volumen "potopljenega" dela betona pregrade cca 20000 m³. Volumsko je v tem primeru prizadetega cca 0.2 % betona, kar je težnostno, upoštevajoč tip pregrade, praktično zanemarljivo. Zadnji podatek je le povpreček, lokalno je prizadetost betona lahko bistveno večja.

Preiskava izparilnih ostankov filtriranih vzorcev vod (2 do 11) je potrdila tudi že znana dejstva. Čim dalj se voda zadržuje v betonu ali apnenčasti hribini, večji ima vpliv na kemično korozijo materialov. Vzorec iz apnenčaste hribine (6) je naprimer pokazal, da je ta korozijsko mestoma najbolj prizadeta.

4.0 ANALIZA VZGONSKIH TLAKOV NA TEMELJNI SPOJNICI PREGRADE

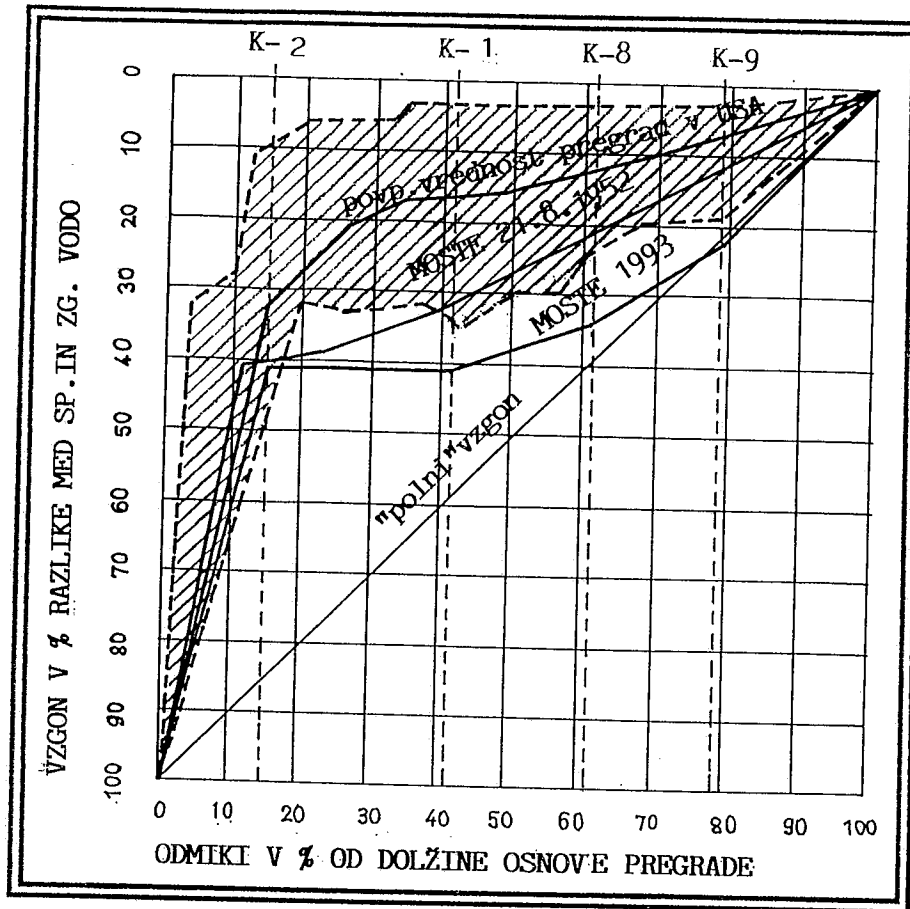
Meritve vzgonskih tlakov na temeljni spojnici pregrade so potekale med prvim polnjenjem akumulacije v letu 1951, kontrole pa so kasneje potekale redno tudi v vseh naslednjih letih.

Na sliki 5 so vrisane linije vzgonskih tlakov za pregrado Moste na osnovi rezultatov meritev iz leta 1952 in 1993. Zaradi primerjave so v isti diagram vnešeni tudi rezultati meritev vzgonskih tlakov 8 USA pregrad, starejših od pregrade Moste, zajetih v šrafirani anvelopi. Da je mogoča neposredna komparacija rezultatov, je položaj merskih mest podan v % debeline pregrade v višini dna umirjevalnega tolmana preliva, merjeni vzgonski tlaki pa v % razlike med zgornjo in spodnjo vodo.

Iz grafično obdelanih podatkov je razvidno naslednje:

- Vzgonski tlaki na temeljni spojnici pregrade so bili po prvem polnjenju akumulacije v primerjavi s srednjo vrednostjo tlakov USA pregrad relativno veliki. Že takrat je bilo opozorjeno na relativno velike tlake na nizvodnem delu pregrade.
- Vzgonski tlaki so se kasneje, kot kaže, še povečevali, saj glede na rezultate meritev v zadnjih letih na nizvodnem delu temeljne spojnice dosegajo vrednosti "polnega vzgona". Vrednosti se v

dosedanjih letih niso bistveno spremenile le na vzvodnem območju (spodnji vzdolžni hodnik).



Slika 5: Komparacija vzgonskih tlakov

Navedeno kaže na vpliv z leti povečevane infiltracije vode iz bokov pregrade, slabe splošne dreniranosti podlage pregrade nizvodno, mašitev drenažnih cevi in na vpliv opustitve črpanja vode iz sondažnega rova pod pregrado. Slabo dreniranje podlage pregrade nizvodno je razumljivo, saj je na "savskem" prelomu prepustnejša podlaga apnenca narinjena na praktično neprepustno sivico. Vsled tega se z leti na nizvodnem delu pregrade v obliki brizgajočih curkov vode (10, 11) ustvarja "naravna" drenaža.

5.0 ZAKLJUČKI

Na osnovi ugotovljenega stanja drenažnega sistema, analize vsebnosti v drenažnih vodah raztopljenih snovi in analize merjenih vzgonskih tlakov na temeljni spojnici pregrade bi bilo treba izvesti naslednje:

- takojšnje očiščenje zasiganih vertikalnih (F) in ostalih drenažnih cevi (H, L, M) v pregradi, da bo zadrževanje infiltrirane vode v betonu čim krajše,

- izdelati dodatne vertikalne drenažne vrtine vzvodno od "savskega preloma", ki bi po možnosti segale v spodnji sondažni rov, in hkrati ponovno zagotoviti kontinuirano črpanje vode iz sondažnega rova pod pregrado,
- izdelati horizontalne drenažne vrtine v levi bok pregrade, da se zmanjša vzgonske sile in hkrati vpliv kemične korozije hribine,
- izvesti kompletne komparativne raziskave kvalitete "potopljenih" in "nepotopljenih" betonov pregrade, na osnovi katerih se pristopi k študiji izdelave ustreznega tesnenja betonov na vzvodnem licu pregrade kot trajnejši zaščiti betonov.

LITERATURA:

- Poročilo o tehničnem opazovanju pregradnega objekta in strojnice HE Moste, ZRMK, z dne 30.3.1994,
- Pogoji in vzroki nastanka korozije betona iz portland-cementa, prof.dr. Janko Kavčič,
- Izluživanje kreča iz betona pod uticajem agresivnih voda, prof.dr. Stojanka Stojadinović,
- Poročilo o preiskavi vzorcev vode iz pregrade Moste, ZRMK, z dne 5.1.1995.
- Merenja i posmatranja na brani HE Moste za vreme probnog punjenja akumulacionog basena, ing. Matej Kleindienst, prof.dr. Lujo Šuklje.

UMETNO DRSTIŠČE POD PREGRADO ZA HE MAVČIČE

Zoran STOJIČ
IBE d.d.
Hajdrihova ulica 4, 61000 Ljubljana, R Slovenija

Meta POVŽ
Zavod za ribištvo
Župančičeva 9, 61000 Ljubljana, R Slovenija

1. UVOD

Ta prispevek je namenjen vsem, ki sodelujejo pri načrtovanju hidroelektraren in morajo pri načrtovanju visokih jezov upoštevati tudi naravovarstvene ukrepe kot so na primer prehodi za ribe. To je priložnost za interdisciplinaren pristop inženirjev-gradbenikov in biologov.

Posledice, ki se pojavljajo ob gradnji visokih jezov, so bodisi take, ki jih je lahko predvideti in determinirati (na primer izguba kmetijskih zemljišč), do takih, ki jih je zelo težko predvideti (kot je na primer uničenje habitatov, spremembe ribjih populacij oziroma vrstnega sestava) (7).

V številnih rekah, kjer živijo migracijske vrste rib, so projekti prilagojeni naravovarstvenim zahtevam. Večina planiranih visokih jezov ima ustrezne ribje prehode kot so na primer ribje steze, ribja dvigala in podobne naprave (6). Tipi ribjih stez so različni in tudi njihova uporabnost je različna.

Že dolgo časa je namreč znano, da se populacije rib v novih zajezitvah v prvih nekaj letih zelo razmnožijo. Vzrokov za tako stanje je veliko. Glavni razlog pa je seveda velika količina hrane. Dejstvo pa je tudi, da so številne izrazito rečne vrste rib po zajezitvi obsojene na izginotje.

Po izgradnji jezov zelo vpliva na ribe nihanje vodostaja in sicer lahko zaradi hitrega znižanja vodne gladine propadejo ikre na drstiščih pod pregradami ali pa so cela drstišča na suhem in je drst preprečena. Ob hitrem dvigu vodostaja pa je voda pregloboka in drst preprečena.

Na drst vpliva spremenjen temperaturni režim pod pregradami (2), za nekatere vrste je sprememba temperature vode lahko celo usodna. Sediment v vodi pa lahko zaradi zasipavanja popolnoma uniči ribje ikre in zarod.

Usodno je tudi pomanjkanje kisika in včasih pride po zajezitvi do poginov rib posebno če se zelo razraste vodno rastlinje.

Spremembe naravnega rečnega režima, temperature, rečne struge, kvalitete vode itd. in razlike, ki nastanejo ob spremembi prej tekoče vode v stoječo, bistveno vplivajo na reševanje problematike obstoja rib. Številni organizmi, ki sicer živijo v tekočih vodah, ne morejo živeti v stoječih. To dejstvo je bilo upoštevano tudi pri iskanju rešitev za ribe ob izgradnji jezov za HE Mavčiče na reki Savi in zato je bilo zgrajeno umetno drstišče.

Predlagane so bile še druge rešitve, umetno drstišče pa predstavlja dolgoročno rešitev in ohranitev številnih ribjih vrst v tem delu reke.

SUMMARY

In the paper the description of spawning channel at the Mavčičedam site is given. After a careful consideration of performance of fish pass, which was assessed to be inefficient in the long run, it was decided to build spawning channel instead of firstly planned fish pass. The reason was that the fish were closed between obstructions at both ends of the river stream : Majdičev weir at the upper part and Zbilje pondage at the lower part. Thus the migration was already limited.

However, the planned Mavčiče impoundment would flood most at the remaining spawning areas which were to become scarce. Having had a thorough discussion with all parties involved and without particular claims of naturalists for the preservation of the migration path, a spawning channel was decided to be build.

First experiences with the operation of the channel have been better than expected. Ichthyologists suggest to construct some additional capacities to accomodate all the species in the pond. They also agree that the same approach is to be applied for othe projects in Slovenia (8).

2. ZAJEZITEV ZA HE MAVČIČE.

Leta 1986 je bila zgrajena HE Mavčiče. Pred tem se je proučevalo kakšne bodo posledice zajezitve oziroma visoke pregrade na ribje populacije v reki. Ugotovili so, da se ribe na tem predelu Save (ki so večinoma zanimive za športni ribolov), selijo iz Zbiljskega jezera po toku navzgor in v pritoke bodisi na drst ali na pasišča.

Med raziskavami je bilo v Zbiljskem jezeru ugotovljenih 10 različnih vrst rib iz 4 družin:

- Salmonidae:
 - potočna postrv *Salmo trutta m. fario*
 - šarenka *Oncorhynchus mykiss*
- Thymalidae
 - lipan *T. thymallus*
- Esocidae
 - ščuka *Esox lucius*
- Cyprinidae
 - podust *Chondrostoma nasus*
 - klen *Leuciscus cephalus*
 - mrena *B. barbus*
 - linj *T. tinca*
 - rdečeoka *R. rutilus*
 - krap *Cyprinus carpio*

Prevladujejo predstavniki ciprinidov in sicer so bila leta 1982/83 ugotovljena naslednja razmerja rib (5):

klen 62%, rdečeoka 16,2%, podust 7.5 %, ščuka 12.9%, krap 0.4% in linj 0.4%.

Življenjski prostor teh rib je bil omejen že pred izgradnjo HE Mavčiče. Na spodnjem delu je ribam onemogočal prehod jez za HE Medvode, na zgornjem delu pa Majdičev jez v Kranju.

Načrtovana HE Mavčiče pa naj bi prekinila selitev rib na drst v pritoke. Zaradi zaježitve naj bi se zmanjšala ali celo propadla drstišča v sami Savi, ribe ne bi imele možnosti za prehajanje na drstišča in nazaj na pasišča, poleg tega pa bi bila pasišča zalita z vodo in za ribe neuporabna zaradi visokih vodostajev.

Najprej je bila načrtovana izgradnja ribje steze. Po skrbnem premisleku in razgovorih med gradbeniki in ribiči pa ta rešitev ni bila sprejeta. Sama izgradnja bi bila zelo draga, poleg tega pa bi ribja steza s časoma izgubila svoj namen ker je bila predvidena na neustreznem mestu. Mavčiško jezero pa naj bi zalilo večja drstišča in nujno je bilo poiskati nadomestila. Predeli v Zbiljskem jezeru so bilo premajhni, da bi zadovoljili potrebe vseh rib iz bodočih poplavljenih predelov (4). Rešitev problema se je pokazala v izgradnji umetnega drstišča in tako je bila opuščena ideja o izgradnji ribje steze.

Nekateri avtorji (Mundie) trdijo, da je preživetje iker in zaroda v takih drstiščih 2 do 9 krat večje kot v naravnih pogojih.

3. OPIS UMETNEGA DRSTIŠČA

Umetno drstišče v Mavčičah je prva taka konstrukcija v Sloveniji. Preden je bilo narejeno, je bilo treba proučiti vedenje rib, hitrost in način plavanja, število rib na drstiščih, potrebna velikost drstišča in katere vrste rib naj bi se na njem drstile.

Za uspešno obratovanje drstišča je zelo pomembna njegova struktura in sicer oblika kanala, vhod vanj itd. Vhod predstavlja kratka ribja steza. Vodni tok privlači ribe v drstišče. Določen pretok oziroma hitrost pretoka je bila dosežena tudi z izgradnjo prečnih ovir in pragov v kanalu (1).

Zelo pomemben dejavnik pri umetnem drstišču je ustrezen pretok vode oziroma hitrost pretoka. Po tehtnem premisleku in številnih meritvah in izračunih je bil določen pretok 500 l/s.

Na dotoku vode v drstišče je instalirana manjša hidroelektrarna tako da je v celoti izkoriščena kapaciteta vode. Dotok vode v HE je pod nivojem jezerske gladine. Letna proizvodnja je 350.000 kWh električne energije.

Umetno drstišče (slika 2) je 140 m dolg in 3.5 m širok odkrit kanal z naklonom 0.001, v katerem je 500 m² drstne površine. Globina kanala je najmanj 30 cm. Po dnu kanala je prod take granulacije kot je bila ugotovljena na podobnih drstiščih. Predvideno je še zasenčenje kanala, da bi imele ribe med drstjo čim več miru.

Drst v kanalu poteka od začetka aprila do decembra (slika 3). Od srede aprila do srede junija se v njem drstijo podusti, klen se drsti od konca maja do sredine julija, lipan pa marca in aprila, medtem ko se drsti potočna postrv novembra in decembra.

Podusti in kleni se drstijo v jatah, postrv in lipan pa v parih. V preteklih letih je bila gostota podusti 60 kosov/m². Odložile so po nekaj cm debele plasti iker.

V času drsti mora biti nivo vode v umetnem drstišču konstanten, predvsem pa ne sme priti do zamuljenja iker zaradi dotoka vode iz zgornje akumulacije.

4. ZAKLJUČKI

Umetno drstišče v Mavčičah je zelo uspešno in rezultati celo presegajo pričakovanja. Vsekakor pa je premajhno za vse drstnice in strokovnjaki predlagajo izgradnjo dodatnih drstišč.

Poudariti je treba, da je bil v primeru izgradnje HE Mavčiče dosežen sporazum o tem, kaj je treba narediti za optimalno rešitev ribjega življa v tem delu Save. Strokovnjaki obeh strok, tako ribiške kot gradbene, so na koncu našli skupno in ustrezno rešitev v umetnem drstišču.

5. REFERENCE

1. Clay, C. H., 1961 : Design of Fish ways and Other Fish Facilities, Dept. of Fisheries of Canada, Ottawa.
2. Ward, J. V., Stanford, J. A., 1979 : The Ecology of Regulated Streams, Plenum Press, New York.
3. Breznik, M., 1988 : Influence of the Mavčiče Reservoir on the Environment, ICOLD, Q60, R46.
4. Povž, M., 1983, The Nase Carp is Endangered, Master of Sc. thesis, University of Ljubljana.
5. Budihna, N., 1982 : Ichthyological Investigations of Zbilje lake, Institute for Fisheries, Ljubljana.
6. Beach, M. H., 1984 : Fisheries Research Technical Report, No. 7/8, Lowestoft.
7. Baxter, R. M., Glaude, P., 1980 : Environment Effects of Dams and Impoundments in Canada, Dept. of Fisheries and Oceans, Ottawa.
8. Stojič, Z., 1993 : Decision-Making in Energy Concerning Environment, IBE Ljubljana.

OCENA VARNOSTI OBSTOJEČIH PREGRAD NA REKI DRAVI V SLOVENIJI

Branko ZADNIK dr.,dipl.ing.
vodja ERR IBE Ljubljana, Slovenija

POVZETEK

Reka Drava je edini vodotok v Sloveniji, ki je 100 % izkoriščen za proizvodnjo električne energije. Na njej je bila prva hidroelektrarna zgrajena že v letu 1918. Tako lahko na tem vodotoku spremljamo razvoj ocenjevanja varnosti pregradnih objektov že sedemdeset let. Ob pričetku obratovanja elektrarn na reki Dravi je bila skrb za varnost objektov omejena na obseg, ki so ga lahko zagotovili redni vzdrževalni postopki. Pridobivanje podatkov je temeljilo predvsem na vizualnem opazovanju. Skozi desetletja se je uvajalo permanentno opazovanje nekaterih, za varnost pregrad pomembnih parametrov, ki omogočajo zgodnje odkrivanje materialnih in/ali geometrijskih karakteristik pomembnih za stabilnost pregrad. Namen pričujočega prispevka je predstaviti trenutno situacijo na področju rekonstrukcije starih vodnih elektrarn na slovenskem delu reke Drave, ter v kratkem prikazati postopke ocenjevanja stanja varnosti obstoječih pregradnih objektov. Tako je v današnjem času v teku preizkus varnosti najstarejših objektov. Varnostna ocena je povzetek primerjav rezultatov originalnih projektnih in najnovejših numeričnih preizkusov stabilnosti. Postopek izdelave varnostne ocene vključuje tudi sodelovanje izkušenih inženirjev, ki so ali so bili vključeni v redna vzdrževalna dela na teh pregradah ali pa skrbijo za redno opazovanje objektov.

SUMMARY

The Drava River is the first and the only river in Slovenia which is 100 % exploited for the production of electrical energy. The first construction of the HPP dates back to 1918, so that is possible to observe the development of safety assessment procedures on several dams through the time period of 70 years. At the beginning of the operation of the HPP's on the Drava River, the care of safety was limited to the maintenance procedures were mostly based on the visual observation. Through the decades, permanent monitoring of some important parameters of the dam behaviour was introduced, enabling early detection of any changes of material and/or geometric properties which might effect the dam stability. At present a new safety evaluation of the oldest existing dams is being in process. It will be a result of the comparison between the original and the new numerical stability calculations of the dams combined with the judgment of experienced engineers who have been involved in the regular maintenance works on these dams in the past and the experts who keep mind of regular monitoring of the dams.

1.0 UVOD

Javno mnenje v Sloveniji je v današnjem času zelo nenaklonjeno gradnji pregradnih objektov. Takšno razpoloženje med ljudmi temelji predvsem na "zelenem" pogledu na svet in dejstvu, da Slovenija trenutno razpolaga z zadostnimi količinami električne energije. Stanje navideznega energetskega preobilja je posledica izgube trga v Balkanskem prostoru in s tem tudi zmanjšanja industrijske proizvodnje v času po letu 1991. Dolgoročno gledano gre v bistvu za prehodni pojav. Slovenska industrija uspešno zaključuje fazo preusmerjanja proizvodnje za svetovno

tržišče in v zadnjih letih uspešno napreduje v novih razmerah. Pričakujemo, da se bo kot rezultat tega tudi javno mnenje o izkoriščanju vodnega potenciala slovenskih rek spremenilo na bolje, še posebej glede na dejstvo, da povzročča izkoriščanje premoga za pridobivanje električne energije veliko večjo obremenitev prostora.

Hidropotencial je, dolgoročno gledano za Slovenijo, zelo pomemben energetski vir in se ga zaradi tega v strokovnih krogih tudi obravnava z veliko pozornostjo. Kljub navedenim splošnim problemom, med katerimi pa niso zanemarljivi problemi finančne narave, se izvajajo določeni projekti obnove, povečanja instalirane moči in proizvodnje obstoječih vodnih elektrarn.

Namen pričujočega prispevka je predstaviti trenutno situacijo na področju rekonstrukcije starih vodnih elektrarn na slovenskem delu reke Drave, ter v kratkem prikazati procedure ocenjevanja stanja varnosti obstoječih pregradnih objektov.

Na tej reki je bilo v časovnem obdobju od leta 1918 do leta 1950 zgrajenih pet elektrarn. Kljub rednim vzdrževalnim delom na objektih se je po desetletjih uspešnega obratovanja pokazala potreba po generalnem remontu in obnovi. Predvsem je potrebno modernizirati vso strojno in elektro opremo v skladu z zahtevami in možnostmi moderne tehnike. Gradbene konstrukcije so v relativno dobrem stanju in zahtevajo več ali manj le vzdrževalna dela.

2.0 VERIGA VODNIH ELEKTRARN NA REKI DRAVA

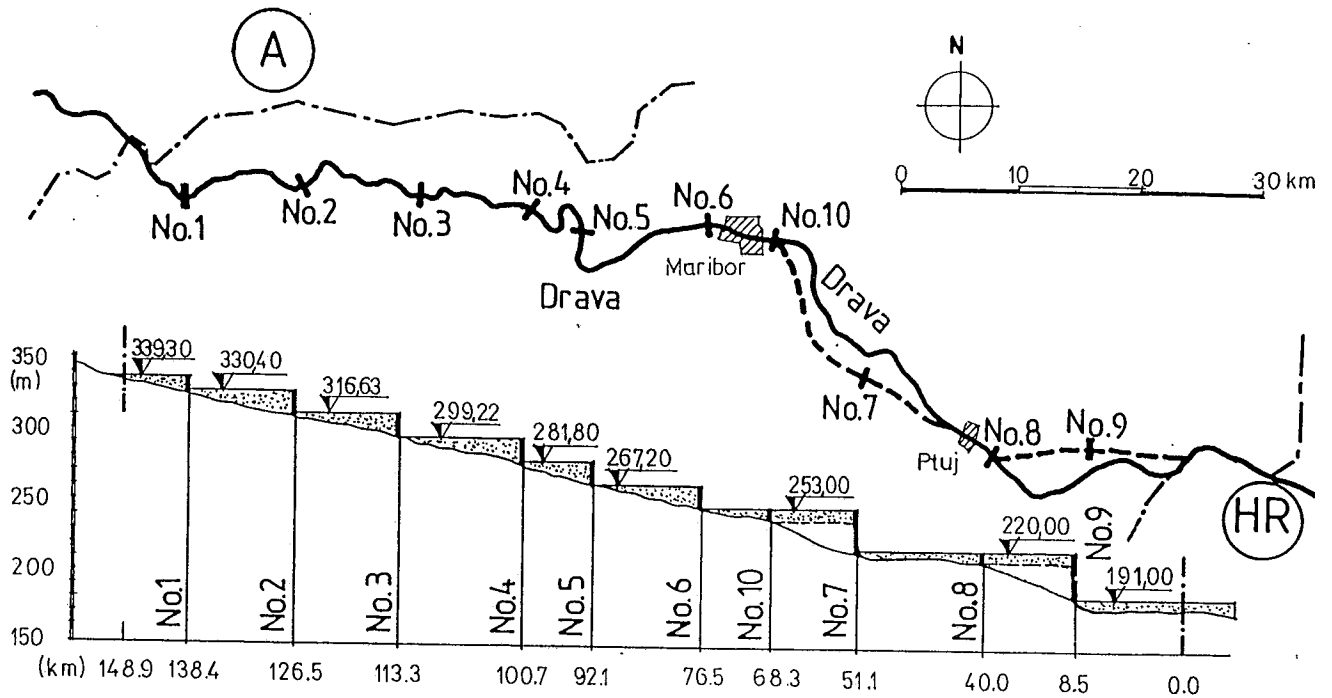
Na slovenskem delu reke Drava (slika 1), to je od mesta Dravograd do hrvaške meje, je bilo v času od 1918 do 1977 zgrajeno osem vodnih elektrarn (Tabela I.). Pet elektrarn v zgornjem delu reke (No.1 do 4 in No.6) je tako imenovanega "turbinsko stebernega tipa", ki je bil v času snovanja uporabljen predvsem zaradi oblike rečnega korita in nižjih investicijskih stroškov.

Tabela I. HE na reki Dravi

No.	Pregrada (elektrarna)	reka	višina (m)	tip	leto izgradnje	moč Pi(MW)
1	DRAVOGRAD	Drava	20.50	G	1942	21.00
2	VUZENICA	Drava	28.80	G	1952	45.00
3	VUHRED	Drava	31.60	G	1956	60.00
4	OŽBALT	Drava	32.60	G	1960	60.00
5	FALA	Drava	31.90	G	1918	58.80
6	MARIBORSKI OTOK	Drava	31.40	G	1948	51.00
7	ZLATOLIČJE	Drava	53.50	G/E	1968	133.00
8	JEZ MARKOVCI	Drava	19.50	G/E	1977	-
9	FORMIN	Drava	49.00	G/E	1977	112.00
10	JEZ MELJE	Drava	17.50	G/E	1968	-

OPOMBA:

G - betonska težnostna pregrada
G/E - nasuta pregrada



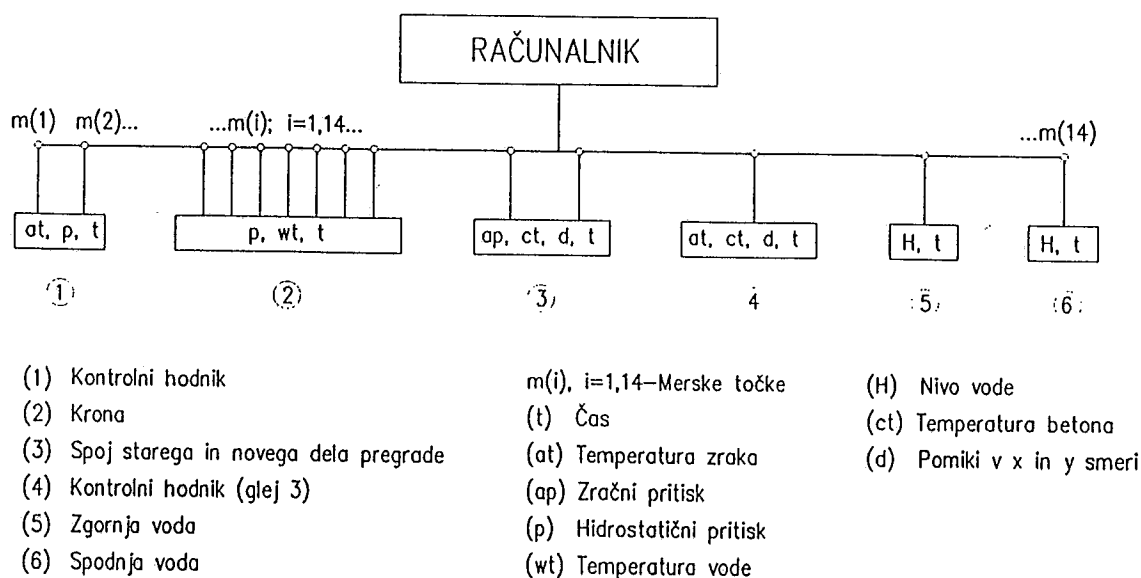
Slika 1. Veriga elektrarn na reki Dravi - shema

Med navedenimi je tudi najstarejša vodna elektrarna v Sloveniji - HE Fala (No.5). Pričetek njene izgradnje sega v leto 1913, zaključek izgradnje pa v leto 1918, ko je bila gradnja zaključena šest mesecev pred koncem I. svetovne vojne. V tistem času je sodila med največje objekte svojega tipa. Zasnovana je bila kot pretočna elektrarna s pregradnim objektom zgrajenim v rečnem koritu in strojnico na levem obrežnem delu. Pregrada je imela po osnovnem projektu pet pretočnih polj, vsako široko 15m in skupno pretočno kapaciteto 5600 m³/s. Na desnem bregu je bila zgrajena tudi splavarnica z dvema komorama dimenzij 34 x 7 m. Pregrada je temeljena na gnajskih prekritih z aluvialnimi naplavinami v debelinah do 15m. Za izvedbo temeljenja je bila uporabljena kesonska tehnika izvedbe temeljenja na globini čvrste podlage. Elektrarni No. 7 in No. 9 sta zgrajeni v spodnjem delu reke kot kanalski elektrarni.

3.0 OPAZOVANJE PREGRAD

Tehnično opazovanje velikih pregrad je bilo v Sloveniji, kot delu bivše Jugoslavije, urejeno na osnovi zakonodaje (lit.2), ki je predpisovala vizualno in instrumentalno opazovanje, merjenje in raziskave vseh fizikalnih lastnosti, ki so potrebne za analizo varnosti pregradnega telesa. Pred letom 1966 je tehnična kontrola pregrad vključevala predvsem vizualno kontrolo konstrukcij, ki jo je izvajal lastnik pregrade. Izvajala so se geodetska opazovanja pregrad in merjenja vzgonskih tlakov v kontrolnih hodnikih (lit.1). Po letu 1966 so večino slovenskih

pregrad sistematično opremili s sistemi, ki so zbirali informacije o pomikih, nivoju akumulacije, vzgonskih pritiskih, precejnih vodah v temeljnih tleh, temperaturi vode in spremembah lastnosti materialov gradbenih konstrukcij. V zadnjih letih poteka modernizacija sistema monitoringa v smislu avtomatizacije zajema podatkov in njihovega prenosa do centralnega računalnika v pisarni (Slika 2). Takšen sistem je bil kot prvi postavljen na lokaciji HE Fala, medtem ko je na drugih lokacijah modernizacija še v teku.



Slika 2. Sistem opazovanja HE Fala - shema

4.0 OCENA VARNOSTI PREGRAD NA REKI DRAVI

Ocenjevanje varnosti obstoječih pregrad je tesno povezano z opazovanjem in poznavanjem dejanskega stanja konstrukcije, njene bližnje okolice ter možnostjo vpliva na zaščito uporabljenih gradbenih materialov in posameznih konstrukcijskih elementov. Napredek znanosti in tehnologije nam danes omogoča pridobivanje podatkov potrebnih za oceno varnosti, ki jih še pred nekaj leti ni bilo možno dobiti. V preteklosti je bila skrb za varnost pregrad prepuščena več ali manj intuitivnemu odločanju ob upoštevanju praktičnih izkušenj inženirjev, ki so bili vključeni v izgradnjo objekta, in analizi relativno majhne količine podatkov pridobljenih z merjenji obnašanja konstrukcije. Vse aktivnosti na tem področju so se navezovale na redna vzdrževalna dela. Po letu 1966 (lit.2) so bili lastniki pregrad v bivši SFRJ zakonsko obvezani vzpostaviti sistematično in organizirano opazovanje obnašanja pregrad, kar je tudi doprineslo k možnosti za kvalitetnejšo varnostno oceno.

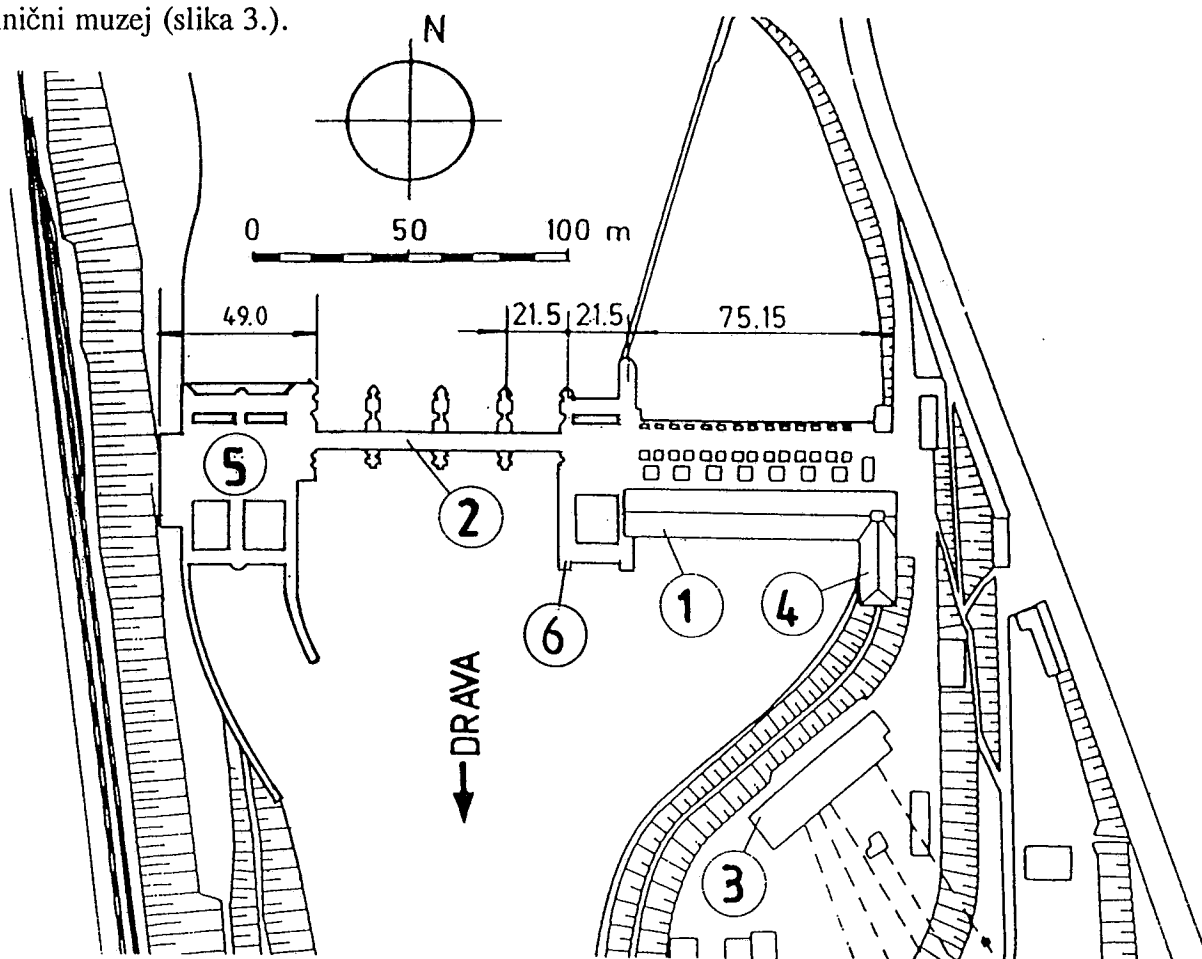
Pri klasičnih vzdrževalnih delih je bila varnost pregrade oziroma nevarnost pojava poškodb na pregradi ocenjena na osnovi vizualnih opazovanj. Popravila, oziroma vzdrževalna dela so se

pričela v trenutku, ko je bila poškodba opazna že s prostim očesom. Aktivnosti pričete v takšnem času pa zahtevajo že relativno visoke stroške, kar je tudi eden od razlogov za uvedbo permanentnega opazovanja, ki omogoča zgodnjo detekcijo sprememb materialnih in/ali geometrijskih lastnosti pregrade, ki bi lahko ogrozile njeno stabilnost. Pri zadosti zgodnjem odkritju nenormalnega obnašanja pregrade ali obtežb nanjo, so kakršnikoli nujni konstrukcijski posegi sigurno cenejši. Kako se lahko situacija na varnostnem področju spreminja s časom, lahko opazujemo na naši najstarejši pregradi HE Fala.

HE Fala je bila zgrajena v pionirskih dneh izgradnje hidroelektrarn. Kot že omenjeno, je pričela izgradnja v letu 1913, zasnova in projektiranje pa nekaj let pred tem. Sklepamo lahko, da v tistih časih še niso bile poznane nevarnosti precejanja vode v temeljnih tleh ter inženirski ukrepi, s katerimi bi lahko le-te kontrolirali (lit.4). Verjetno tudi nihče ni poznal nevarnosti razvoja tega fenomena v dolgi življenski dobi objekta. Pri tem objektu se je zopet pokazalo dejstvo, da ima narava čas ter, da lahko deluje na človekove stvaritve praktično trenutno (potres) ali pa v primerjavi s človeškim življenjem, daljšem časovnem obdobju, vendar tudi destruktivno. Temeljenje objekta HE Fala je bilo konstrukcijsko solidno izvedeno, vendar pa je prišlo, kot se je kasneje ugotovilo, ravno zaradi pronicanja vode pod konstrukcijo temeljev, do izpiranja finih frakcij materiala temeljnih tal, do tvorjenja kanalov in s časom do progresivnega naraščanja pretoka pod temelji, in do tvorjenja večjih kavern v kontaktu med temelji in temeljnimi tlemi. Kasneje je bilo tudi ugotovljeno pojavljanje poroznosti v samem betonu temeljev. Povečevanje pretoka pod temelji je seveda ogrozilo stabilnostne razmere pregrade. Namesto tesnega stika med temelji in temeljnimi tlemi se je kontakt ohranil le še v posameznih večjih ali manjših površinah. Poleg polnega vzgona so se pojavili že tudi diferencialni posedki na sami pregradni konstrukciji v predelu strojnične zgradbe. Po 47 letih delovanja, to je do leta 1965, se je kontakt med temeljem in tlemi tako poslabšal, da je bilo potrebno pristopiti k nujnim sanacijskim posegom, s katerimi se je povečala stabilnost pregrade in zagotovilo nadaljnje obratovanje HE. Sanacija je uspela po predhodni izgradnji vodotesne zavese na gorvodni strani strojničnega dela objekta. Kasneje se je postopoma sanirala celotna temeljna kontaktna ploskev z injiciranjem in/ali uporabo prepakt betona za zapolnitev kavern in kanalov, ki jih je izdolbla voda. Vsa ta dela so bila izvedena ob minimalnem vplivu na siceršnjo proizvodnjo električne energije. Največji problemi so se pojavili pri vzpostavljanju pogojev za iniciranje in betoniranje. Pregrada je bila praktično pod polnim vzgonskim pritiskom in zaradi tega na meji stabilnosti. Tako je bilo nujno potrebno najprej reducirati vzgonske pritiske ter zmanjšati velikost pretoka precejnih voda v področju, ki je bilo trenutno v obdelavi. Situacija je narekovala tudi velikost področij, ki so se lahko injicirala in uporabo specialnih injekcijskih in polnilnih materialov.

Po zaključku del na sanaciji kontaktne ploskve, sredi šestdesetih let, je bilo vpeljeno sistematično opazovanje razpok, dilatacijskih stikov, vodopropustnosti in vzgonskih pritiskov. Redno opazovanje, ki poteka neprekinjeno do današnjih dni, kaže, da so bili takratni sanacijski posegi uspešni.

Uspešno zaključena sanacija je omogočila normalno delovanje hidroelektrarne do danes. Z zagotovitvijo zadostne stabilnosti knstrukcije pregradnega objekta, so bili podani tudi osnovni pogoji za generalno rekonstrukcijo 73 let starega objekta, ki je bila izvedena v letu 1991. V tej fazi obnove je bila posvečena posebna pozornost zamenjavi tehnološko že zastarele strojne opreme HE. Sedem Francisovih turbin s horizontalnimi osmi je bilo nadomeščenih s tremi novimi Kaplanovimi turbinami. Na novih lokacijah sta bili zgrajeni dve novi strojnici z vgrajenima dvema oziroma eno turbino. Stara strojnica pa je ohranjena in spremenjena v tehnični muzej (slika 3.).

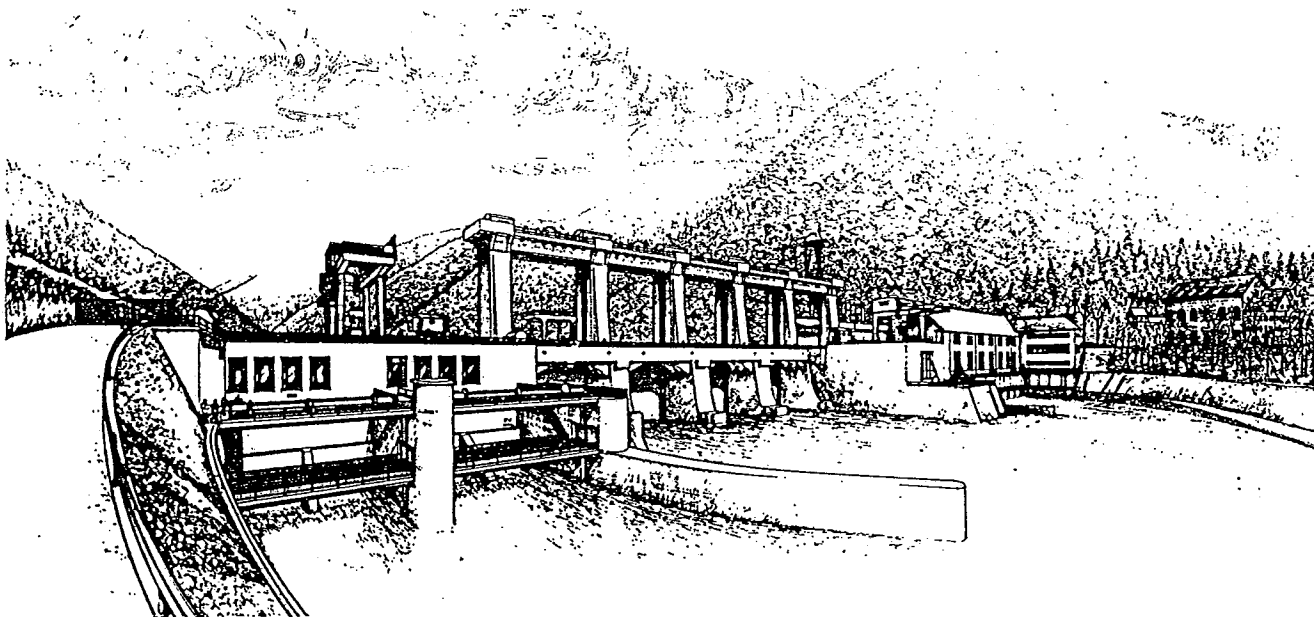


- (1) stara strojnica (tehnični muzej)
- (2) pretočna polja
- (3) stikališče

- (4) uprava
- (5&6) novi strojnici

Slika 3. HE Fala - situacija po rekonstrukciji leta 1991

V sklopu zadnjih rekonstrukcijskih del je bil obnovljen tudi sistem opazovanja pregrade ter izpopolnjen in opremljen z elektronsko opremo (slika 2.). Sistem omogoča avtomatsko čitanje in permanentno beleženje sprememb parametrov, ki se opazujejo na štirinajstih kontrolnih mestih (lit.5). Z računalnikom, ki je lociran v kontrolni sobi, se bere in beleži piezometriške pritiske in temperaturo vode v sedmih opazovalnih točkah, ki so locirane v vrtinah na kroni pregrade. Na dveh mernih mestih lociranih na stiku med novo in staro pregrado se spremlja longitudinalno in transferzalno delovanje stika, temperaturo betona in zračni pritisk. V dveh mernih točkah se spremlja tudi nivo vode v zgornji in spodnji akumulaciji. Temperatura zraka in hidrostatični pritisk sta avtomatsko merjena na dveh mestih v kontrolnem hodniku. Vse meritve in odčitavanja se vršijo vsako uro in se avtomatsko shranjujejo v računalniku za potrebe kasnejših analiz.



Slika 4. HE Fala po rekonstrukciji

5.0 BODOČE AKTIVNOSTI IN ZAKLJUČKI

V bližnji prihodnosti se bo z zamenjavo zastarele in dotrajane strojne opreme podaljšala operativna življenska doba nadaljnjih treh elektrarn na reki Drava (Dravograd No. 1, Vuzenica No. 2 in Mariborski otok No. 6). S tem posegom se bo povečala njihova kapaciteta in proizvodnja za cca 10%. Današnja ocena je, da so objekti s stališča gradbene stroke v relativno dobrem stanju in da bo potrebno izvršiti le normalna redna vzdrževalna dela. Izkušnje pridobljene na predhodnih delih (glej poglavje 4.0), kažejo, da bo potrebno posebno pozornost posvetiti stabilnosti, ob upoštevanju najnovejših podatkov o stanju konstrukcij in materialov. Razpolagamo z informacijami zbranimi na osnovi sistematičnega opazovanja, ki se

je vršilo na vseh dravskih objektih od leta 1966 naprej. Ponovili bomo statične analize ob upoštevanju najnovejših podatkov. Poleg tega pa se bo izvedlo dinamične analize, ki v času projektiranja pregrad niso bile izvršene za nobeno od lokacij. Ocena varnosti na potresno obtežbo bo izvedena ob upoštevanju najnovejših procedur (lit.6) in spoznanj o obnašanju torne odpornosti kontakta med pregrado in temeljnimi tlemi ob nastopu močnega potresa.

Tako bo ponovna ocena varnosti pregradnih objektov narejena po približno petdesetih letih obratovanja elektrarn. Temeljila bo na primerjavi originalnih, projektnih analiz in prognoz ter rezultatih novih teoretičnih dognanj kombiniranih z ocenami izkušenih inženirjev, ki so bili vključeni v redna vzdrževalna dela tovrstnih objektov v preteklosti in ekspertov, ki skrbijo za redno opazovanje pregrad.

6.0 LITERATURA

1. J. Boštjančič, V. Koprivec, V. Koren: "Monitoring Methods for Large Dams in SR Slovenia, Part I., II., III", Discussions, Selection of Publications ZRMK 1973-1980, Ljubljana, 1980, pp. 270-280.
2. "Book of Regulations for Technical Monitoring of Large Dams", Official Gazette of the SFRJ, February 16, 1966, No.7, Year XXII.
3. "Dams in Yugoslavia", Yugoslav Committee on Large Dams, Dubrovnik, 1971.
4. V. Koren: "Rehabilitation of the Foundations of the Fala HPP Powerhouse", Information No. 121, ZRMK, Ljubljana, March 1971.
5. B. Belingar, A. Križnar: "Description of the Monitoring System for the Dam Structure of the Fala HPP - Instruction Manual", ZRMK Ljubljana & DMS Golnik, 1991.
6. B. Zadnik, T. Paskalov: " Dam Stability and Time-Dependent Coefficient of Friction", Tenth World Conference on Earthquake Engineering (10WCEE), Proceedings, Vol.8, July 1992, Madrid, Spain, pp.4633-4638.

SAMODEJNI DVIG ZAPORNICE NA PREGRADI MAVČIČE

prof. dr. Rudi Rajar dig.
Univerza v Ljubljani

mag. Andrej Kryžanowski dig.
Savske elektrarne Ljubljana

POVZETEK Pregrada Mavčiče leži na reki Savi v osrednji Sloveniji. S pregraditvijo je ustvarjen akumulacijski prostor, volumna 10 hm^3 ter hidropotencial v višini 17 m, ki je namenjen proizvodnji električne energije. Dolvodno od nje se nahaja akumulacijski bazen dolvodnoležeče pregrade Medvode (dolžina bazena znaša 5,5 km, padec na turbinah pa 21,2 m).

Dne 7. mar. 1993 je samodejni dvig segmentne zapornice na pregradi Mavčiče povzročil visokovodni val z maksimalnim pretokom $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$. Dokazano je bilo, da je samodejni dvig zapornice posledica aktiviranja releja, ki je bil predviden za računalniško daljinsko vodenje zapornic, ki pa ni bilo v celoti realizirano. Zaradi kondenzirane vlage je bil sklenjen tokokrog na sponkah v kabelski ranžirni omarici, kar je povzročilo aktiviranje omenjenega releja. Za preprečitev ponovitve podobnih nesreč v prihodnosti so bili izvedeni ustrezni ukrepi zavarovanja.

Na pregradi Medvode, ki se nahaja 5,5 km dolvodno, so pričeli z režimom dviga zapornic takoj, ko je bilo zapaženo dviganje gladine v jezeru. S tem je bila preprečena škoda na pregradi; visokovodni val je bil prenešen dolvodno praktično v nespremenjeni obliki.

Za določitev točnega poteka vala je bil uporabljen enodimenzijski matematični model. Računan maksimalni pretok $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ je bil v rangu petdesetletnih visokih voda. Z oddaljenostjo se je maksimalni pretok zmanjševal; 35 km dolvodno je znašal samo še $270 \text{ m}^3/\text{s}$. Hitrost propagacije vala v akumulaciji HE Medvode je znašala 25 km/h , ter dolvodno od nje v rangu velikosti 10 km/s .

Objekti ob obrežju niso utrpeli nobene omembe vredne škode. Prav tako ni bilo nevarnosti za prebivalstvo. Določeno škodo je zaradi naglega upada gladine vode utrpela ribja populacija dolvodno.

SUMMARY The Mavčiče Dam forms a reservoir of 10 hm^3 of volume on the Sava River in central Slovenia. Hydraulic head of 17 m is used for power production. Downstream on it, there is a 5,5 km long reservoir behind the Medvode Dam (21,2 m of hydraulic head).

On March 7th, 1993, a self-induced opening of one of the radial gates on the Mavčiče Dam spillway occurred, causing a flood wave with a maximum discharge of $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$. It was found out that automatic rise of the gates was activated by a relay which was foreseen for remote computer control of the gates, but has not yet been completely realised. Due to condensed moisture on the switch connectors, a closing circuit occurred on the terminals in the marshalling box and activated the mentioned relay. All possible measures were taken later to prevent repetition of such incidents.

At the Medvode Dam, 5,5 km downstream, the spillway gates were raised after detecting the rise of the water level above the dam. The damage on the dam and the HPP was prevented, the flood wave was transmitted downstream in nearly the same form.

A one-dimensional mathematical simulation was performed to determine exactly the development of the flood wave. The resulting maximum discharge of $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$ was in the range of 50-year high waters, but peak discharge was diminishing along the downstream propagation and was only $270 \text{ m}^3/\text{s}$ at the cross section 35 km downstream. The propagation velocity of the wave was 25 km/h in the Medvode reservoir and of the order of magnitude of 10 km/h downstream of it.

The damage on the structures was almost negligible. No lives were endangered. Some damage was caused to the fish population because of the fast decrease of the water level after the peak of the flood wave.

1.0 OPIS PREGRADE IN PRELIVNIH POLJ

HE Mavčiče leži na reki Savi v osrednji Sloveniji, 20 km vzhodno od glavnega mesta Ljubljane. Pregrada je betonsko-težnostna, višine 38 m in zadržuje v akumulaciji 10,7 hm³ vode. Situirana je v kanjonskem profilu, ki ga je reka Sava v preteklosti izdolbla v kvartarne sedimente (Breznik 1988).

Zaradi potreb elektro-energetskega sistema Slovenije je instalirana moč HE Mavčiče zelo visoka. Faktor instaliranosti znaša 3,9 in je najvišji od vseh hidroelektrarn v Sloveniji. Instalirani pretok na dveh agregatih (Kaplan) je 260 m³/s, srednji letni pretoku reke Save znaša 67 m³/s. Instalirana moč obeh agregatov je 38 MW. Elektrarna je pretočna, z možnostjo obratovanja v dnevnih konicah porabe električne energije. Od skupne letne proizvodnje električne energije 78,2 GWh, je okoli 80% delež variabilne energije, proizvedene v 12 urah dnevno.

Objekt je last podjetja za proizvodnjo električne energije SEL, ki poseduje vse visoke pregrade na reki Savi (tabela 1). HE Mavčiče predstavlja skupaj z nizvodno ležečo HE Medvode (slika 1) čelni akumulaciji za načrtovano verigo 18 hidroelektrarn na reki Savi (Zupan 1987).

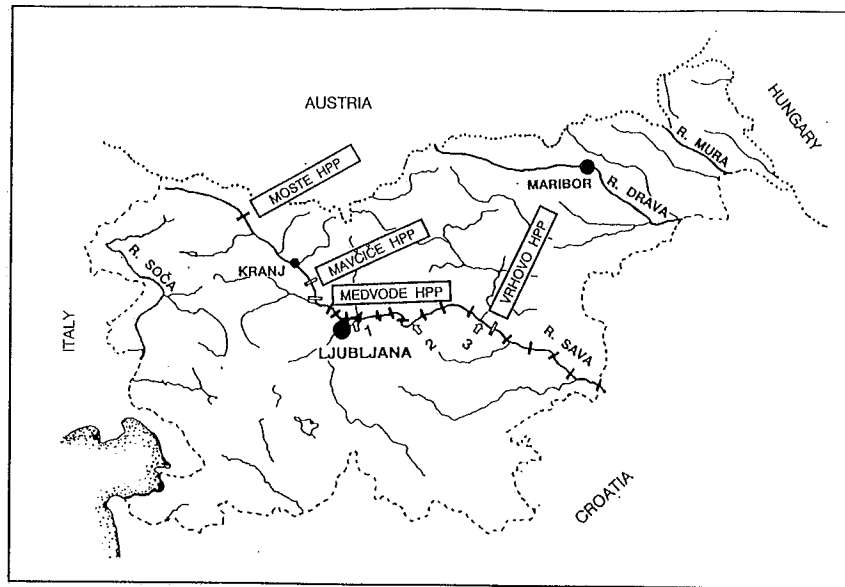
tabela 1:

ELEKTRARNE NA SAVI				
	HE MEDVODE	HE MAVČIČE	HE MOSTE	HE VRHOVO
starost	1953	1986	1952	v izgradnji
instaliran pretok (m ³ /s)	142	260	34,5	500
srednja voda (m ³ /s)	79,9	66,7	16,8	235
neto padec (m)	19,7	16,9	67,5	8,12
instalirana moč (MW)	18,2	38,0	24,0	34,2
letna proizvodnja (GWh)	83,0	78,2	64,0	138,0
Živi volumen (hm ³)	1,33	3,3	5,26	1,36
izravnava	dnevna	dnevna	tedenska	dnevna

V profilu pregrade sta situirani dve pretočni polji (slika 2). Prevodnost enega pretočnega polja znaša 1670 m³/s, kar je vrednost stoletne visoke vode. Pretočni polji sta opremljeni s segmentnima zapornicama z nasajeno zaklopko. Segment je svetle širine 13,5 m, višine 20 m, z radijem zaježitvene stene 15 m. Zaklopka ima zaježitveno višino 3,3 m.

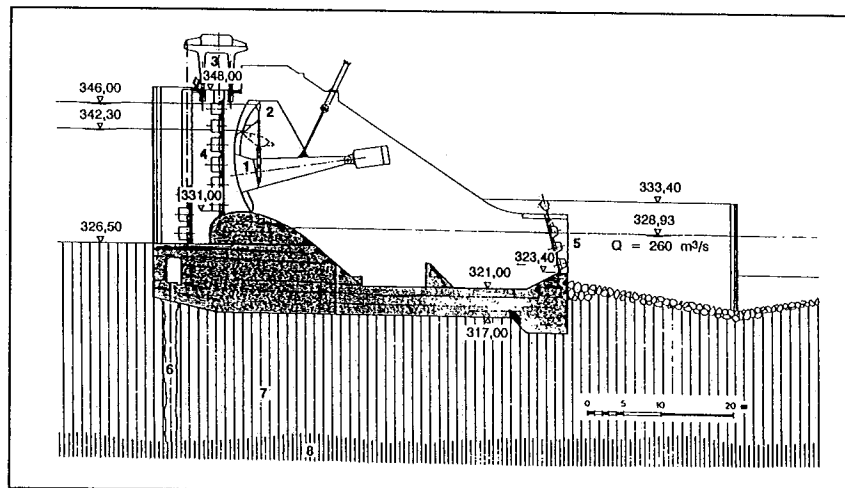
Na osnovnem nivoju je krmiljenje zapornic možno neposredno iz pogonske omare, ki se nahaja v osrednjem stebru prelivnih polj ali pa daljinsko upravljanje iz strojnice preko stikal z ročnim upravljanjem. Najvišja dovoljena absolutna koto nivoja vode v akumulaciji znaša 346,0 m.n.m. (toleranca + 0,1 m). Stalno koto zaježitve uravnava osrednja procesna enota z optimalnim uravnavanjem pretoka skozi turbine z režimom upravljanja zapornic. V kolikor, zaradi napake v sistemu vodenja, gladina vode preseže koto 346,0 m.n.m. se vključi avtomatika zapornic, ki prevzame režim odpiranja zapornic in prekine računalniško vodenje. Ko gladina zopet doseže normalno obratovalno koto, se vključi avtomatika zapornic in nadzor zopet prevzame procesna enota. Normalna denivelacija gladine znaša 1,7 m (na koto 344,7 m.n.m.), izjemna denivelacija pa 3,3 m (na koto 342,7 m.n.m.).

slika 1.: Situacija HE na Savi



- obstoječe HE
 ■ načrtovane HE
 vodomerske postaje (1. Šentjakob; 2. Litija; 3. Radeče)

slika 2.: Prečni prerez čez prelivno polje - HE Mavčiče



1. segmentne zapornice; 2. zaklopka; 3. žerjav; 4.,5. pomožne zapornice;
 6. tesnilna zavesa; 7. konglomerat; 8. nepropustna podlaga.

Zajezitev vpliva na nivo gladin na območju industrijske cone mesta Kranj, ki leži neposredno ob Savi. Objekti, na katere vpliva visoka voda, so bili sanirani. Zato obratuje lahko elektrarna tudi pri pojavu visokih voda z zadrževanjem nivoja gladine v jezovnem profilu na koti 346,0 m.n.m. (Breznik 1988).

Elektrarna je po projektu predvidena za daljinsko vodenje iz območnega centra v HE Medvode, kar pa zaradi visokih stroškov financiranja projekta ni bilo nikoli v celoti izvedeno. V lokalni sistem vodenja je že vgrajena vsa potrebna oprema, ki omogoča takojšno povezavo s sistemom daljinskega vodenja elektrarne.

Trenutno obratuje elektrarna na nivoju lokalnih avtomatov s stalno posadko. Urejen je začasni komandni prostor v pomožnih prostorih strojnice, ki pa ne omogoča direktnega vizuelnega pregleda nad pretočnimi polji. Vse informacije (položaj segmentov in zaklopk, nivoji gladin v jezeru, dotok v akumulacijo, obratovalno stanje pretočnih polj), ki so na voljo operaterju se po obratovalnem protokolu izpisujejo na terminal in na tiskalnik osrednje procesne enote ter preko svetlobne in akustične signalizacije na glavno komandno omaro. Dežurni operater je v stalni, direktni zvezi preko VF mreže z dispečerjem v območnem centru vodenja in z dežurnim operaterjem v HE Medvode. Na voljo so tudi direktno telekomunikacijske poštno linije.

Operater je dolžan vsako uro izdelati popis in kontrolo vseh merilnih naprav s strojnici in narediti kontrolni obhod po objektu. V kolikor se pojavijo nenormalni dogodki mora slednje nemudoma javiti dežurnemu operaterju v HE Medvode, ki nato obvesti Center za obveščanje in alarmiranje v Ljubljani in odgovorne delavce v podjetju.

Kadar obratuje HE Mavčiče z nizvodno ležečo HE Medvode v verigi je potrebno, predvsem zaradi neizenačenosti in zastarelosti hidromehanske in strojne opreme na HE Medvode (142 m³/s), predpraznjenje bazena HE Medvode pred pričetkom vršnega obratovanja HE Mavčiče. Prelivni polji sta opremljeni z dvema tablastima zapornicama kljukaste izvedbe, svetle širine 15 m in višine 14,3 m. Hitrost dviganja zapornic znaša 0,15 m/min (slika 3).

Izgradnja HE Mavčiče je prekinila vse migracijske poti rib pri drstitvi. Po tehtnem premisleku, z upoštevanjem vseh tehničnih možnosti, je bilo namesto ribje steze dolvodno ob pregradi izgrajeno ribje drstišče (Stojič in Povž 1994).

2.0. POTEK DOGAJANJA

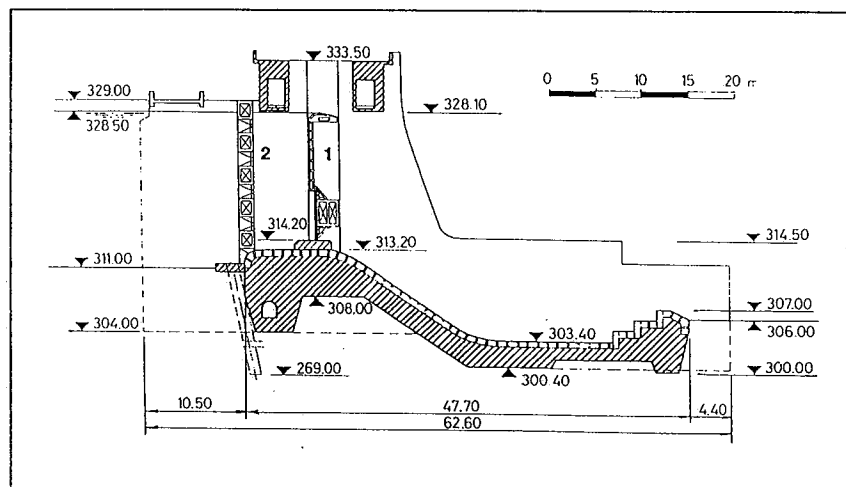
Dne 7. marca 1993 je prišlo ob 11³⁰ do samodejnega dviga segmentne zapornice drugega pretočnega polja na HE Mavčiče. Po obratovalnem protokolu je bila začetna gladina v akumulaciji na koti 344,9 m.n.m.. Elektrarna je obratovala pretočno z eno turbino, s pretokom 46 m³/s.

Vzrok za dvig zapornice je bil v tem, da je prišlo do samodejne vklopitve črpalnega agregata in preklopa hidravličnega ventila za dvigovanje segmentne zapornice na avtomatiki zapornic. Avtomatika za nadzor krmiljenja zapornic je preko terminala sprožila optično-akustični alarm in javila napako na krmiljenju pretočnih polj, kar je tudi izpisano v obratovalnem protokolu. Dežurni operater je preveril stanje zapornih elementov na glavni komandni omari, kjer je kazalo normalno, nespremenjeno stanje. Nato je preveril stanje na pretočnih poljih.

V tem času se je zapornica začela dvigati iz spodnje lege navzgor s hitrostjo 0,33 m/min in dosegla krajno lego ob 12⁰⁰ uri, ko je končno stikalo ustavilo dviganje. Gladina vode je upadla na koto 343,55 m.n.m., pretok čez pretočno polje je znašal okoli 1.200 m³/s.

Od 11⁴⁵ do 11⁵⁰ ure je dežurni operater v HE Medvode opazil naglo višanje nivoja gladine. Zaščetna gladina v jezeru je bila na koti 327,8 m.n.m. (-0,7 m), ki pa je kmalu narasla preko normalnega nivoja zaježitve 328,5 m.n.m. Ker je že grozilo zalitje strojnice, je operater povečal pretok skozi agregate do popolnega odprtja (142 m³/s) in pričel z režimom dvigovanja zapornic na prelivnih poljih ter s tem zagotovil maksimalno evakuacijo vode iz bazena HE Medvode. O dogodku je obvestil vodjo obratovanja in alarmiral Center obveščanja v Ljubljani o pričakovanem visokovodnem valu.

slika 3.: Prerez čez prelivno polje HE Medvode



Operater na HE Mavčiče je skušal v temu času v pogonski omarici ročno, preko stikala zaustaviti dvigovanje zapornice; kar mu pa ni uspelo. Zato je obvestil HE Medvode o dogodku in poklical pomoč. Ob 12¹² uri je ob asistenci vodje obratovanja uspelo z ročnim upravljanjem aktivirati spuščanje zapornice v prvotno lego. Zaradi varnosti je bila zaustavljena turbina. Ob 12⁵⁰ uri je zapornica dosegla spodnjo lego, nivo gladine v akumulaciji je bil ustaljen na 342,8 m.n.m.. Alarm o stanju pripravljenosti je bil preklican.

Iz bazena je v poldrugi uri odteklo okoli 3,2 hm³ vode, kar je praktično celotna razpoložljiva količina vode v akumulaciji. V času polnega odprtja pretočnega polja ob 12⁰⁰ uri je bil pretok 1.192 m³/s (slika 4), ki je enak visoki vodi s povratno dobo 50 let. Za primerjavo: najvišja merjena visoka voda iz leta 1992 je na pregradnem profilu znašala 1.030 m³/s.

3.0 SANACIJSKI UKREPI

V širšem vplivnem območju nizvodno od pregrade je zaradi poplavnega vala prišlo do omejene erozije utrjenega obrežja, kar je že v celoti sanirano. Nizvodno od HE Mavčiče poteka struga v kanjonu, ki je neposeljen. Vsi objekti infrastrukture in naselja so izven območja visokovodnih

poplavnih valov. Na celotni trasi bi lahko visokovodni val ogrozil samo športni objekt ob akumulacijskem jezeru HE Medvode, ki pa ni utrpel nobene, omembe vredne škode. Zaradi hitrega ukrepanja operaterjev na HE Medvode je potekala evakuacija visokovodnega vala brez vsakega vpliva na nizvodno ležeče objekte.

Lokalno ribiško društvo je naslovilo na SEL zahtevo za plačilo odškodnine za škodo, ki jo naj bi utrpela ribja populacija zaradi upada vode v Mavčiškem jezeru in dviga vode v Zbiljskem jezeru. Glede na to, da je bil v tem času stalni naravni dotok v akumulacijo $46 \text{ m}^3/\text{s}$ ni razloga, da bi prišlo do večjega upada gladine. Mavčiško jezero se je formiralo v kanjonu in zato praktično ni plitvin, kjer bi lahko naplavilo ribe vsled hitre denivelacije gladine. Bolj verjetno je to na 15 km dolgem odseku dolvodno od HE Medvode, kjer obstajajo plitvine, kamor bi se lahko zatele ribe za čas trajanja visoke vode in ostale ujete na pitvini. Zahteva po odškodnini je še vedno v razpravi.

Takoj po dogodku je bila imenovana preiskovalna komisija z nalogo, raziskati vzroke samodejnega nekontroliranega dviga zapornice in predlagati ustrezne tehnične ukrepe za zagotovitev dodatne varnosti in zanesljivosti delovanja zapornih elementov. Posebej je bilo potrebno pripraviti elaborat, ki zajema simulacijo visokovodnega vala dne 7. mar. 1993 z matematičnim modeliranjem hidravličnih pogojev, ter ob tem izvesti analizo vplivov vala na infrastrukturo nizvodno od HE Mavčiče, z določitvijo stopnje ogroženosti v primerjavi z naravnimi pogoji nastopa visokih voda (Rajar 1993).

Mnenje preiskovalne komisije, ki je imela nalogo raziskati vzroke havarije je, da je samodejni dvig zapornice posledica aktiviranja releja, ki je predviden za računalniško odpiranje segmenta. Zaradi znižanja izolacijske vrednosti je prišlo do sklenitve tokokroga na sponkah v kabelski ranžirni omarici, kar je povzročilo aktiviranja omenjenega releja. Ker so bile ob tem premoščene v njegovem tokokrogu predvidene blokade, ni bilo mogoče več preprečiti njegovega delovanja na dviganje zapornic. Edini možni poseg je bilo ročno aktiviranje elektro-hidravličnega ventila, ki je omogočil spuščanje zapornice v prvotno lego.

Komisija je predlagala izvesti ustrezne tehnične ukrepe za zavarovanje elektroopreme v taki meri, da je fizično onemogočen pojav stanja, ki je pripeljal do opisane havarije. Elektrarna je predvidena za daljinsko vodenje iz centra v HE Medvode, kar pa ni bilo v celoti nikoli izvedeno. Sistem deluje na nivoju lokalnih avtomatov in s stalno posadko. V protokol dogodkov ni zajeta, za evakuacijske organe važna, položajna signalizacija. Tako, da informacija o napaki na krmilnem sistemu operaterju ne more služiti za zadovoljiv opis dejanskega stanja. Prav tako je zaradi nedodelanosti sistema daljinskega vodenja onemogočeno posredovanje alarma v center vodenja. Zato je potrebno ustrezno urediti protokol dogodkov glede na sedanje razmere, ko elektrarna obratuje s stalno posadko. V bližnji prihodnosti je potrebno dokončno izpeljati projekt daljinskega vodenja iz HE Medvode in dokončati naprave za vodenje elektrarne HE Mavčiče, ki je zdaj dobavljena le v nedelujočih segmentih in jih bo potrebno nadomestiti zaradi tehnične zastarelosti.

4.0 RAČUN IN ANALIZA VISOKOVODNEGA VALA

4.1 Matematični model

Visokovodni val, ki je nastal po praznitvi bazena je trajal manj kot uro in pol; tako ni bilo mogoče organizirati dodatnih meritev nivojev vode in pretokov dolvodno po reki. Na voljo so nam bili samo podatki iz avtomatičnih registratorjev na vodomernih postajah dolvodno (slika 6). Za določitev čim bolj točnega časovnega razvoja nivojev gladin in pretokov je bil izdelan matematični model

nestalnega toka, kot posledica dviga zapornice. Glede na zahteve inšpektorjev je bilo potrebno izvesti primerjavo in analizo dejanskih razmer s statističnimi.

Dolvodno od pregrade je bilo mogoče vodni tok - zaradi sorazmerno ozkega akumulacijskega bazena Medvode (slika 1) - obravnavati kot enodimenzijski. V računu smo uporabili enodimenzijski matematični model, ki bazira na osnovnih enačbah za nestacionarni tok v kanalih s prosto gladino (St. Venantove enačbe). Pri računu poplavnih valov se največkrat konvekcijske člene zanemari. V našem računu smo prav zaradi hitrega spreminjanja nivojev gladin upoštevali vse člene omenjenih enačb. Numerični račun je bil izdelan na podlagi sheme Lax-Wendroff, eksplicitne metode končnih razlik. Model je relativno enostaven in zato ne podajamo detajlnejšega opisa (gl. Rajar 1973).

Simulacija je bila izvedena za 5.525 m dolg rečni odsek med pregradama Mavčiče in Medvode (slika 1). Topografija rečne struge je bila zajeta s 24 rečnimi profili, na povprečni medsebojni razdalji 240 m. Manningov koeficient hrapavosti je bil določen po predhodnih študijah ter znaša $0,033 \text{ m}^{-1/3}/\text{s}$.

4.2 Začetni in robni pogoji

Na začetku dogodkov (ob 11³⁰) je bil pretok na HE Mavčiče $46 \text{ m}^3/\text{s}$, na HE Medvode pa $22 \text{ m}^3/\text{s}$. Oba pretoka sta bila majhna: v računu toka med pregradama smo kot začetni pogoj za nadaljni račun nestacionarnega toka privzeli stacionarni režim s pretokom $22 \text{ m}^3/\text{s}$, pri začetni koti gladine 327,8 m na dolvodni strani HE Mavčiče.

Levi robni pogoj je bilo povečanje pretoka $Q(t)$ na HE Mavčiče zaradi odpiranja zapornice v registriranem časovnem intervalu (slika 4a).

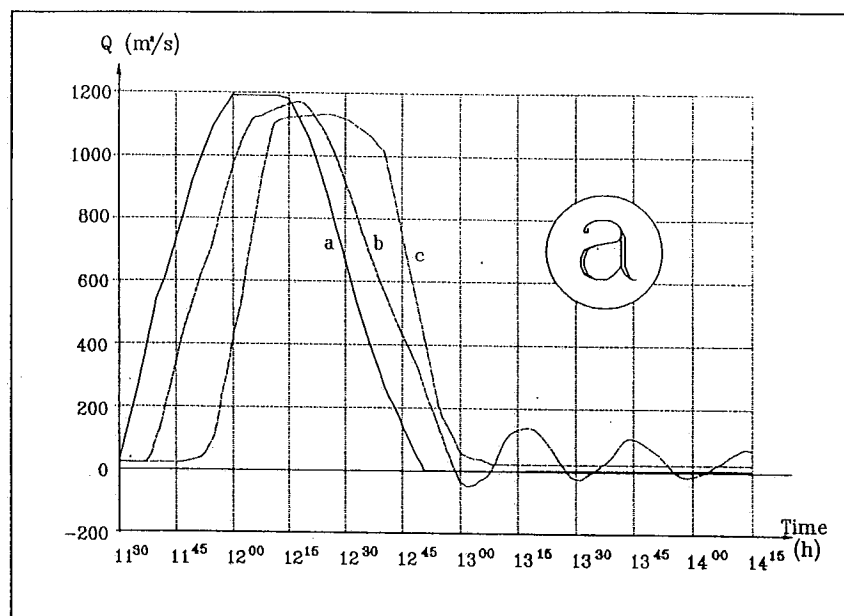
Za račun v zadnjem profilu na HE Medvode so bile možnosti za določitev desnega robnega pogoja z naslednjimi relacijami: časovni razvoj gladin $z(t)$, časovni razvoj pretokov $Q(t)$ ali razvoj pretokov glede na gladine $Q(z)$.

Takoj, ko je pričela gladina v jezeru naraščati so na HE Medvode začeli dvigovati obe zapornici. Časovni potek odpiranja zapornic ni bil natančno registriran. Nivo gladine v jezeru je bil merjen v časovnih presledkih (ni avtomatične registracije). Poleg tega je bil pri dvigu gladine $+0,44 \text{ m}$ nad običajno gladino zaradi zalitja za kratek čas blokiran merski nivojski sistem; v tem primeru so bili vprašljivi rezultati meritev. Iz navedenega je razvidno, da za določitev desnega robnega pogoja ni bilo na razpolago nobene od naštetih relacij, kar je bil največji problem pri nastavitvi modela. V poštev so prišli vsi razpoložljivi podatki iz meritev in opazovanj na podlagi katerih smo določili približne pogoje. Pri tem smo uporabili kombinacijo relacij $Q(t)$ in $Q(z)$.

Začetek dviga zapornic na HE Medvode je bil registriran ob 11⁴⁷. Nato je sledilo odpiranje zapornic z največjo možno hitrostjo dviganja ($15 \text{ cm}/\text{min}$) do krajne lege. Na ta način smo lahko za čas dviganja določili pozicijo zapornic. Iz konzumpcijske krivulje za iztoke izpod zapornic, pri različnih nivojskih višinah zapornic (definirana je na podlagi hidravličnega modela) smo določili relacijo časovnega razvoja pretokov $Q(t)$ za čas dviganja zapornic. Ob 12¹¹ sta bili zapornici v krajni legi in tako je bila določena tudi relacija $Q(z)$. Čas začetka spuščanja zapornic ni zabeležen in je bil določen na podlagi znanega časa popolnega zaprtja zapornic in hitrosti spuščanja.

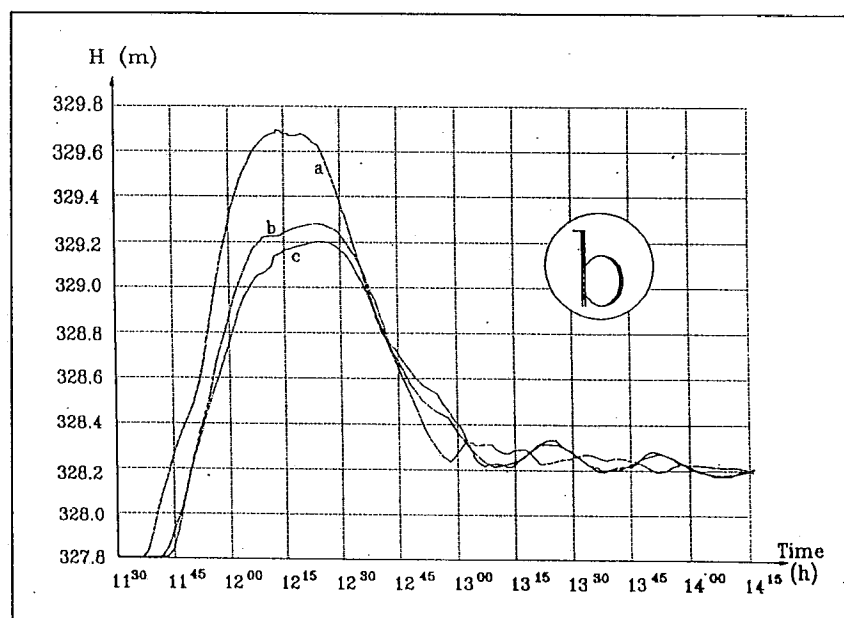
slika 4.

a.) Pretok v časovni odvisnosti za visokovodni val 7. mar. 1993



(a) preliv HE Mavčiče; (b) Smlednik (+2,626 km dolvodno); (c) HE Medvode

b.) Nivo gladine v odvisnosti od časa



(a) Smlednik; (b) Čolnarna - Zbilje; (c) HE Medvode.

Na podlagi navedenega smo rekonstruirali časovni razvoj robnih pogojev in vnesli v matematični model. Primerjava med iztočnimi volumni vode na HE Mavčiče in HE Medvode je potrdila pravilnost izbire robnih pogojev.

4.3 Rezultati

Na sliki 4a so prikazani pretoki čez prelivna polja na obeh pregradah v časovni odvisnosti. Za dolvodno elektrarno (HE Medvode) je krivulja določena na podlagi računa robnih pogojev, opisanih v predhodnem poglavju.

Iz slike je razvidno, da je bil maksimalni pretok na pregradi Mavčiče $1.192 \text{ m}^3/\text{s}$ medtem, ko je bil pretok na pregradi Medvode $1.130 \text{ m}^3/\text{s}$. Slednje nakazuje, da je bil maksimalni pretok med obema pregradama v intervalu med 1.100 in $1.200 \text{ m}^3/\text{s}$.

Na sliki 4b so prikazani nivoji gladin na pregradi Medvode ter dveh lokacijah gorvodno za čas trajanja visokovodnega vala. Glede na izjave očividcev je gladina v jezeru narasla za 70 cm nad normalno koto zajezitve. Na podlagi rezultatov računa je na profilu Zbilje znašal maksimalni dvig 78 cm , kar je skladno s podatki iz terena. Kot je bilo omenjeno, je bila v vplivnem območju vala le čolnarna v Zbiljah, ki pa ni utrpela nobene škode.

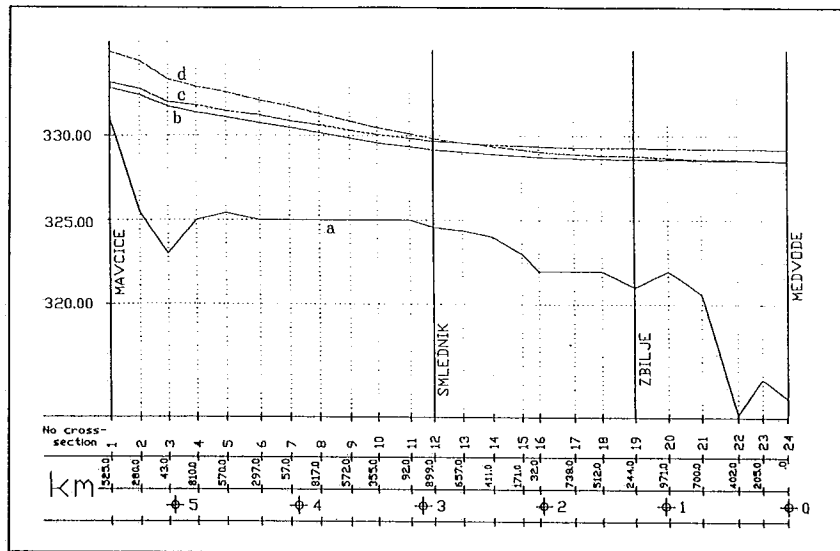
Na sliki 5 je prikazan vzdolžni profil rečnega odseka z vrisanimi gladinami: stanje pri visokovodnem valu v primerjavi s stoletno vodo ($Q=1.670 \text{ m}^3/\text{s}$) in visoko vodo ($Q=1.030 \text{ m}^3/\text{s}$) iz decembra 1992, ki predstavlja približno vrednost petdesetletne vode.

Časovni razvoj visokovodnega vala dolvodno od HE Medvode smo opazovali na vodomerskih postajah (Šentjakob, Litija, Radeče), kot je razvidno iz slike 6. Iz tabele 2 je jasno razvidno sploščevanje vrha visokovodnega vala, ki se veča glede na oddaljenost od merske postaje. Čas trajanja visokovodnega vala na pregradi Mavčiče je znašal 1h in 20 min , na zadnji merski postaji (Radeče) pa 5 h .

tabela 2.:

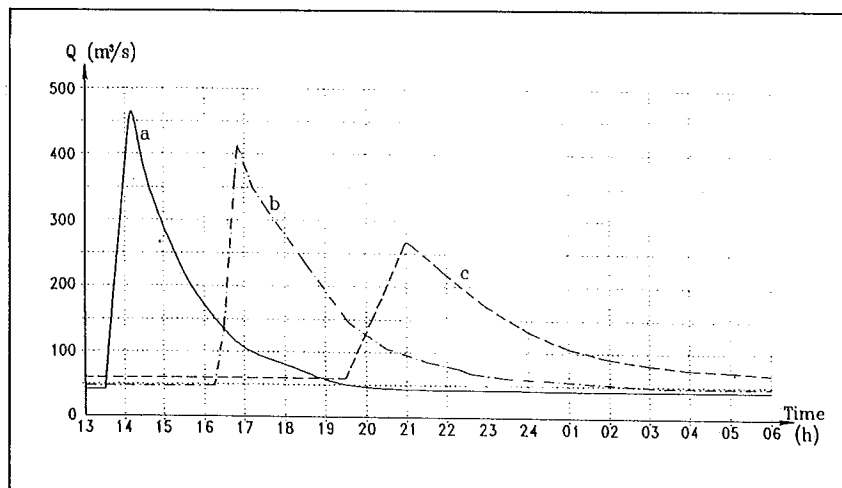
Cross section	km	Time [h]	Peak discharge [m^3/s]	Δt [h]	Distance [km]	Velocity [m/s]
HPP Mavčiče	0	12.17	1192	0.13 1.39 2.42 4.09	5.525	25.00
HPP Medvode	5.525	12.30	1130		14.975	9.08
St. Jakob	20.500	14.09	470		28.460	10.54
Litija	48.960	16.51	415		35.020	8.43
Radeče	83.980	21.00	270			

slika 5.: Vzdolžni profil odseka med Mavčičami in Medvodami



(a) dno; (b) visokovodni val 7. mar. 1993; (c) visoka voda v dec. 1992 ($1.030 \text{ m}^3/\text{s}$);
(d) 100 l. voda ($1.670 \text{ m}^3/\text{s}$).

slika 6.: Pretok v časovni odvisnosti dolvodno od HE Medvode



(a) Šentjacob (+15 km dolvodno); (b) Litija (+43,5 km); (c) Radeče (+78,5 km)

Glede hitrosti propagacije visokovodnega vala so bili narejeni sledeči zaključki:

Na območju Zbiljskega jezera je bila opazovana hitrost propagacije $25,5 \text{ km/h}$ (13 min. za 5.525 km). Na podlagi matematičnega modela, z upoštevanjem nestacionarnega toka v 24. računskih profilih so bile računane hitrosti propagacije vala enake opazovanim.

Hitrost propagacije vala smo računali tudi z znano enačbo:

$$c = u + \sqrt{g \cdot h} \quad (1)$$

kjer pomeni u = srednja hitrost v prerezu; $h = S/B$ pomeni povprečno globino (S = presek vodnega toka, B = širina struge na vodni gladini). Za privzete vrednosti povprečne globine $h = 4$ m in srednjo hitrostjo vodotoka $u = 0,5$ m/s znaša hitrost propagacije $c = 24,6$ km/h, kar je zelo blizu opazovanim vrednostim.

Dolvodno od pregrade Medvode točnega računa nismo izvajali. Kljub temu pa smo izdelali grobe primerjave propagacije vala med profili v.p. Šentjakob (stacionaža +14.975 km) in v.p. Radeče (stacionaža +78.455 km), kot je tudi razvidno iz slike 6 in tabele 2. Opazovana hitrost propagacije čela vala je na tem odseku znašala med 8,5 in 10,5 km/h. Za grobo primerjavo smo privzeli, da je v začetku znašala srednja hitrost $u = 0,5$ m/s, srednja globina pa 1,0 m. Iz enačbe (1) znaša hitrost propagacije $c = 13,2$ km/h. Razlika, ki je nastala na podlagi računa je verjetno posledica tega, da so posamezni rečni odseki plitvejši in je zato privzeta povprečna globina prevelika. Za čas trajanja visokovodnega vala ni praktično nikjer prišlo do prelitja brežin kjer bi se ustvarile retenzije in tako zmanjšale hitrost propagacije vala.

Na podlagi primerjave nivojev gladin visokovodnega vala z dne 7. mar. 1993 in statističnimi poplavnimi valovi lahko zaključimo naslednje:

- ♦ Samo v gornjem delu Zbiljskega jezera (v dolžini 2 km) je bila gladina višja kot v primeru petdeset in stoletnih visokih vodah in to zato, ker je v tem primeru z režimom odpiranja zapornic na HE Medvode zagotovljena stalna kota gladine pred pregrado na 328,5 m. Nadvišanje gladine na obravnavanem odseku je znašalo do 70 cm, kar ni pomenilo resne nevarnosti ne za prebivalstvo, ne za infrastrukturo ob jezeru.
- ♦ V srednjem in spodnjem delu je bila gladina vala primerljiva s petdesetletno visoko vodo in do 2 m nižja od stoletne visoke vode.
- ♦ Maksimalne gladine, ki so posledica samodejnega dviga zapornic niso primerljive z gladinami pri porušitvi pregrade Mavčiče; le-te so višje za 5 do 10 m.

5. PRIDOBLENE IZKUŠNJE NA PODLAGI DOGODKOV

Za vsako hidroelektrarno, kjer je načrtovano daljinsko vodenje, le-to pa zaradi najrazličnejših vzrokov (pretežno finančne narave v zaključni fazi gradnje) ni realizirano, je potrebno preveriti ustreznost obratovanja glede na način lokalnega vodenja.

V slučaju HE Mavčiče je bil samodejni dvig zapornice posledica aktiviranje releja, ki je predviden za računalniško vodenje odpiranja zapornice. Aktiviranje releja je povzročilo znižanje izolacijske vrednosti na sponkah v kabelski razžirni omarici. Za preprečitev ponovitve podobnih nesreč v prihodnosti so bili izvedeni ustrezni ukrepi zavarovanja.

Meritve gladin v bazenu morajo potekati kontinuirno, kar je tudi upoštevano v pripravi projekta daljinskega vodenja elektrarn.

Visokovodni val, ki je nastal zaradi samodejnega odpiranja zapornice ni ogrozil prebivalcev ne infrastrukture dolvodno. Pretok je bil v rangi visoke vode s povratno dobo 50. let.

6. ZAHVALA

Želeli bi se zahvaliti prof. Marku Brezniku za njegovo dragoceno pomoč pri pripravi tega prispevka.

LITERATURA:

- ♦ Breznik, M. 1988: Influence of the Mavčiče Reservoir on the Environment, Proc. 16th Congress on Large Dams, San Francisco 1988, Q. 60, R.46.
- ♦ Hidrometeorološki Zavod : Podatki avtomatskih meritev nivojev gladin na Savi za 7. mar. 1993, Poročilo, sept. 1993.
- ♦ Rajar, R. 1973: Modèle Mathématique et abaques sans dimension pour la détermination de l'écoulement qui suit la rupture d'un barrage. Proceedings of the XI^e Congress ICOLD, Madrid, Q 40, R 34.
- ♦ Rajar, R. 1993: Computation of the flood wave due to the opening of the gate on the Mavčiče dam on March 7th 1993. Report No. 88-LMTe, Laboratory for fluid Mechanics, University of Ljubljana.
- ♦ Stojič, Z., Povž, M.: Fish Facilities for Tamed Streams. Proc. 18th Congress on Large Dams, Durban, Q 69, R 12.
- ♦ Zupan, F. 1987: Elektrarna Mavčiče, Gradbeni vestnik, l. 36, Ljubljana, 192-194.