

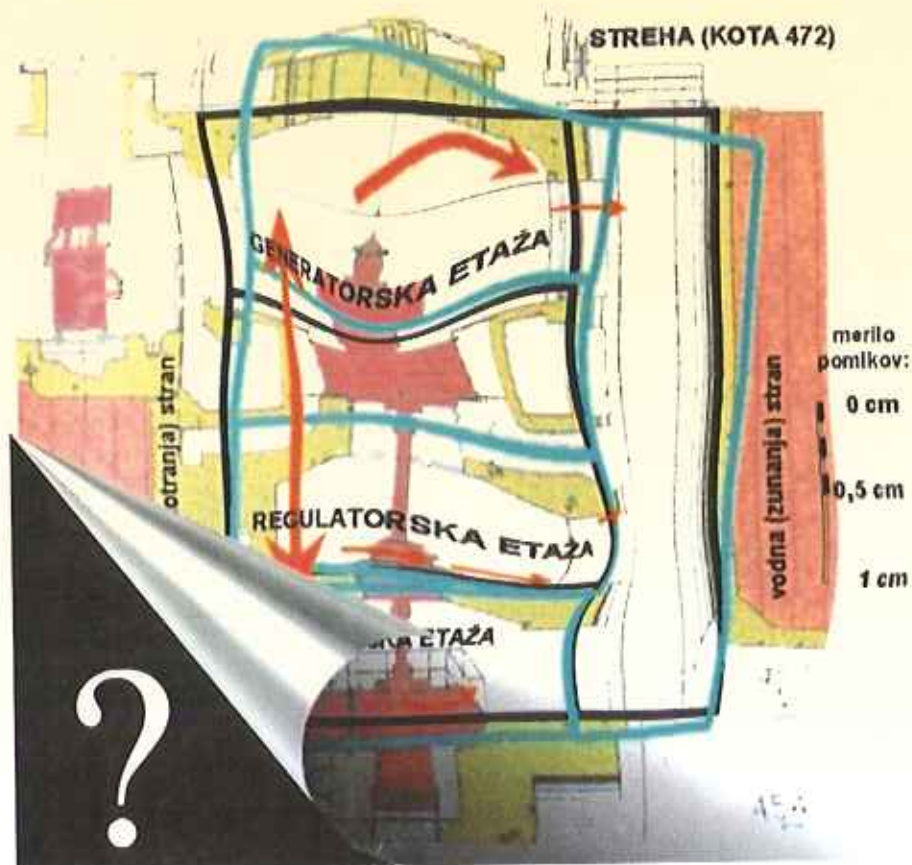


3. POSVETOVANJE SLOCOLD "TEHNIŠKA PROBLEMATIKA SANACIJE IN DOINSTALACIJE HE MOSTE"

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

urednik

Branko Zadnik



Breznica, maj 2001



***3. POSVETOVANJE SLOCOLD
"TEHNIŠKA PROBLEMATIKA
SANACIJE IN DOINSTALACIJE HE MOSTE"***

zbornik prispevkov

Branko Zadnik (urednik)

Breznica, maj 2001

VSEBINA

	Stran
Beseda urednika	1
Pozdravni nagovor vodje HE Moste	2
Polak Drago	4
Somrak Dušan	11
Kvaternik Krešimir	17
Peček Danica	27
Kryžanovski Andrej	39
Brinšek Rudi	46
Ravnikar-Turk Mojca	53
Širca Andrej	62
Rajar Rudi Četina Matjaž Kryžanovski Andrej Krzyk Mario	72

Beseda urednika

Kvalitetna, zadostna in pravočasna oskrba z energijo je danes osnovni pogoj za nemoteni družbeni in gospodarski razvoj slične države. To je možno zagotoviti le z izgradnjo ustrezne energetske infrastrukture, posodabljanjem obstoječih, v preteklosti zgrajenih objektov, in uvajanjem novih energetsko manj potratnih tehnologij, ki bodo zagotovile manjšo porabo energije na enoto družbenega proizvoda. Seveda graditev novih energetskih virov močno posega v prostor, kar narekuje enakopravno sodelovanje vseh prizadetih pri zasnovi teh objektov. Pri tem je potrebno voditi strpen in enakopraven dialog, ki se ga v mnogih primerih še nismo naučili, predvsem pa, ugotavljamo v mnogih primerih politizacijo te tematike. Dogajanje pri obravnavi projekta revitalizacije in doinstalacije HE Moste v zadnjih letih, je jasen dokaz kako se lahko nekonstruktivno vodi javno diskusijo in pripelje projekt v pat pozicijo le na osnovi politizacije javne lokacijske obravnave.

Cena, ki jo za to plačuje celotna družba je visoka in se je javnost, kot tudi glavni akterji kreiranja »ekološko – prostorske« problematike, niti ne zavedajo. Skrajne posledice takšnega načina obravnave energetske problematike so lahko za mlado državo usodne pri ohranjanju njene identitete in njenem samostojnem vključevanju v Evropo.

Glas stroke se prevečkrat presliši in njenih argumentov se ne upošteva v zadovoljivem obsegu. Strokovne razlage problemov niso popularne in so za širšo javnost nezanimive. Žal pa je dejstvo, da tudi državni organi, ki so poklicani za pravilno usmerjanje razvoja družbe, v konkretnem primeru projekta obnove HE Moste niso zadosti prisluhnili stroki in njenim argumentom, ki so bili že mnogokrat predstavljeni. Pričujoči zbornik prispevkov je zapis 3. posvetovanja SLOCOLD z delovnim naslovom »Tehniška problematika sanacije in doinstalacije HE Moste«, ki je bilo 11. maja 2001 v Breznici, vasi v neposredni bližini hidroelektrarne, in predstavlja del naporov, da se problematika obnove tehnično objektivno predstavi zainteresiranim. Obseg zbornika je omejen na devetih prispevkov, ki prinašajo značilen prerez tehničnega dogajanja na obstoječem objektu v preteklosti, opisujejo obnašanje in vplive staranja na objektih obstoječe strojnice in pregrade, hkrati pa tudi predvidene tehnične aktivnosti, ki bodo morale biti izvršene v bodočnosti, da se bo zagotovilo varno in ekonomsko ter tudi okoljsko sprejemljivo delovanje elektrarne. Posvetovanje se je namcnoma izognilo poudarjanju problematike umeščanja v prostor in posledicam tega, ker smo smatrali, da je potrebno enkrat posvetiti pozornost čisti tehniki in s tega zornega kota, brez navijaških ambicij, osvetliti položaj in bodočnost IIE Moste.

Posamezni prispevki so v zborniku objavljeni v obliki, kot so jo pripravili avtorji. Zato je vsak avtor odgovoren za vsebinsko in jezikovno ustreznost prispevka.

Breznica, 11.05.2001

predsednik SLOCOLD
doc.dr.BrankoZadnik

Pozdravni nagovor vodje HE Moste

Spoštovani gospod predsednik, spoštovani člani društva SLOCOLD, gospod župan občine Žirovnica,

dovolite, da vas pozdravim v imenu SEL in direktorja družbe g. Miklavčiča, ki ga žal moram zaradi zadržanosti opravičiti, pozdrav pa še prav posebej velja s strani domačinov, to je zaposlenih v proizvodni cnoti HE Moste.

Že na začetku, bi se vodstvu tega eminentnega strokovnega skupa rad iskreno zahvalil, da je sklenilo svoje društvene obveznosti združiti tudi z obravnavanjem problematike HE Moste.

Lahko rekli, da ni naključje, da je današnja redna letna skupščina SLOCOLD prav v Žirovnici, le streljaj od prve v nizu elektrarn na reki Savi. Škoda, da razlog ni v praznovanju kakega zelo pomembnega dogodka, pa čeprav te dni mineva 90 let od sprejetja odločitve o pričetku izgradnje HE Završnica, ki je tudi v sklopu naše proizvodne enote, pač pa je razlog temna in negotova perspektiva, ki visi nad petdeset let staro elektrarno Moste.

Mislím, da mi je ni potrebno posebej opisovati in predstavljati, saj se velika večina vas z njo in njenimi gradbenimi problemi že dolgo časa srečuje in še več, mnogi zastavljajte svoj čas, znanje in strokovnost v reševanju nakopičenih problemov. Kot odgovornemu za obratovanje in vzdrževanje elektrarne mi dovolite samo, da po zadnjih rezultatih remonta, katerega smo izvedli v preteklih treh mesecih letošnjega leta, ugotovim, da smo izkoristili večji del cenovno in tehniško racionalnih možnih ukrepov za zagotovitev nadaljnjega varnega obratovanja elektrarne. V nadaljevanju bodo ukrepi vse bolj smeli in rizični – tako tehnično, kot finančno. Ob tem pa ne pozabimo, da povsem nove tržne zakonitosti v energetiko počasi prinašajo tudi dejstvo, da je kWh postala tržno blago – trg pa je neizprosni!

Ker odsluženo na koncu mora vedno nadomestiti nekaj novega, smo po tem sicer enostavnem vzorcu razmišljali tudi v Savskih elektrarnah. Projekt sanacije in doinstalacije HE Moste je tako za nas postal najracionalnejša rešitev in edina možna perspektiva. Ne samo, da bi s tem projektom še v naprej zagotovili sedanjo raven proizvodnje, z doinstalacijo bi pridobili tudi **nove dodatne MW** najdragocenejše električne energije proizvedene na okolju najbolj prijazen način. Z dokončno uresničitvijo projekta bi izboljšali tudi razmere v koritu Save dolvodno ter nenazadnje, z zagotovitvijo nadaljnje proizvodnje električne energije na energetski stopnji v Mostah bi se ohranilo prenekatero delovno mesto – za majhno novo občino, kot je Žirovnica na primer, je to zelo pomembno dejstvo.

Izgradnja elektrarne predstavlja velik poseg v okolje. Vsak poseg v okolje je povezan s kompromisi. Uskladitve niso enostavne. Ob nastajanju projekta skupaj z različnimi interesi s kančkom narodove in lokalne posebnosti dobimo čudovit poligon za nastop najrazličnejših samooklicanih zagovornikov naravnih in kulturnih znamenitosti, katere naj bi bile prizadete. Nasprotniki projekta jim ponudijo zaščito in podporo ter tako družno največkrat brez posebnih argumentov uspejo zavreti razvoj nekega projekta. Njihova moč je bila v našem primeru prevelika, zaslepljenost in indolentnost odgovornih na različnih nivojih in okoljih preobčutna in zato se danes ne pogovarjamo o zaključku izgradnje nove elektrarne, ampak projekt zopet obujamo k življenju v fazi vključevanja projekta v prostor.

V nadaljevanju bodo kolegi predstavili strokovno plat najavljene problematike, jaz pa vas samo še povabim, da si po posvetu skupaj ogledamo razmere v sami elektrarni in okolici.

In na koncu še sposojena misel iz zelene knjige Evropske Unije:

**V energetiki ni enostavnih rešitev,
ni takega vira, ki ne bi onesnaževal, bil neizčrpen in bil poceni!**

Po premlevanju te misli sem na koncu še vedno optimist in tako razpoložen tudi skupščini želim uspešno delo ter društvu plodno naslednje mandatno obdobje.

Vodja PE HE Moste

Koselj Anton, ing.el.

OBNOVA IN DOINSTALACIJA HE MOSTE

Drago Polak, univ.dipl.inž.el.
direktor tehničnega sektorja

Savske elektrarne Ljubljana d.o.o., Gorenjska c. 46, 1215 Medvode

Tel.:+38601 4749 130 - Faks: +38601 4749 272 - E-mail: drago.polak@savske-el.si

Povzetek: V referatu je opisana problematika EES, kateremu kronično primanjkuje vršne moči in energije ter rezerve regulacijskih moči za regulacijo frekvence in moči. Ena od rešitev navedene problematike je tudi doinstalacija obstoječih HE v katerih se glede na starost ob potrebnih obnovitvenih delih izkoristi naravne danosti hidropotenciala, ki ga te HE izkoriščajo. Opisan je projekt obnove in doinstalacije HE Moste kot edine akumulacijske HE z tedensko izravnavo pritokov, ki ima vlogo prvega čelnega bazena celotne Savske verige.

REFURBISHMENT AND UPDATING OF THE HPP MOSTE

Summary: In this paper are shortly described problems in electrical power system of R Slovenia, specially in the field of regulation power. One of the possible solution for this kind of problems is updating of existing HPP where we can exploit all available natural hydropotential. The refurbishment and updating of HPP Moste is also described. HPP Moste is the only Slovenian weekly storage HPP and first head reservoirs of whole chain on the Sava River.

1.0 RAZMERE V EES REPUBLIKE SLOVENIJE

Srednjeevropske države, ki so glede na naravne danosti razpoložljivega hidroenergetskega potenciala primerljive s Slovenijo, so v preteklosti izkoristile družbeno klimo in zgradile akumulacijske elektrarne, kar jim danes omogoča veliko konkurenčnost na evropskem tržišču energije in s tem široke možnosti trgovanja z električno energijo. EES imajo tako na razpolago dovolj vršne in rezervne regulacijske moči za uvajanje elektroenergetskim sistemom manj ugodnih virov, hkrati pa je omogočeno nemoteče vključevanje tudi malih samostojnih proizvajalcev.

Slovenija je takšne vire za potrebe usklajenega obratovanja EES v preteklosti izkoriščala v republikah bivše države. Z osamosvojitvijo Slovenije in s tem njenega EES je prišlo do razkoraka med zahtevami paralelnega obratovanja v interkonekciji UCTE in energetskimi zmožnostmi zgrajenih proizvodnih virov, saj so bili veliki proizvodni objekti zgrajeni za obratovanje v jugoslovanskem elektroenergetskem sistemu.

Pri dosedanjem načrtovanju in izgradnji proizvodnih virov v R Sloveniji je bila premalo upoštevana potreba EES po vršni moči in energiji ter rezervi regulacijskih moči za regulacijo frekvence in moči. Slovenski EES ima na teh področjih kronični primanjkljaj ter tako ne zadovoljuje pogojev za samostojno obratovanje, kakor tudi ne pogojev sodelovanja kot enakopravnega partnerja v evropski interkonekciji UCTE.

Vsi parametri sekundarne regulacije morajo biti zagotovljeni v domačem EES. Zagotavljanje iz drugih EES bi bilo možno le v primeru združitve pool, ki bi imel skupno regulacijsko območje in ustrezne notranje dogovore o prispevkih posameznih članic k skupno potrebnim parametrom sekundarne regulacije.

Zahtevam elektroenergetskega sistema po vršni moči in rezervi regulacijske moči najbolj ustrezajo akumulacijske HE. Zaradi družbene klime in gospodarskih razmer, tako pred osamosvojitvijo kot tudi po njej, v R Sloveniji ni bilo možno realizirati niti enega hidroenergetskega objekta, ki bi omogočal sezonsko izravnavo pretokov ter zagotavljal sistemu več regulacijske in rezervne moči. Še več. Dolgonačrtovane HE so se, predvsem zaradi pomanjkanja finančnih sredstev, gradile več kot 6 let (Solkan, Mavčiče, Vrhovo), čeprav je vsem jasno, da se morajo kot kapitalsko zahtevni objekti graditi čim hitreje, da ob minimalnih vzdrževalnih in obratovalnih stroških pričnejo čim hitreje vračati vloženi kapital.

Perspektivno pa se bodo z nadaljnjim prestrukturiranjem gospodarstva, stalnim zmanjševanjem porabe veleodjemalcev in vse ostrejših zahtevah, tako industrijskih odjemalcev kot tudi gospodinjstev po zanesljivi dobavi kvalitetne električne energije, razmere v EES samo še poslabševale. Povečevalo se bo razmerje med baznim in vršnim delom obremenilnega diagrama ter potrebe po zagotavljanju rezerv regulacijske in konične moči.

2.0 RAZMERE V EES R SLOVENIJE V LETU 2001

Iz sprejete indikativne elektroenergetske bilance (EEB) za leto 2001 je razvidno, da ima EES Slovenije vse leto 2001 viške električne energije, razen za obdobje remonta NEK. Tako ima EES Slovenije v letu 2001 1865 GWh viškov energije ter planiran uvoz v času remonta NEK 139 GWh. Seveda pa se razmere v EES Slovenije lahko v hipu spremenijo z odkupom Hrvaške polovice proizvodnje NEK. Slovenija iz izvoznika postane uvoznik električne energije v višini 860 GWh. Povezovalni vodi z državami EU in Hrvaško omogočajo uvoz potrebne električne energije, saj se odvisno od razmer giblje realna velikost možnega uvoza električne energije cca 300 MW v pasu.

In kako v Sloveniji rešujemo zahteve pravil UCTE-ja po zagotavljanju potrebnih regulacijskih moči?

Za zagotovitev rezerve regulacijske moči in zadostitev potrebam EES po vršni moči je Slovenija namesto akumulacijskih HE postavila dva bloka plinskih agregatov z močjo 114 MW v TE Brestanica. Toda že danes ta dva agregata zaradi premajhne kapacitete plinovoda, visoke cene kWh (64,9 SIT/kWh ob planirani proizvodnji po EEB 79 GWh) ter nezmožnosti oddaje celotne moči v EES zaradi nezadostno izgrajenih prenosnih poti, ne obratujeta niti toliko, da bi v poskusnem obratovanju preživela vse "otroške bolezni" s preizkušanjem doseganja vseh zahtevanih tehničnih parametrov.

Poleg tega je že v zaključkih študije FER "Vloga HE Moste v slovenskem elektroenergetskem sistemu", in sicer investicije v doinstalacijo HE Moste in v izgradnjo nadomestne plinske elektrarne pokazala, da bi doinstalacija HE Moste v 17 letih (2004 - 2020) prinesla dobrih **185 mio DEM** privarčevanih stroškov za goriva termoelektrarn, medtem ko bi v istem obdobju plinska elektrarna iste moči prihranila le **25 mio DEM**. Pri tem pa sploh ni bil upoštevan vse pomembnejši ekološki vidik.

3. TEHNIČNE OSNOVE

Ob upoštevanju navedenih razmer v EES in pričakovanih pogojih odprtega trga z električno energijo, ima v Savskih elektrarnah Ljubljana d.o.o. prioriteto projekt obnove in doinstalacije HE Moste. HE Moste je edina slovenska hidroelektrarna akumulacijskega tipa, katere velikost akumulacijskega bazena zadošča za tedensko izravnavo pretokov. Od leta 1952, ko sta pričela z

obratovanjem prva dva agregata in katerima so zaradi energetskih potreb dodali še tretji agregat, so agregati pri povprečnem letnem številu 5000 ur, proizvedli skupaj 2684 GWh.

V letu 1977 je bil dograjen še četrti revezibilni agregat, ki v turbinskem režimu izrablja vodo akumulacije Završnica, črpalni režim testnega agregata tedanje elektrostrojne industrije pa se je zaradi prevlelike onesnaženosti Savske vode v primerjavi z Završnico opustil. Osnovna oprema HE Moste je po petdesetletnem obratovanju že močno iztrošena, poleg tega pa se vrsta dodatnih problemov pojavlja zaradi gradbenih deformacij strojnice, ki se pojavljajo že od začetka obratovanja HE. Strojnice je objekt s štirimi etažami, kjer se pojavlja problem zamika in deformacij posameznih etaž vsled pritiskov na stene strojnice tako zaradi drsenja terena kot tudi temu neprilagojene gradnje nearmirane strojnice.

Sanacija strojnice s prednapetimi sidri je bila izvršena v letu 1978 a le z začasnim uspehom, saj so deformacije po letu 1984 ponovno nastopile. Zavedajoč se kompleksnosti celotne problematike HE Moste in zagotovitve njenega nadaljnjega obratovanja je bila v letu 1993 izdelana idejna študija "Študija prenove HE Moste", ki je obdelala tri variante prenove HE Moste z rekonstrukcijo obstoječe strojnice ter agregatov in novo strojnico z dvema oziroma enim agregatom. Istočasno pa je bilo v letu 1993 izvršeno ponovno napenjanje celotne konstrukcije strojnice, ki naj bi preprečilo medsebojne zamike etaž in omogočilo varno in zanesljivo obratovanje agregatov do dokončno sprejete rešitve rekonstrukcije HE Moste.

Zavedajoč se pomembnosti akumulacijske HE Moste v EES in njenih energetskih potencialov, smo se odločili za kompleksne energetske meritve s križci, ki jih je v letu 1993 izvedel Turboinštitut v sodelovanju s SEL. Izršene meritve na turbinah, dovodnem in odvodnem sistemu, so imele namen ugotavljanja stanja agregatov ter pridobitev podatkov o hidravličnem dogajanju v celotnem sistemu. Rezultati izvršenih meritev so pokazali, da je celotni dovodni in odvodni sistem poddimenzioniran, saj je bil dimenzioniran za dva agregata z obratovanjem v optimumu pri 70 % pretoka in ne za tri oz. štiri na odvodnem sistemu, kot je bilo kasneje izvedeno. Merjene vrednosti hidravličnih izgub na dovodnem sistemu pri obratovanju vseh treh agregatov znašajo povprečno 10 m oziroma 14 % celotnega bruto padca.

Na osnovi rezultatov izvršenih meritev je bila izdelana vsa projektna dokumentacija iz katere so razvidni tehnični parametri doinstalirane HE Moste. Zasnova energetskega sistema doinstalirane HE Moste obsega novi vtok, nadvišanje obstoječe sanirane pregrade, nov dovodni tunel z vodostanom, novo strojnico z vgrajenima agregatoma in pripadajočo opremo, kompenzacijski bazen s potrebnimi vodnogospodarskimi in naravovarstvenimi ureditvami, novo nasuto pregrado HE Moste III z vgrajenimi prelivnimi polji in strojnico z dvema agregatoma.

Primerjava energetskih parametrov obstoječe in doinstalirane HE Moste II z energetsko stopnjo na pregradi kompenzacijskega bazena (HE Moste III) je razvidna iz slike 3.1.

Elektrarna			Obstoječa HE Moste	Doinstalirana HE Moste	Stopnja na kompenza. HE Moste
Zap. št.	Parameter	Enota	I.	II.	III.
1.	Srednji letni pretok za obdobje 1961-1990	m ³ /s	13,8	13,8	22
2.	Instalirani pretok	m ³ /s	28,5	70	30
3.	Velikost instalacije	Qi/Qsr	2,06	5,07	1,4
4.	Padec pri Qi=Qi	m	57	68	16
5.	Instalirana moč	MW	16,5	43	3,8
6.	Število in moč agregatov	MVA	3 3x7,5	2 2x25	2 2x2,5
7.	Koristna vsebina akum. bazena	hm ³	3,24	3,24	0,6

8.	Maks. dovolje. deniv.	m	6,25	6,25	3
9.	izkoristki pri odprtju turbine 70 %	%	88	94	94
		100%	81	91	91
10.	Srednja letna proizv.	GWh	57	74	18

Slika 3.1: Primerjava energetskih parametrov

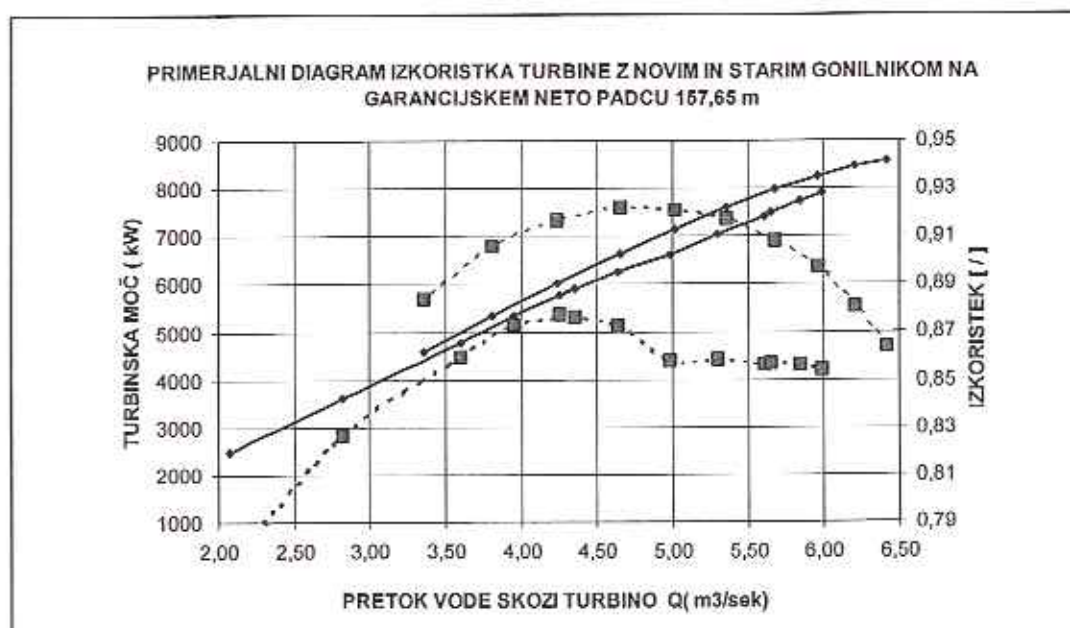
Ob obratujočem agregatu 4 z instalirano močjo 11 MVA in povprečno letno proizvodnjo 5,5 GWh, ki deluje na vodo akumulacije v Završnici, bodo doinstalirane HE Moste skupaj z energetsko stopnjo HE Moste III povečale moč s sedanjih 16,5 na 47 MW in proizvodnjo dragocene vršne energije od 57 GWh na 92 GWh.

4.0 STANJE AGREGATOV IN STROJNICE HE MOSTE

4.1 Agregat 4

V strojnici HE Moste, ki obratuje od leta 1952 je poleg agregatov št. 1, 2 in 3, ki izkoriščajo hidroenergetski potencial reke Save, vgrajen še agregat 4, ki od leta 1978 izkorišča hidroenergetski potencial Završnice. Vrsta ralogov ter predvsem tehnološka nedodelanost prototipnega črpalnega agregata, zastarelost in obratovalna nezanesljivost, so bili vzrok za izvedbo njegove rekonstrukcije v času od 1.2.1999 do 15.12.1999. Z zamenjavo gonilnika in vodilnih lopatic vodilnika, se je v povprečju povečal izkoristek agregata za 5 %, povečala moč turbine za 500 kW in s tem proizvodnja za 10 %. Agregat se je usposobil za daljinsko vodenje iz Centra vodenja Savskih elektrarn Ljubljana d.o.o. v Medvodah.

Rezultati izvršenih meritev izkoristkov in moči po indeks test metodi pred in po izvršeni rekonstrukciji so razvidni iz primerjalnega diagrama izkoristkov in turbinske moči v odvisnosti od pretoka skozi turbino.



4.2 Agregati 1, 2 in 3

Upoštevajoč starost agregatov HE Moste in odmikanje pričetka projekta obnove in doinstalacije HE Moste (po IP predvidena izvedba projekta doinstalacije od julija 1999 do julija 2003) smo v okviru rednih remontov s centriranjem agregatov v letu 2001 želeli ugotoviti stanje elektrostrojne

opreme ter preostalo življenjsko dobo agregatov oziroma postaviti oceno termina izpadov agregatov iz rednega obratovanja.

4.2.1 Stanje pred remontom

Pred začetkom remontov so bile izvršene meritve na:

a) strojni opremi agregata:

- meritev opleta osi in njenega loma v območju vodilnih ležajev in sklopov agregatov
- meritev zračnosti med gonilnikom in spodnjim vstavnim obročom

b) ter na generatorjih:

- meritev stresanega polja generatorja z MFM metodo ter analizo harmonikov na podlagi katere se ugotavlja:
 - napake v vzbujalnem sistemu
 - simetričnost zračne reže
 - medovojni stik v rotorskih polih
 - povečane parcialne praznitve

4.2.2 Meritve v času remonta

V okviru izvajanja remontov agregatov in njihovega centriranja pa so se izvedle še sledeče meritve:

a) na strojni opremi

- meritev zračnosti vodilnih ležajev (ZGVL, SGVL, SVL, TVL)
- meritev zračnosti vodilnih loput vodilnika turbine
- izmere ležajev in osi
- meritev horizontalnosti zvezde nosilnega ležaja
- centričnosti gredi proti ohišju ležajev

b) na generatorju

- kontrola kvalitete izolacije rotorja in statorja z nedestruktivnimi metodami
- na statorju:
 - z enosmerno napetostjo ugotavljanje stopnje izolacije proti masi
 - z udarno napetostjo ugotavljanje trdnosti medovojne izolacije, simetričnosti navitja in simetričnost zračne reže
 - merjenje ohmske upornosti navitja po posameznih fazah
- na rotorju:
 - z enosmerno napetostjo ugotavljanje stopnje izolacije proti masi
 - z udarno napetostjo ugotavljanje dielektrične trdnosti medovojne izolacije in simetričnosti navitja

c) na gradbenih objektih

- vertikalni pomiki reperjev v vseh etažah strojnice
- relativni horizontalni pomiki repernih točk na krovu
- rotacije zračnih jaškov v prečni in vzdolžni smeri strojnice
- delovanje karakterističnih razpok v vseh etažah strojnice
- deformacije zračnih jaškov na koti krova
- razdalje med stropom regulatorske in tlemi turbinske etaže
- geodetske meritve horizontalnih in vertikalnih pomikov repernih točk na brežini nad strojnico
- meritve vertikalne inklinacije v vrtnah nad in ob strojnici.

4.2.3 Ugotovljeno stanje v času remonta

Ob upoštevanju dejstva, da je bilo na podlagi monitoringa stanja izolacije, ugotovljeno najslabše stanje na agregatu 3, smo detaljno analizirali njegovo izolacijsko stanje. Po demontaži rotorja generatorja, se je na osnovi merjenja magnetnega odziva vseh palic (324) statorskega navitja določilo eno od najslabših palic. Palica je bila demontirana in odpeljana v laboratorij, kjer je bil izvršen napetostni preizkus do preboja zaradi ugotovitve preostale dielektrične trdnosti. Slaba palica je prebila pri 8,5 kV medtem, ko je palica iz rezervnega navitja izdelanega leta 1983 prebila pri 25 kV, medtem ko je pri preizkusu v EIMV leta 1985 palica prebila pri 50 kV. Po IEC znaša preizkusna napetost, ki jo mora zdržati 6,3 kV navitje generatorja 27,2 kV.

Pri demontaži vrhnje palice statorskega navitja je bilo ugotovljeno še slabše stanje izolacije palice iz spodnjega dela utora. Na krivini glave proti zastavici je izolacija odpadla, poleg tega pa so na spodnjem delu glave ugotovljene koncentrirane plasti nečistoč. Glede na splošno slabo vizuelno stanje izolacije navitja in glede na možnost popravila izolacije palice v spodnjem delu utora, je bilo dogovorjeno, da se začasno sanira s precizoliranjem poškodovane izolacije spodnje palice in na mesto odvzete palice vstavi rezervno novo palico.

Usklajeni rezultati meritev (trendi, smeri in velikosti odstopanj) na gradbenih objektih in strojni opremi kažejo na izrazito gibanje ter največje premike zgornjih etaž strojnice v območju A1. Povprečni premiki na gradbenih objektih znašajo 1 mm/leto, medtem ko premiki na strojni opremi agregata znašajo povprečno cca 0,5 mm/leto.

Po posameznih agregatih je bilo ugotovljeno sledeče stanje:

Agregat 1:

Zaradi premikov etaž strojnice je bilo ugotovljeno nehorizentalno stanje nosilnega ležaja in nedopustno majhna zračnost med rotirajočimi in mirujočimi deli turbine. Stanje je bilo sanirano s centriranjem agregata z ukrepi podlaganja nosilnega ležaja in podaljšanja gredi. Zaradi necentričnosti oprave je bil tekom obratovanja močno poškodovan zgornji generatorski ležaj, zato ga je bilo potrebno v celoti zamenjati.

Agregat 2:

Zaradi enakega vzroka je bilo ugotovljeno identično stanje kot na agregatu 1. Zaradi številnih izvedb centriranj agregatov v preteklem obdobju so bile že izrabljene vse konstrukcijske možnosti ukrepov. Nemogoče je bilo izvesti centriranje agregata po običajnih metodah, zato je bila oprema zmontirana v necentriranem stanju in agregat ponovno obratuje s povečanim rizikom za morebitne poškodbe in s tem zagotavljanjem obratovalne sposobnosti. Izvedba centriranja bi bila možna samo z izvedbo večjih konstrukcijskih sprememb.

Agregat 3:

Tudi na agregatu 3 je bila ugotovljena velika necentričnost, saj je bil tudi po demontaži ležajev gonilnik naslonjen na labirinte v smeri spodnje vode. Ker je bil izvlečen rotor generatorja zaradi izvedbe nedestruktivne metode za ugotavljanje preostale življenjske dobe navitja generatorja, so bili za potrebe centriranja odrezani robovi nosilnega generatorskega križa (8 mm) ter posneti fiksni vijaki statorja. Ugotovljeno izredno slabo stanje izolacije statorja generatorja kaže, da bo obratovanje agregata v EES problematično in istočasno vprašljiv čas njegovega nadaljnega obratovanja.

5.0 ZAKLJUČKI

Ugotovljeno izredno slabo stanje izolacije generatorjev A1, 2 in 3 HE Moste, necentričnost agregatov, ki je ni bilo možno zaradi izkoriščenih konstrukcijskih možnosti izboljšati ter stanje gradbenih premikov strojnice zaradi plazovitosti terena (nad strojnico in desnega brega Save) kažejo na alarmantno stanje glede nadaljnje proizvodnje električne energije v HE Moste. Glede na stanje projekta doinstalacije HE Moste in čas potreben za njegovo izvedbo, je za nadaljnje

izkoriščanje hidroenergetskega potenciala HE Moste in s tem pozitivnega poslovanja Savskih elektrarn Ljubljana ter potreb EES po tovrstni proizvodnji, potrebno zamenjati generatorje s takšnimi, ki bi ustrezali tudi energetskim in hidrološko hidravličnim pogojem v primeru neizvedbe projekta doinstalacije.

Istočasno je potrebno takoj nadgraditi monitoring elektrostrojne opreme in gradbenih objektov IIE Moste. Poleg spremljanja energetskih parametrov agregatov in temperatur ležajev, je potrebno izvajati kontrolne meritve premikov elektrostrojne opreme s pomočjo stalno nameščenih troosnih koordimetrov in elektronske libele, meritev zračnosti med gonilnikom in ohišjem turbine ter horizontalnost nosilne zvezde. Obstoječi gradbeni monitoring pa je potrebno modificirati in nadgraditi s postavitvijo dodatnih reperjev na medetažne plošče, izdelati in spremljati kataster razpok ter na osnovi rezultatov vseh opazovanj spremljati deformacijsko sliko strojnice.

Na osnovi dobljenih rezultatov meritev in ugotovljenega stanja elektrostrojne opreme agregatov št. 1, 2 in 3 IIE Moste v letu 2001, je potrebno za ohranjanje energetske dejavnosti na lokaciji Moste v letošnjem letu sprejeti osnovne odločitve okrog izvedbe planiranih projektov. **Vsekakor je osnovni in temeljni cilj Savskih elektrarn Ljubljana izvedba projekta obnove in doinstalacije HE Moste, ki je opravičljiv tako s sistemskega, energetskega, okoljevarstvenega in podjetniškega vidika.**

Obnova in doinstalacija HE Moste bo poleg podaljšanja življenjske dobe HE, zmanjšanja negativnih vplivov na okolje ter izboljšanja ekonomsko tehničnih parametrov IIE, dala tudi znaten prispevek pri izboljšavi regulacijskih sposobnosti EES R Slovenije, kar je v skladu s sprejetimi usmeritvami na področju izrabe obnovljivih virov, tako v Resoluciji o strategiji rabe in oskrbe Slovenije z energijo kot tudi v Energetskem zakonu.

6.0 Viri

- [1] Meritve energetskih karakteristik HE Moste, Turboinštitut št. 2221, Ljubljana, oktober 1993
- [2] Projektna dokumentacija za HE Moste, IBE
- [3] Referat "Doinstalacija HE na szorni Savi", Drago Polak, univ.dipl.inž.el., Sloko Cigre, maj 1997
- [4] Referat "Rekonstrukcija agregata 4 HE Moste", Drago Polak, univ.dipl.inž.el., Sloko Cigre, maj 2001
- [5] Študija "Vloga HE Moste v slovenskem EES", FER, avgust 1997

PREGLED POTEKA ŠTUDIJSKIH DEL NA ZASNOVI SANACIJE IN DOINSTALACIJE HE MOSTE

Dušan Somrak, univ. dipl. inž. gradb.
direktor projektov, IBE, Hajdrihova 4, Ljubljana

Povzetek

V prispevku so prikazani vzroki in potek raziskovalnih, pripravljalnih in projektnih del pri sanaciji HE Moste, kot tudi možnosti za povečanje instaliranega pretoka, ki bi ustrezal današnjim potrebam Elektroenergetskemu sistemu Slovenije, hkrati pa omilil nastale posledice na okolju zaradi nedokončane gradnje obstoječe HE Moste. Podani so vzroki za pričetek del ter razlogi za posamezne odločitve ter končni predlogi, vključno z odgovori na bistvene pripombe v lokacijskem postopku.

REVIEW OF THE COURSE OF STUDIES ON DESIGN ENGINEERING OF REFURBISHMENT AND UPRATING OF THE HPP MOSTE

Dušan Somrak, B.Sc.C.E.
Project Manager, IBE, Consulting Engineers, Hajdrihova 4, Ljubljana

Summary

The article gives reasons and course of research, preliminary and design engineering works on refurbishment and uprating of the HPP Moste as well as possibilities of the installed discharge increase which shall meet the nowadays requirements of the Slovenian electric power system and at the same time moderate the already developed environmental impacts which are due to the unfinished construction of the existing HPP Moste. Reasons for the works commencement as well as reasons for individual decisions and final proposals including answers to essential remarks of the siting procedure are given.

1. VZROKI ZA SANACIJO IN DOINSTALACIJO

HE Moste je pričela s svojim obratovanjem v letih 1950-52 in je danes, po izteku njene, cca 50 letne obratovalne dobe, tudi blizu konca svoje življenske dobe. Že v fazi gradnje so nastopile težave pri zagotavljanju stabilnosti objekta vsled drsenja brežine in terena v katerem se nahaja strojnica, kar se je tekom obratovanja nadaljevalo. Izvedlo se je razna sanacijska dela, kljub temu pa se problematika deformiranja še nadaljuje. Poleg deformiranja objekta samega se je vpliv deformiranja strojnice prenesel tudi na opremo. Težave nastopajo pri potrebnem centriranju agregatov, ki so, zaradi dolgih osi, še posebno občutljivi na premike betonske konstrukcije strojnice.

Kot je že bilo omenjeno, leži strojnica v plazljivem področju, na spodnjem robu savske terase. Levi breg je na celotnem področju od pregrade do Piškotarjevega mostu podvržen plazanju, ki je še posebej izrazito na področju strojnice in stikališča. V zadnjem času se pojavlja tudi drsenje večjih zemeljskih mas na desnem bregu, ki ob večji zdrsni v korito Save lahko povzroči potopitev obstoječega objekta strojnice HE Moste. V strojnici je že v fazi gradnje prišlo do poškodb objekta (zamika etaž med seboj v obliki prestriga, z zamikom na nekaterih delih tudi do 10 cm) vsled zdrsa, kar pa so kasneje zaradi vizuelnega izgleda, skrili z dodatno obzidavo sten. Isto se je dogodilo tudi z drenažnim jaškom ob zalodni steni, kjer so nameščeni transformatorji. Problematiko so reševali z dodatno vgradnjo vmesne stene. Narejene so bile obširne geomehanske analize, ki so nakazovale vzroke deformiranja objekta strojnice. V letu 1978 se je poskušalo objekt speti s posebnimi sidri, hkrati pa se je dopolnil tudi

osnovni opazovalni sistem, ki pa je imel pomanjklivost v osnovni reporni točki, ki ni bila stabilna, saj je bila nameščena v isti plazljivi gmoti. Kljub temu je opazovanje pokazalo relativno deformiranje. Nekaj let je bila sanacija uspešna potem pa je ponovno prišlo do povečanja deformacij. V letu 1993 je prišlo do ponovnega spenjanja objekta, ki pa je malo časa izkazoval umirjanje deformacij. Današnje stanje, na podlagi dopolnjenega sistema opazovanja, ki je zopet nekoliko vprašljiv glede absolutnih vrednosti, izkazuje dokaj enakomerne trende nagibanja objekta, rotiranje prvega agregata okoli četrtega in raztezanje strojnice – dvigovanje generatorske etaže. Iz podlaganj, ki so bila izvedena na spojkah osi agregata, v velikosti 2,5 cm (+ letošnje podlaganje) je razvidno in potrjeno, da se je samo generatorska etaža v svoji zgodovini, pod predpostavko, da so temelji fiksni, dvignila za vsaj 2,5 cm.

Vsi nakazani problemi kot tudi težave pri zagotavljanju pogonske sposobnosti stare dotrajane opreme so narkovale v 90. letih pričetek razmišljanja o sanacijskih posegih, da bi ohranili proizvodnjo na elektrarni.

A. Sanacija HE Moste:

Najprej se je poskušalo na podlagi tedaj znanih podatkov, ugotoviti možnosti sanacije obstoječega objekta in poleg tega še možnost eventualnega manjšega povečanja instalacije, glede na možnosti obstoječega dovodnega sistema.

Najprej je bila naročena »študija prenove HE Moste«, IBE Ljubljana, dec. 1993, ki se je proučevala v *dveh smereh* (variantah):

- a. sanacija obstoječega objekta z zamenjavo dotrajane opreme brez povečanja instalacije - zamenjava dolge osi s kratko in sanacija objekta (več možnih rešitev).
- b. Izgradnja nove strojnice, kjer so bile obdelane tudi *tri variante*, pri vsaki je bila predvidena povezava z obstoječim dovodnim in odvodnim sistemom:

I: varianta z enim agregatom požiralnosti 35 m³/s

II: varianta z dvema agregatoma s po 17.5 m³/s instaliranega pretoka

III: varianta z dvema agregatoma in dodatnim agregatom za izkoriščanje vode akumulacije Završnica.

HE Završnica, je bila v prvih dveh variantah predvidena v stari strojnici.

Za vsako varianto je bila izdelana zasnova (prefeasibility study) z oceno stroškov gradnje ter časovni plan gradnje, ki je omogočil izračun vrednosti izgubljene energije v času gradnje. Poleg same tehnične zasnove objekta je bila *variantno* iskana tudi najugodnejša lokacija strojnice, ki bi omogočala navezavo na obstoječe objekte. Našla se je sicer lokacija neposredno ob stari strojnici, ki pa leži v istem geološko neugodnem terenu, ki je dokazano v gibanju.

Revizija študije je izločila varianto z enim agregatom kot slabšo s stališča obratovanja, tako da so v nadaljnjo primerjavo prišle le tri variante:

a: varianta sanacije stare strojnice

b: varianta nove strojnice z dvema agregatoma + delna sanacija stare strojnice

c: varianta nove strojnice z dvema agregatoma + agregat Završnice

Naloga tudi ni posebej obravnavala povečanja instalacije. Razlog so omejitve obstoječega sistema za katerega je bilo na podlagi meritev ugotovljeno, da je že danes močno poddimenzioniran kot tudi omejitev pri obratovanju, ki izhajajo iz vodnogospodarskega dovoljenja zaradi neizgrajenega izravnalnega bazena. Meritve deformacij obstoječega objekta narekujejo potrebe po čim hitrejši, vsaj delni sanaciji obstoječega objekta (sanacija strojnice s spenjanjem etaž s prednapetimi sidri je bila zato izvršena že v letu 1993-94).

Poddimenzioniranje dovodnih in odvodnih objektov, kot tudi potrebna izgradnja izravnalnega bazena ter geološko neprimerne lokacije za sanacijo HE, so v tistem času narekovali izdelavo študije posodobljanja HE, ki bi ustrezala današnjim zahtevam energetskega sistema – čimvečja moč in možnosti čim bolj prostega obratovanja HE (sistemske potrebe, regulacija in moč – kar omogoča in čemer je tudi namenjena HE z možnostjo izkoriščanja akumulacijskega bazena s tedensko izravnavo pretokov).

2. USMERITVE PRI IZDELAVI ŠTUDIJE DOINSTALIRANJA HE MOSTE

Slovenija ima sorazmerno slabe naravne možnosti za izgradnjo večjih akumulacijskih elektrarn, zato je potrebno izkoristiti vsako, že zgrajeno elektrarno tega karakterja, v polni meri. HE Moste kot edina HE v Sloveniji z bazenom za tedensko izravnavo pretokov je bila v fazi načrtovanja namenjena predvsem čim večji proizvodnji električne energije za pokrivanje porabe v gorenjski regiji, kar je rezultiralo tudi zelo nizek faktor instalacije (1,78 po podatkih iz osnovnega projekta ($Q_{sr} = 16 \text{ m}^3/\text{s}$) oziroma 2,2, če upoštevamo noveliran podatek iz hidravlične študije iz leta 1995, $Q_{sr} = 13,6 \text{ m}^3/\text{s}$). Danes se je njena vloga spremenila tako, da se 95% njene proizvodnje porabi za pokrivanje moči in regulacije v sistemu. Kot je že omenjeno, kapacitet za te namene v Sloveniji primanjkuje, zato je bilo potrebno preveriti možnosti povečanja instalacije. Da bi najbolje izkoristili možnosti, ki jih daje akumulacija HE Moste, je bilo potrebno optimirati možnosti izrabe voda glede na naravne danosti in možnosti vključevanja objektov v prostor. Glavni sklopi vprašanj, ki jih je bilo potrebno razrešiti so:

- a: ugotoviti možnosti izgradnje načrtovanega in neizgrajenega izravnalnega bazena, ki bi omogočal prosto obratovanje za potrebe sistema in s tem tudi višjo instalacijo za dosedanje večje moči
- b: definirati in utemeljiti velikost instalacije po energetski in ekonomski plati ter na podlagi ugotovljenih prostorskih možnosti izgradnje kompenzacijskega bazena,
- c: definirati in ekonomsko oceniti izgradnjo derivacijskega sistema strojnice ter števila agregatov
- d: definirati posege v prostoru in posledice teh posegov in končno
- e: na podlagi rezultatov študije izdelati program potrebnih dodatnih raziskav za potrebe idejnega projekta

Za vsako od zgoraj navedenih točk je bilo izdelanih več variantnih rešitev, tako lokacijskih kot tehničnih.

Na podlagi zelo grobe predhodne ocene možnosti je bilo ugotovljeno, da je možno povečati bruto padeč in hkrati zmanjšati hidravlične izgube padca z izgradnjo novega dovodnega sistema, kot tudi bistveno povečati instalirani pretok ob izgradnji ustreznega kompenzacijskega bazena s tem, da se strojnica namesti na edino geološko primerno lokacijo nekoliko dolvodno od današnjega izliva iz obstoječega odvodnega sistema. V sklopu variantnih rešitev je bilo namreč ugotovljeno, da geološke prilike ne omogočajo gradnje dovodnih in odvodnih sistemov, kot tudi strojnice, na odseku doline Save med obstoječo pregrado in Piškotarjevim mostom. Tako je odpadla tudi izvedba izravnalnega bazena v tem področju.

B. SANACIJA IN DOINSTALACIJA

Na podlagi poznavanja navedene problematike je bila izdelana projektna naloga za izdelavo študije doinstalacije HE Moste, ki je upoštevala navedena izhodišča. Naloga sama je zato deljena v tri dele, ki obravnavajo sledečo problematiko:

- I. faza: Obravnavanje hidravličnega modela celotnega sistema z variantiranjem pretokov (32, 48, 64, 70, 80 in 96 m^3/s)

II. faza: Izdelava tehničnih zasnov sistema z oceno stroškov (variantne rešitve lokacij objektov in tras dovodnega sistema)

II. faza: Ekonomika projekta (variantne rešitve proizvodnje glede na instalacijo in ekonomiko instaliranih pretokov)

Rezultat naloge sta bila dva predloga izvedbe sanacijskih del, višine instalacije ter prostorsko-tehnične zasnove objektov izhajajoč iz prostorskih omejitev in ekonomskih kriterijev.

B.1 OPREDELITEV IN OPIS VARIANT DOINSTALACIJE HE MOSTE

Investitor je na podlagi preliminarnih študij, variantnih rešitev in recenzij, kot odini sprejemljivi rešitvi za doinstalacijo HE Moste predlagal dve varianti za nadaljno obravnavo.

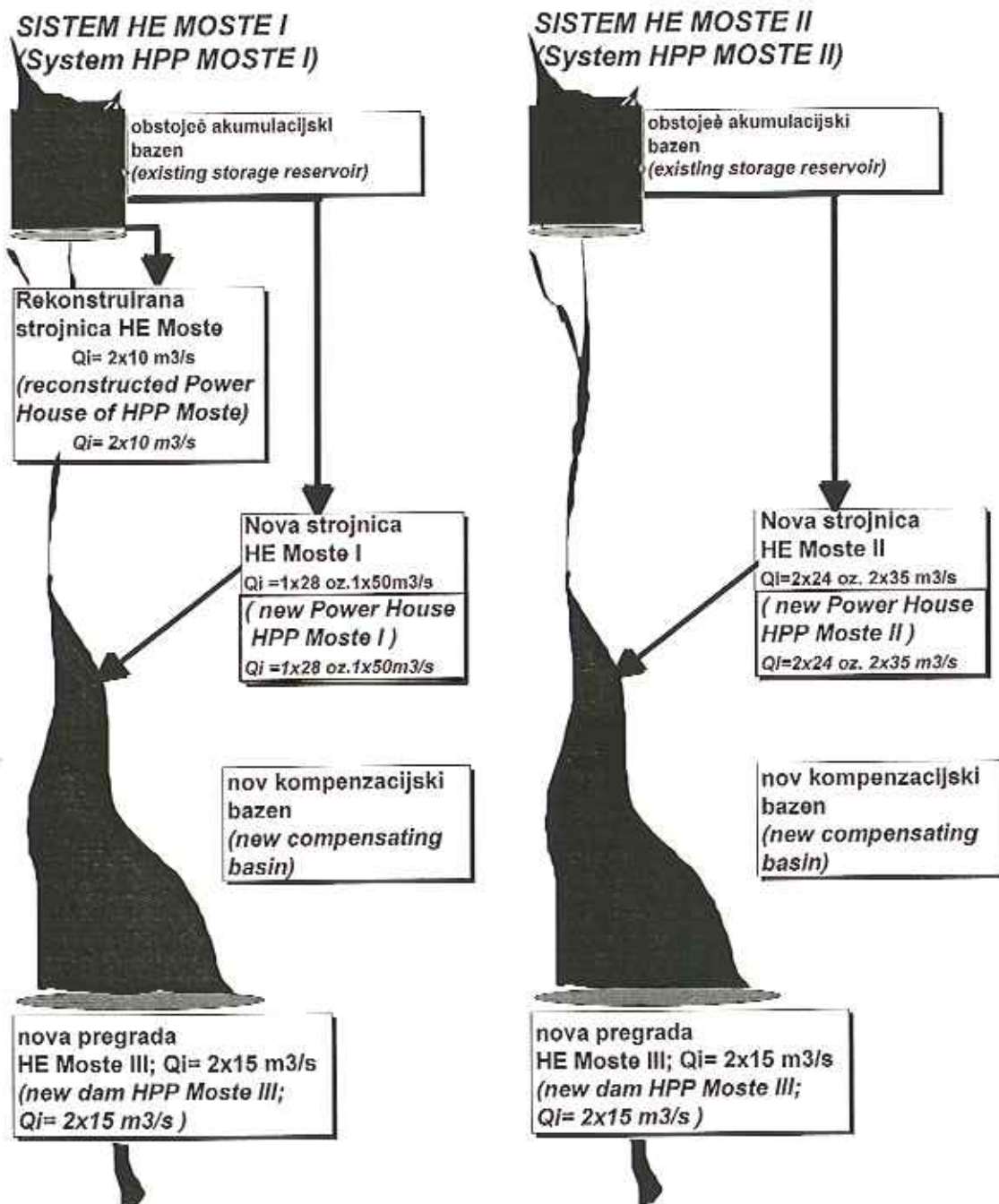
1. **Sistem HE Moste I**, ki predvideva doinstaliranje obstoječe HE Moste tako, da se stara elektrarna rekonstruira in se vanjo vgradi dva namesto treh agregatov s požiralnostjo turbin $10 \text{ m}^3/\text{s}$. Razliko do polne instalacije 70 m^3 predstavlja izgradnja nove, vzporedne elektrarne z ločnim zajetjem, dovodnim sistemom in strojnico z delovnim nazivom HE Moste I. Sistem vključuje elektrarno na izravnalnem bazenu (HE Moste III) (opomba: *ko to pišemo je, na podlagi dodatne študije iz l. 2000 jasno, da je rekonstrukcija stare HE, glede na trende pomikov, izredno rizična investicija*).
2. **Sistem HE Moste II**, ki predvideva izgradnjo popolnoma nove elektrarne (razen akumulacijskega bazena) z instalacijo $70 \text{ m}^3/\text{s}$, imenovane HE Moste II. Sistem prav tako vključuje elektrarno na izravnalnem bazenu (HE Moste III).

Izravnalni bazen bi moral biti izgrajen že pri izgradnji stare HE, da bi le ta prosto obratovala in v popolnosti služila sistemu za kar je bila tudi zgrajena. Ker ni prišlo do izgradnje izravnalnega bazena, ki se tu pojavlja kot element varovanja okolja pred bočno erozijo vsled hitrih sprememb pretokov in gladin, od l. 1960 pa do danes obratuje pod omejitvenimi pogoji, ki jih je zahtevalo in definiralo vodno gospodarstvo. Zato HE Elektroenergetski sistem ne more uporabljati tako, kot to objekt omogoča. S povečanjem instaliranega pretoka in s tem moči, pa postajajo dani omejitveni pogoji tako ostri, da je HE v svojem obratovanju pod današnjimi pogoji tako hendikepirana, da vložek v novo ni upravičen, pa tudi možnosti, ki jih, kot edina slovenska HE s tedensko akumulacijo lahko nudi sistemu, niso izkoriščene (tudi nova HE ne rabi izravnalnega bazena za njeno *tehnično obratovanje*, ampak le ta služi izključno za omilitev razmer v strugi dolvodno od izravnalnega bazena, nastalih zaradi obratovanja HE).

Posebej so bile analizirani različne možnosti lokacije pregrade, velikosti in načina izvedbe izravnalnega bazena, kar je bilo naknadno še dodatno prikazano tudi kot posebni elaborat z naslovom »Razlogi proti zmanjšanju izravnalnega bazena«, IBE, marec 2000.

Opis variantnih rešitev je podan v primerjalni študiji variant, narejeni v sklopu lokacijskega načrta za sanacijo in doinstalacijo HE Moste. Na podlagi predloga MGD in odločitve zadolženih resorjev vlade je bila kot edina možna varianta sanacije izbrana predlagana varianta z izgradnjo nove strojnice za polno instalacijo za kar je projektant HE izdelal tudi idejni projekt, ki je bil osnova za izdelavo lok. načrta. Pri izdelavi so bile upoštevane vse navedene usmeritve iz uradno prikazanih pogojev in zahtev, razen tistih, ki so popolnoma onemogočala načrtovan način obratovanja HE. Tekom samega postopka in že prej pri izdelavi idejnega projekta kot tudi v sklopu odgovorov na vprašanja z javnih razprav je bilo prostoru ponujeno sodelovanje za pripravo usklajenih rešitev s tem, da je možno:

Prikaz možnih variant sistema HE Moste I in II



- v turistični sezoni omejiti obratovanje HE tako, da nihanje ne preseže 1m, kar je sprejemljivo tudi za turistično rabo zajeznega prostora v kolikor se za to odločijo
- možno je tudi izvesti posege v prostor tako, da se prizadete dele renaturira (tu se seveda izključuje turistična raba, za kar pa se morajo odločiti krajani)

- v kolikor pride do turistične rabe so možne raznorazne prilagoditve izvedbe bročin, nasipavanja itd. (opomba: projektant in SEL do sedaj nista dobila niti enega predloga za vsklajevanje, niti odgovorov na ponujene možnosti s strani ljudi, ki kritizirajo projekt z izgovorom, da nismo pripravljeni na kompromisne rešitve).
- ponujen je bil tudi odkup dela zemljišča kjer se nahajajo še ohranjena mokrišča, a kljub dogovoru ni bilo realizacije s strani varstva okolja

Tekom samega postopka se je vedno poudarjalo, da je potrebno ugotoviti, kaj pomeni. Če se izravnalni bazen ne izgradi, kljub tolmačenju projektanta, da je to že bilo obdelano v sklopu predhodnih variantnih rešitev za doinstalacijo. Narejena je bila naknadna študija z naslovom **«ocena sanacije in doinstalacije HE Moste brez izravnalnega bazena» (izdelana v variantah)**, katera je bila revidirana s strani SEL, MGD in MOP (posebna revizijska komisija), ki je potrdila ugotovitve iz študije:

- *izgradnja nove HE brez bazena ni sprejemljiva iz naravovarstvenih vidikov*
- *izgradnja nove HE brez bazena z današnjimi pogoji pri obratovanju in približno isti instalaciji pa je ekonomsko nesprejemljiva zaradi zmanjšane moči in omejitev pri obratovanju, ki pomenijo čisto drugačno ceno za proizvedeno energijo*

Da bi imelo SEL vpogled v dogajanje na obstoječem objektu in prognozično stanje glede možnosti nadaljnjega obratovanja obstoječe elektrarne, so, na podlagi dosedanjih meritev, naročile izdelavo študije **»Riziki pri obratovanju HE Moste«**, kot prvo fazo študijskega dela, ki naj nakaže eventuelne možnosti ohranitve energetske lokacije. Rušenje pregrade bi zahtevalo velike dodatne sanacijske ukrepe v akumulacijskem bazenu, strugi dolvodno ter objektih elektrarne, kot tudi izjemna finančna sredstva (ocenjeno na cca 140 milj. DEM). Rezultati študije kažejo, da se ob današnjem trendu naraščanja deformacij konstrukcije lahko pričakuje zaustavitev obratovanja HE v roku med 2 in maksimalno 5 leti.

3. ZAKLJUČEK

V tem prispevku smo omenili samo sprejeta študijska in projektna dela, ki so nastala na podlagi *ogromnega števila variantnih rešitev*, ki so bila izvedbeno možna. Proučenih je bilo še večje število variantnih rešitev, ki pa so bila opuščena iz različnih, geoloških ali izvedbenih pogojev in jih tudi nismo posebno evidentirali in opisali. Zavedati se moramo, da smo, v primerjavi z ostalimi posegi v prostoru, znatno bolj omejeni, saj nam je energetskega vir reka Sava, ki ima svoj tok na katerega smo pri projektiranju vezani. V tem prostoru je bilo analiziranih že toliko variantnih rešitev, da praktično ni možno več najti alternativne rešitve, ki bi zadoščala danim vodnogospodarskim in okoljevarstvenim, vedno ostrejšim zahtevam. Možne so edino nealternativne možnosti, kot so izvedba pragov, kar je bilo tudi analizirano s posebno študijo in ne rešujejo problematike vodnih obratovalnih valov. Pri tem samo stabiliziramo dno struge, bregovi pa so še vedno – tako kot danes podvrženi bočni eroziji zaradi nihanja nivojev vode v strugi. Te rešitve so bile analizirane za sanacijo obstoječega stanja v strugi pri sedanji instalaciji, pri čemer sta vprašljiva potreben obseg del, da bi bil efekt zadovoljiv in strošek, ki ne prinaša nobene ekonomske koristi iz katere bi se lahko črpal.

Kot poznavalci celotnega dogajanja in kot edina pooblaščenca organizacija v Sloveniji za projektiranje hidroenergetskih in hidrotehničnih objektov, **lahko trdimo, da alternativne možnosti predlagani rešitvi sanacije in doinstalacije HE Moste z izgradnjo izravnalnega bazena in povečanjem instaliranega pretoka ter istimi gospodarskimi učinki ni.**

4. VIRI

Dokumentacija izdelana za potrebe priprave izvedbe projekta vključno z nivojem idejnega projekta (IBE, 1997)

Tehnične rešitve in karakteristike doinstaliranega sistema HE Moste

Krešimir Kvaternik, univ.dipl.inž.gradb.
projektant, IBE, d.d. Ljubljana, Hajdrihova 4

Povzetek

Obnova in doinstalacija sistema HE Moste je potrebna iz več vzrokov. Koncept obnovljenega sistema je določen na osnovi dveh osnovnih izhodišč: varovanje vodnega režima Save in potrebe elektroenergetskega sistema, t.j. možnosti plasmaja proizvodnje v ostrih pogojih nastajajočega trga z električno energijo. Tehnične rešitve posameznih objektov temeljijo na tehničnih, prostorskih, okoljskih in ekonomskih optimizacijah.

Summary

Upgrading and refurbishment of the HPP Moste system is mandatory for many reasons. By determination of the uprated system concept two basic starting points have been considered, namely protection of the Sava river water regime as well as requirements of the electric power system, i.e. possibilities of the power output emplacement in severe conditions of the newly founding market of electrical energy. Technical solutions of individual structures are based on technical, space, environmental and economic optimisations.

1. UVOD

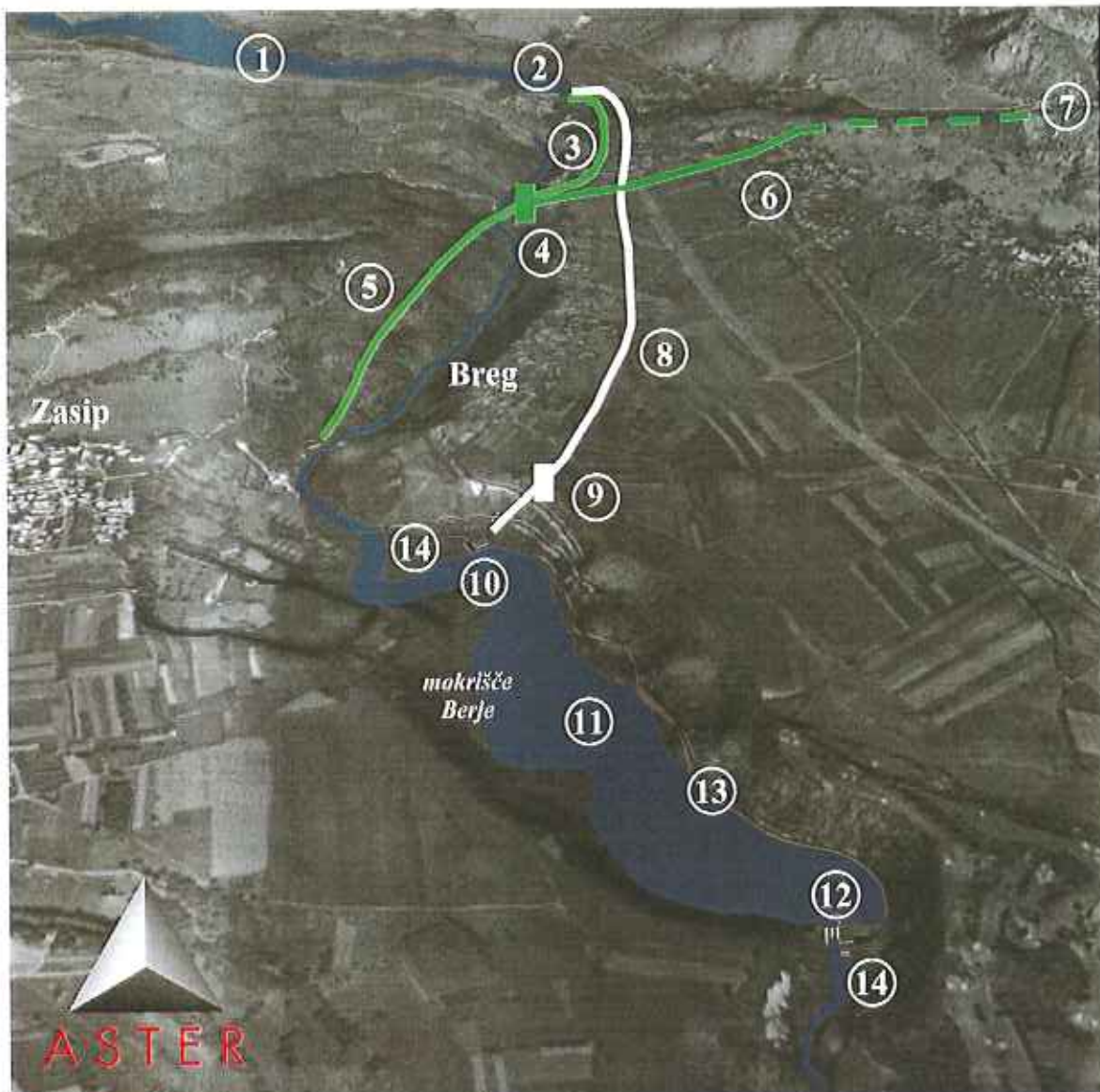
Obnova in doinstalacija sistema HE Moste je potrebna iz več vzrokov, o katerih je bilo več povedano v drugih prispevkih.. Ti vzroki skupno z geološkimi in morfološkimi razmerami opredeljujejo tudi osnovna izhodišča za zasnovo sistema in izbiro tehničnih rešitev. To so predvsem

- razmere v slovenskem elektroenergetskem sistemu (EES), ki potrebuje zelo »elastične« objekte sposobne slediti hitrim nihanjem porabe (zagotavljanje sekundarne regulacije frekvence), zagotavljati rezervno moč in energijo ter dobavljati energijo v urah največje porabe, za kar so najbolj primerne akumulacijske elektrarne,
- okoljevarstvena problematika, kar pomeni omilitev posledic dolgoletnega obratovanja HE Moste v dnevnem vršnem režimu v Savi ter v prihodnje še bolj izrazitega vršnega obratovanja in obratovanja v režimu sekundarne regulacije frekvence.

Zato je obnova in doinstalacija sistema HE Moste zasnovana tako, da so ob več kot 2x povečani moči mogoči zelo hitri manevri, t.j. hitro spreminjanje moči oz. pretoka v skladu s potrebami EES, brez posledic na vodni režim v Savi dolvodno od elektrarne, saj bi se nagle spremembe pretokov izravnale v izravnalnem bazenu. Osnovni sklopi objektov obnovljenega sistema HE Moste so:

- akumulacijski bazen in pregrada HE Moste
- HE Moste II
- izravnalni bazen in HE Moste III
- HE Završnica

in so skupno z obstoječimi objekti prikazani na naslednji sliki.



Slika 1: Sistem HE Moste. 1 – akumulacijski bazen HE Moste, 2 – pregrada HE Moste, 3 – dovodni sistem, 4 – strojnica HE Moste, 5 – odvodni tunel, 6 – dovodni sistem HE Završnica, 7 – akumulacija HE Završnica, 8 – dovodni sistem HE Moste II, 9 – vodostan, 10 – strojnica HE Moste II, 11 – izravnalni bazen, 12 – pregrada izravnalnega bazena in strojnica HE Moste III, 13 – dostopna cesta, 14 – nadomestni mokrišči

Osnovne značilnosti obnovljenega sistema bi bile naslednje:

	IIE Moste II	HE Moste III
Instalirani pretok (m ³ /s)	70	40
Nazivni neto padec (m)	68,5	14,0
Največji padec (m)	71,1	16,0
Nazivna moč na pragu (MW)	41,9	4,8
Največja moč na pragu (MW)	43,9	5,5
Srednja letna proizvodnja (GWh)	69,2	28,9
Prostornina. akumulacijskega oz. izravnalnega bazena (mil m ³)		
- celotna	6,86	2,77
- koristna	3,93	1,46
Število agregatov	2	2
Tip turbine	Francis	Kaplan
Investicija - dec 1997 (DEM)	134.000.000	

EES bi z doinstalacijo sistema HE Moste (skupno z agregatom HE Završnica) pridobil:

	obstoječe	ново	povečanje
Maksimalna moč	21	56	35 (167 %)
Srednja letna proizvodnja (GWh)	64	104	40 (62 %)
Koristna akumulacija (mil m ³)	3,12	3,93	0,83 (26 %)

2. AKUMULACIJSKI BAZEN IN PREGRADA HE MOSTE

Osnovni posegi pri akumulacijskem bazenu in pregradi so vezani predvsem na

- zagotavljanje varnosti pregrade (aktiviranje talnega izpusta, sanacija betonskih konstrukcij),
- zvišanje kote najvišje obratovalne gladine za 1,25 m (postavitev zapornic na kroni pregrade, zavarovanje objektov v vplivnem območju nadvišanja),
- ekološko sanacijo (ureditev deponije odpadnih produktov Acroni-ja, odstranitev naplavin ob talnem izpustu pregrade),
- izboljšanje poplavne varnosti objektov v korenu zajezitve akumulacijskega bazena.

2.1 Akumulacijski bazen

Po današnjem vodnogospodarskem soglasju elektrarna obratuje tako, da gladina v akumulacijskem bazenu niha med kotama 524,75 in 518,50, v izjemnih primerih tudi do kote 510. Ob visokih vodah je maksimalna gladina 527,00. Konfiguracija terena in okoliščina, da v vplivnem območju bazena ni veliko objektov, dovoljuje zvišanje najvišje obratovalne gladine na koto 526. Tako bi bila koristna prostornina akumulacije povečana na 3,9 mil. m³ kar bi nadomestilo del prostornine akumulacije, izgubljen zaradi uscdanja sedimentov. V vplivnem območju višje obratovalne gladine bi bilo potrebno zaščititi ali nadomestiti nekaj stanovanjskih in komunalnih objektov. Obenem bi bila izvedena sanacija in končna ureditev deponije odpadnih produktov Acroni-ja.

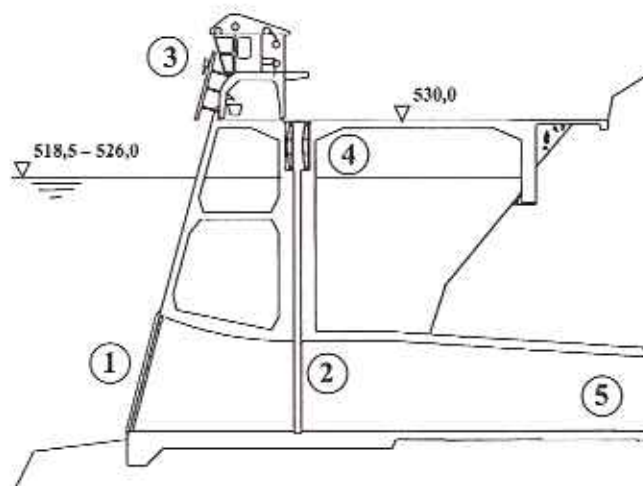
2.2 Pregrada

Pregrada HE Moste je bila v zadnjih letih večinoma že sanirana. Za normalno in varno obratovanje je potrebno aktivirati talni izpust. Dodatna zapornica na talnem izpustu, ki omogoča pregled in remont glavne zapornice brez praznitve akumulacije, kar je v preteklosti zaradi izpusta onesnaženih sedimentov povzročilo ekološko katastrofo v Savi, je že izvedena, vendar ni dobila vodnogospodarskega soglasja za obratovanje. Zato je vtok v talni izpust zasut s sedimenti, ki jih je pred aktiviranjem izpusta potrebno odstraniti. Predvidena je odstranitev približno 2000 m³ sedimentov s črpanjem in odlaganjem na urejeni stalni deponiji. Zvišanje kote najvišje obratovalne gladine v akumulacijskem bazenu je predvideno s štirimi regulacijskimi tablastimi zapornicami na kroni pregrade. Ob povečani akumulaciji, ki bi omogočila tedensko izravnavo pretokov tudi pri povečani instalaciji in povečanem padcu elektrarne, bi zapornice povečale poplavno varnost objektov ob bazenu.

3. HE MOSTE II

3.1 Vtok v dovodni tunel

Lokacija novega vtočnega objekta bi bila na levem bregu akumulacijskega bazena, nekaj 10 m gorvodno od obstoječega vtočnega objekta. Predvidena je armirano-betonska konstrukcija z razširjenim vtočnim delom pravokotne oblike z rešetko in pomožno zapornico. Čistilni stroj bi istočasno posluževal tudi pomožno zaporo (možna je tudi izvedba zapornice z lastnim pogonskim mehanizmom). Dostop do novega vtočnega objekta bi bil iz levega boka pregrade.



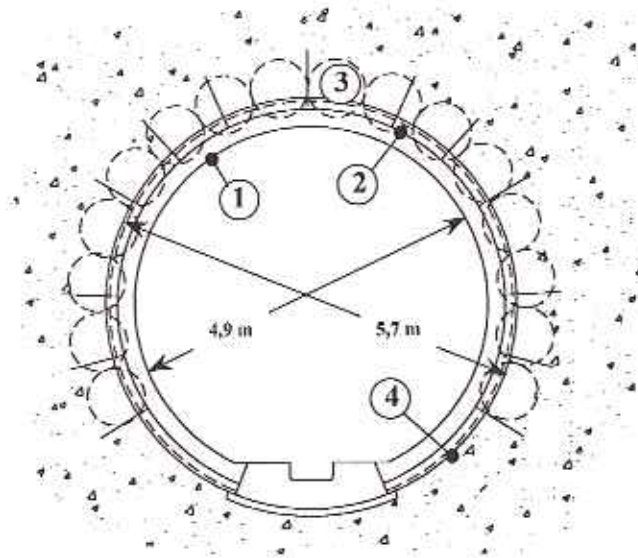
Slika 2: Vtok v dovodni tunel. 1 – vtočne rešetke, 2 – pomožna zapora, 3 – čistilni stroj, 4 – deponija elementov pomožne zapore, 5 – dovodni tunel

3.2 Dovodni tunel in vodostan

Dovodni tunel bo od vtoka do doline Završnice potekal v dolomitih, potem do strojnice v zgornjesavski terasi, kjer je gramoz mestoma vezan v konglomerat in je naložen na plast terciarne

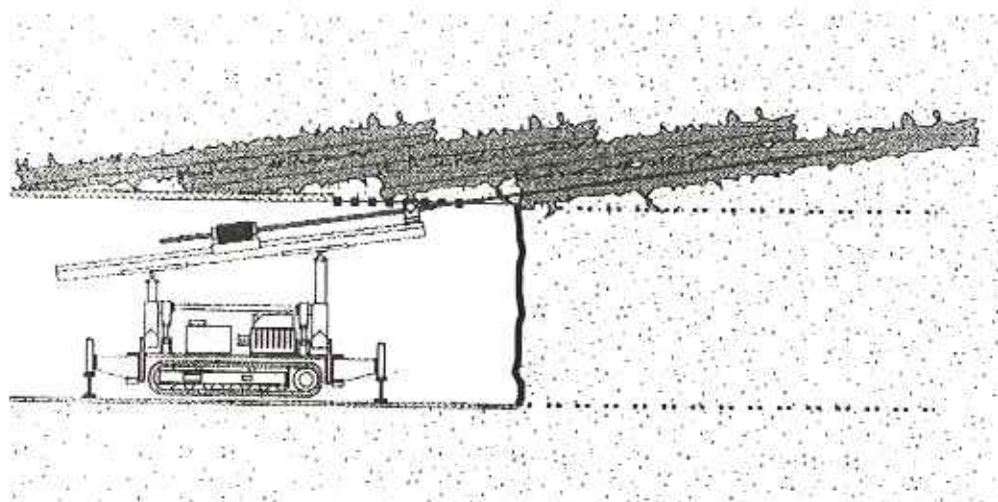
gline - sivice. Trasa tunela je speljana mimo vasi Breg in se zaradi morebitnih vplivov na površini terena pri izgradnji izogiba objektom. Tunel bo okroglega prereza svetlega premera 4,9 m z armiranobetonsko oblogo. Dolžina dovodnega tunela je 2655 m. Nadkritje tunela je razmeroma majhno, le 15-20 m. Na koncu dovodnega tunela je vkopan vodostan premera cca 30 m in višine cca 38 m, ki štiti dovodni tunel pred obremenitvami zaradi prehodnih pojavov ob turbinskih manevrih. Od vodostana do strojnice je predvidena izvedba jeklenega tlačnega cevovoda v tunelu, premera 4,5 m in dolžine 158 m, ki je deloma izveden v tunelu in deloma vkopan.

Specifičnost dovodnega tunela je izvedba v nevezanih materialih. V idejnem projektu je predvidena metoda, ki v Sloveniji še ni uporabljena pri tako dolgih tunelih. Izkop tunela bi se izvajal pod zaščito svoda iz jet-groting pilotov injektiranih po obodu linije izkopa (sliki 3 in 4). Kot primarna podgradnja je predvidena obloga iz pnevmatskega betona armiranega z jekleno mrežo, po potrebi tudi jeklene podpore razprete z betonsko talno ploščo, ki bi služila tudi kot vozišče v času izvedbe. Zaradi velikega števila operacij in uporabe različnih tehnologij in mehanizacije pri izkopu bi bila hitrost napredovanja del razmeroma majhna, v povprečju le 1,6 m/dan. Izvedba dovodnega tunela je na kritični poti v terminskem planu, zato je predviden izkop iz obeh strani, kako bi se čas izvedbe čim bolj skrajšal. Po izkopu tunela bi bila izvedena končna obloga iz armiranega betona debeline 35 cm.



Slika 3: Prečni prerez dovodnega tunela. 1 – končna armiranobetonska obloga, 2 – primarno podgrajevanje (podporc, mreža, torkret), 3 – jet-groting piloti, 4 – linija izkopa

Analizirane so bile še druge metode izkopa, npr. s TBM strojem, s katerim so pri izvedbi tunelov HE Plave in Doblar dosežene velike hitrosti izkopa (tudi do 50 m/dan). Pri HE Moste bi geološke razmere (prisotnost konglomeratov in samice) uporabo TBM precej otežile (glava stroja je za izkope v vezanih in nevezanih materialih različna, vendar jih med delom ni možno menjavati). Drugi razlog, ki ni v prid uporabi TBM, je dejstvo, da primarna montažna obloga tunela ne bi bila dovolj nosilna in vodotesna. Zaradi slabih geomehanskih karakteristik hribina ne bi dovolj sodelovala pri prevzemu obremenitev, montažne obloge pa ni možno izvesti tako, da prevzame popolno obremenitev zaradi vodnega pritiska. Zato bi bilo potrebno izvesti tudi dodatno nosilno armiranobetonsko oblogo. To bi bistveno podražilo stroške izvedbe.



Slika 4: Princip izvedbe zavarovanja izkopa v nevezanih in slabo vezanih materialih z jet-grouting piloti

Strojnica. Lokacija strojnica je na spodnjesavski terasi, na brežini predvidenega izravnalnega bazena. V strojnici bosta nameščeni dva vertikalna agregata s francisovima turbinama in ostala elektrostrojna oprema. Tudi ta strojnica bi bila temeljena, enako kot obstoječa, v sivici, vendar je razlika v tem, da bi bila strojnica nadzemna. Vkopan bi bil le spodnji, masivni blok strojnice, na katerem nabrekanje sivice ne bi povzročilo škode. Ob izvedbi bi bilo potrebno posvetiti posebno pozornost temeljenju, kako bi se vplivi sivice, od katerih bilo najbolj nevarno neenakomerno posedanje ali celo dviganje strojnice, zmanjšali na najmanjšo možno mero.

4. IZRAVNALNI BAZEN IN HE MOSTE III

4.1 Izravnalni bazen

Prostor za izravnalni bazen določajo potrebna prostornina za izravnavo vodnih količin tj. obratovanje HE Moste, geološke in morfološke značilnosti terena, obstoječa infrastruktura in ne na zadnje naravne danosti, ter raba prostora. Edini možni prostor za izravnalni bazen je dolina Save Dolinke med Piškotarjevimi in ožino gorvodno od Blejskega mostu, v kateri je primeren profil za izgradnjo pregrade.

Zajezena gladina bo pri maksimalni koti 452 m n.m. segala do izliva HE Zasip. Normalna denivelacija je predvidena do kote 448 m. Celotna prostornina bazena je 2,77 mil m³, koristna 1,46 mil. m³. Maksimalni razpoložljivi obseg nihanja gladine je 4 m, vendar bo dnevni razpon nihanja večinoma med 1,5 in 2 m.

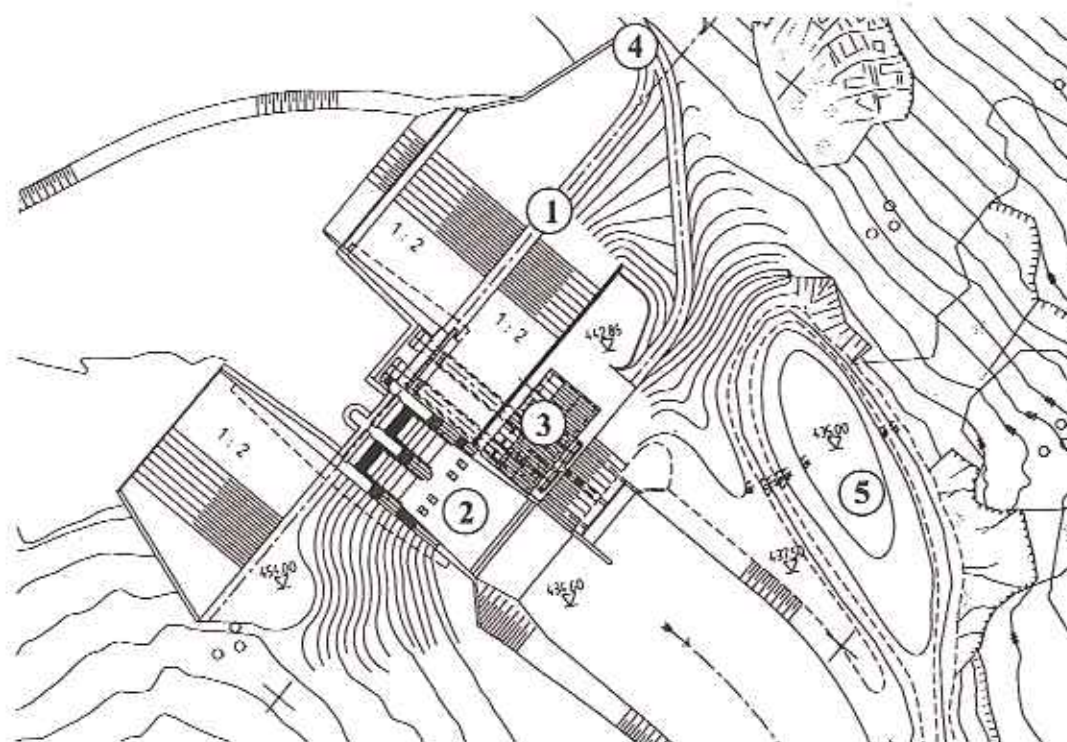
Zaradi nihanja gladine bi se lahko pri najnižji obratovalni koti pokazalo dno v korenu bazena. Zato bi bilo potrebno dno poglobiti pod najnižjo obratovalno koto (predvidoma do kote 447), brežine pa z nasipavanjem in poglobitvami urediti tako, da je širina brežine v območju nihanja gladine čim manjša. Prečne izravnave zemljišča so predvidene tako, da bo minimalna višina terena ob bazenu vsaj 1 - 1,5 m nad maksimalno koto polnitve.

Novc brežine v območju nihanja bodo zaščitene pred izpiranjem s filtrom in skalometno zaščito. Prav tako bo zaščiten tudi dno struge dolvodno od Piškotarjevega mostu v odseku, kjer je predviden konec poglobljenega dela bazena. Višinska razlika med poglobljenim in naravnim dnom bo premagana s hrapavo skalometno drčo.

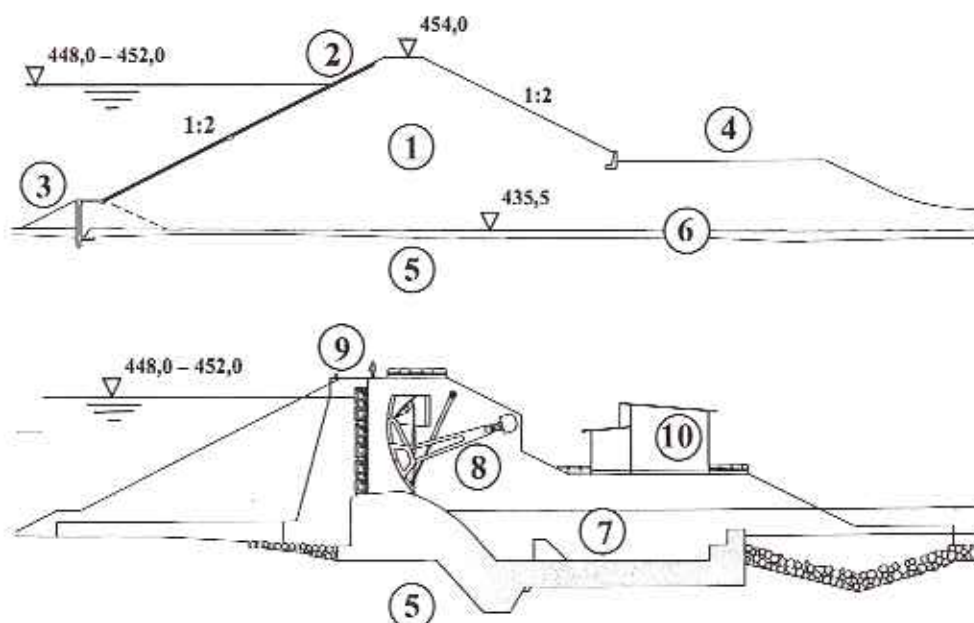
Na levem bregu je predvidena dostopna cesta med strojnico HE Moste II in pregrado izravnalnega bazena.

4.2 Pregrada izravnalnega bazena, pretočna polja in strojnica HE Moste III.

Pregrada izravnalnega bazena je predvidena v najožjem delu doline Save pred Blejskim mostom. Z ozirom na predvidene geološke in morfološke karakteristike terena je predvidena izvedba nasute homogene pregrade z gorvodno tesnilno oblogo iz visoko aeriranega betona, ki je v peti pregrade povezana s tesnilno diafragmo. Dolžina pregrade je 180 m in širina krone 4 m. Največja višina nasutega dela pregrade je 18,5 m in največja višina od krone do temeljev prelivnih polj (konstruktivna višina) 24 m. Po vseh kriterijih bi bila pregrada uvrščena v kategorijo velikih pregrad. Naklon brežin je 1:2. Dinamične analize, ki jih je izvedel IZIIS so pokazale, da bi bilo možno predvideti še večji naklon, vendar je zaradi razmeroma majhnega prihranka materiala, večje erozijske odpornosti površin, enostavnejše izvedbe in vzdrževanja izbran naklon 1:2.



Slika 5: Pregrada izravnalnega bazena. 1 – kрона pregrade, 2 – prelivna polja s podslapjem, 3 – strojnica HE Moste III, 4 – dostopna cesta, 5 – nadomestno mokrišče



Slika 6: Pregrada izravnalnega bazena. 1 – nasuti del pregrade (gramozni material), 2 – gorvodna tesnitev, 3 – pomožna pregrada in tesnilna diafragma, 4 – plato ob strojnici III Moste III, 5 – sivica, 6 – aluvij, 7 – podslapje, 8 – glavna zapornica, 9 – pomožna zapornica, 10 – strojnica III Moste III

Temeljenje pregrade je predvideno delno na aluvialnem prodnem zasipu, pod katerim se nahaja sivica in delno na sivici. To je bil tudi osnovni razlog za izbiro gorvodne tesnitve, ker je tako kljub razmeroma nizkim strižnim kotom sivice na kontaktu s temeljno ploskvijo pregrade dosežena zadostna stabilnost pregrade. Tesnjenje tal pod pregrado je predvideno na gorvodni peti kot tesnilni zid in tesnilna diafragma do nepropustne podlage v bokih pregrade. Nasuta pregrada vsekakor ponuja največ možnosti tudi za vklapljanje v naravno okolje.

Zaradi malih možnosti za superzajezbo ob visokih pretokih ter omejenega prostora za izvedbo dolgih fiksnih prelivov je predvidena evakuacija visokih voda skozi dve betonski prelivni polji v telesu pregrade opremljenima s segmentnima zapornicama. Zaradi zahtevanih razmeroma ostrih varnostnih kriterijev v strugi Save neposredno pod pregrado bo oblika podslapja prikazana na sliki modificirana na osnovi fizikalnih modelnih raziskav.

Ob prelivnih poljih je predvidena strojnica z dvema enakima agregatoma z instaliranim pretokom $2 \times 20 \text{ m}^3/\text{s}$. Temeljenje strojnice in prelivnih polj je prav tako v sivici.

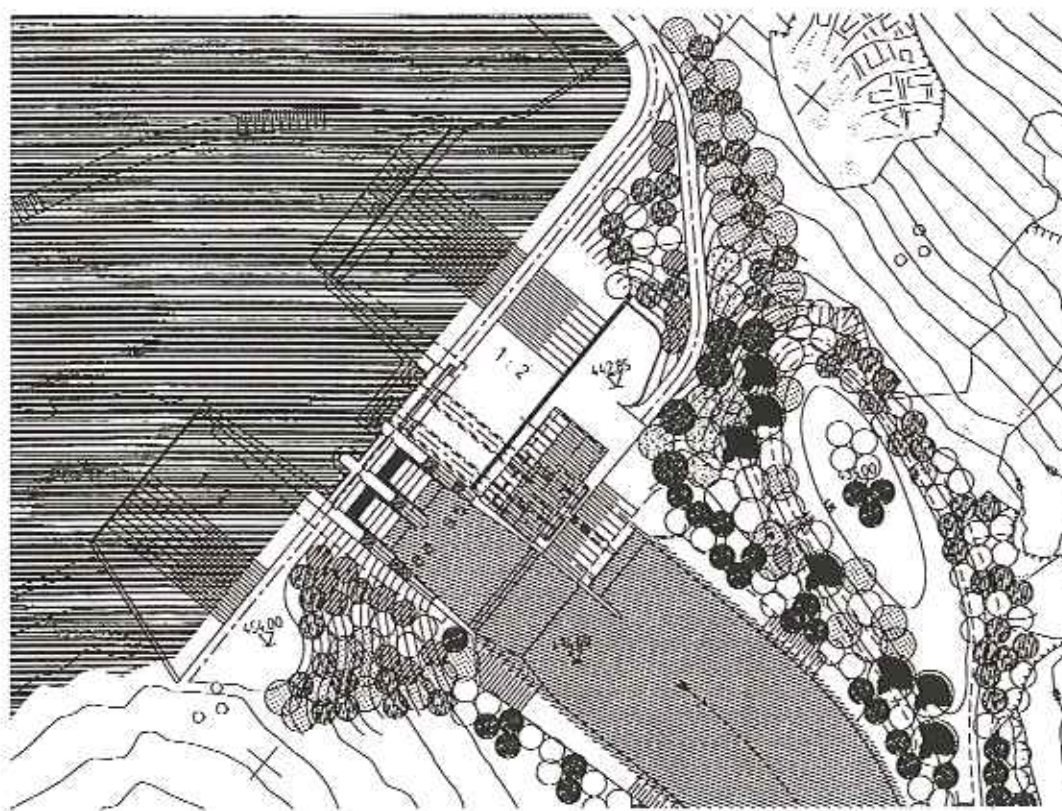
5. KRAJINSKE UREDITVE

V idejnem projektu so prikazane tudi krajinske ureditve.

Vse površine prizadete med gradnjo z nasipi ali izkopi bodo rekultivirane, oz. pripravljene za naravno sukcesijo. V območju izkopov bodo posamične plasti zemljine previdno odstranjene in

ločeno odločene do vgraditve. Nasutje bo izvedeno tako, da bo nova struktura tal približno ustrezala naravni. Za vse ureditve (izkopi, nasipi, zaščite) je predvidena uporaba lokalnih materialov, kar bo skupno z zasaditvijo avtohtonih rastlin in oblikovanjem površin omogočilo čim boljše vklapljanje v okolje in naravno sukcesijo na večini prizadetih površin. Ta princip velja tudi za vse ostale posege predvidene v okviru doinstalacije HE Moste (vodostan, strojnica, pregrada izravnalnega bazena). Zasaditvena zasnova je del idejnega projekta.

Pri projektu sanacije in doinstalacije HE Moste je prvič v Sloveniji že v zgodnjih fazah načrtovanja na osnovi biološke inventarizacije predvidena izvedba nadomestnih biotopov (izraz popolnoma ne ustreza, saj narave dejansko ni možno nadomeščati), ki naj bi omogočili naravno sukcesijo v smeri razvoja novih mokriščnih biotopov.



Slika 7: Krajinska ureditev okolice pregrade izravnalnega bazena

6. LITERATURA

- Sanacija in doinstalacija HE Moste, Idejni projekt, IBE Ljubljana, 1997



Slika 8: Pogled na izravnalni bazen in pregrado
(računalniški 3D model, ASTER Ljubljana)



Slika 9: Pogled na pregrado izravnalnega bazena in HE Moste III

Geološko - geomehanske razmere na lokaciji HE Moste

Danica Peček, univ.dipl.inž.gr.
Geoinženiring d.o.o., Dimičeva 14, Ljubljana

Povzetek

V referatu so na kratko predstavljeni objekti, ki bodo zgrajeni v okviru sanacije in doinstalacije HE Moste. Opisane so geološke in geomehanske raziskave za fazo IP in projekta PGD-PZI, ter navedeni nekateri rezultati terenskih in laboratorijskih preiskav. Posebej so obdelane laboratorijske preiskave sivice. Sivica je oligocenska morska glina, litološko pa peščen meljevec s prehodi v glino.

Geological and geomechanical condition at the Moste HPP Summary

In the article, constructions to be erected within the frame of the refurbishment and upgrading of the Moste HPP are briefly introduced. Geological and geomechanical investigations for the preliminary, tender and final design are described and some of the results of site investigations and laboratory tests are quoted. The laboratory tests of sivica are especially discussed. Sivica is by origin, Oligocene sea clay and, by lithology, sandy silt stone passing to clay.

1.0 KRATKA PREDSTAVITEV OBJEKTOV

1.1 Most in vtočni objekt

Dostop do vtočnega objekta je predviden po cesti širine 5 m, dolžine 60 m, ki bo potekala preko novega mostu od obstoječe pregrade (kota ceste 531 m) do vtočnega objekta (kota ceste 530 m) na levem bregu akumulacije. Most bo predvidoma temeljen na treh podporah, plitvo (podpora ob pregradi) oz. globoko (ostali dve podpori) na AB pilotih premera ϕ 150 cm, uvrtenih v tektonsko pretrti dolomitizirani apnenec in milonitizirani dolomit.

Vtočni objekt širine 10 m, dolžine 30 m in višine 21 m na začetku dovodnega tunela bo temeljen na AB Benotto pilotih v apnencu in dolomitu cca 13 m pod predvideno koto vtoka v dovodni tunel 509 m. Kota najnižje obratovalne gladine bo znašala 518 m, kota najvišje gladine 526 m.

1.2 Dovodni tunel

Dovodni tunel dolžine okoli 2850 m bo betonske izvedbe in profila ϕ 4,90 m na odseku od vtočnega objekta (stacionaža 0 m) do vodostana (stacionaža 2650 m) oziroma jeklne izvedbe in profila ϕ 4,50 m na odseku od vodostana do strojnice HE Moste II (stacionaža 2850 m). Potekal bo vzporedno s strugo Save. V stacionaži cca 350 m bo prečkal strugo Završnice. Zapornična komora je locirana v stacionaži cca 2750 m.

Kota dna dovodnega tunela na lokaciji vtočnega objekta znaša cca 509 m, na lokaciji vodostana 483 m, na lokaciji zapornične komore 467 do 460 m in na lokaciji strojnice HE Moste II 444 m.

Dovodni tunel bo potekal skozi naslednje materiale :

- do stacionaže 50 m skozi tektonsko cono, ki jo gradi grušč apnenca, dolomita, laporja in skrilavega glinovca, z vezivom zaglinjenega peska do peščene glince,
- med stacionažo 50 in 180 m skozi milonitizirani dolomit,
- med stacionažo 180 in 310 m skozi dolomitizirani apnenec,
- med stacionažo 310 in 450 m skozi prodne zemljine,
- med stacionažo 450 in 1350 m skozi prodne zemljine z vložki slabo vezanega konglomerata in sprijetega proda,
- med stacionažo 1350 in 2650 m (vodostan) skozi prodne zemljine,
- med stacionažo 2650 in 2750 m (komora) skozi prodne sedimente in sedimente talne morene,
- do nove strojnice HE Moste II v stacionaži cca 2850 m v sivici.

1.3 Vodostan

Vodostan je predviden kot vkopana AB cilindrična konstrukcija. Kota terena znaša 531 m. Objekt bo do globine 24,5 m premera 26,5 m, do globine 36,5 m premera 12,5 m in do globine 48 m premera 5 m. Do globine 46 m je pričakovati zelo goste prodne zemljine, do globine 52 m pa vodonosne peske, melje in glince. Sivica je bila registrirana 54,5 m pod površjem.

1.4 Zapornična komora

Zapornična komora bo locirana v pobočju na cesti Breg – Zasip in bo dimenzij cca 10 m x 13,5 (27,0) m. Temeljena bo stopničasto, na AB plošči, v sedimentih talne morene in sivici. Kota terena na lokaciji objekta znaša 469 m, kota temeljenja v smeri padnice pobočja bo 467 m do 460 m (2 do 9 m pod cesto).

1.5 Strojnica HE Moste II

Strojnica HE Moste II je locirana na spodnjesavski terasi na koti cca 450 m. Zunanji grobi gabariti strojnice so 37 m x 25 m brez sifonskega dela, ki je dolg približno 40 m in širok 19 m. Dimenzije vkopanega dela strojnice, v katerem se nahajata dve Francisovi turbini, sta cca 25 m x 25 m. Ta del bo temeljen med kotama 438 m in 442 m v sivici (8 do 12 m pod površjem), prizidek z montažnim platojem pa na koti 450 m v aluvialnih (prodno peščeno meljnih) sedimentih. Kota nasipnega platoja na lokaciji novega objekta bo znašala 454,50 m, kota maksimalne zgornje vode pa 452 m. Dno struge Save je na koti 447 m. Za preprečitev dotoka vode v gradbeno jamo je predvidena izvedba tesnilne zavese do podlage na zahodni, južni in vzhodni strani novega objekta.

1.6 Pregrada in strojnica HE Moste III

Približno 1500 m dolvodno od strojnice HE Moste II se dolina Save Dolinke zoži na cca 100 m, nato pa spet razširi. V tem zoženem delu struge je predvidena izgradnja prograde, ki bo omogočala kompenzacijo vode za vršno obratovanje strojnice HE Moste II. Zajezena voda bo dosegla

maksimalno koto 452 m (normalna denivelacija 448 m). Celotna prostornina kompenzacijskega bazena bo znašala cca 3 milijone m³ (koristna 1,5 mio m³).

Pregrada izravnalnega bazena je predvidena kot nasuta pregrada s koto krone 454 m in naklonom brežin 1 : 2. Pregrada bo naslednjih dimenzij : širina krone 4 m, dolžina pregrade v nivoju krone 160 m, višina pregrade 17 m, širina pregrade v vznožju 70 m. Temeljenje pregrade bo izvedeno v aluvialnem prodnem zasipu na koti 435 do 436 m. Na gorvodni strani je predvidena betonska obloga brežine, ki bo povzeta s tesnilno diafragma, izvedeno do vodoneprepustne podlage. Zračna stran pregrade bo zatravljena. Kota dna struge Save v pregradnem profilu je cca 437 m.

V pregradi bosta dve pretočni polji za evakuacijo visokih voda in vtočni objekt s cevovodom in strojnico HE Moste III. Objekti bodo temeljeni : vtočni objekt na koti 435 m v produ, prelivni polji in strojnica na koti 427 do 433 m v sivici (4 do 12 m površjem). Ob strojnici je predviden manipulativni plato na koti 442,5 m.

2.0 VRSTA RAZISKOVALNIH DEL

2.1 Raziskave za fazo izdelave idejnega projekta (1997)

Za potrebe izdelave idejnega projekta »HE Moste - Revitalizacija« so bile izvedene naslednje geološko – geotehnične raziskave :

- kartiranje, zbiranje in pregled obstoječih podatkov, fotogeološke analize in izdelava splošne geološke karte v merilu 1 : 5000 za področje velikosti cca 6 km²,
- prospekcija terena, pregled podatkov, fotogeološke analize in izdelava tektonske karte v merilu 1 : 25000 za področje velikosti 25 km²,
- zbiranje in pregled podatkov, kartiranje, nalivalni poskusi, meritve nivojev podtalnice in izdatnosti izvirov ter izdelava hidrogeološke karte v merilu M 1 : 5000 za področje velikosti cca 6 km²,
- geofizikalne raziskave (geoelektrično sondiranje, seizmične raziskave, down-hole meritve) z izdelavo kart reliefa podlage in debelin posameznih litoloških členov na lokaciji objektov (dovodni tunel, vodostan, zapornična komora, strojnica HE Moste II, pregrada s strojnico HE Moste III) in kompenzacijskega bazena, ter oceno dinamičnih elastičnih parametrov,
- kartiranje v območju kompenzacijskega bazena z izdelavo inženirsko geoloških kart v merilu 1 : 1000, ugotovitvijo potencialno nestabilnih brežin, in področij, potencialno primernih za odzem materialov za gradnjo nasipov ter betonske agregate,
- geotehnične raziskave : vrtanje enajstih (11) sondažnih vrtin na lokaciji objektov in izkop šestih (6) sondažnih jaškov v kompenzacijskem bazenu, odzem vzorcev zemljin in hribine, laboratorijske preiskave za določitev fizikalno mehanskih lastnosti zemljin in hribine, preiskave uporabnosti prodnih materialov za vgradnjo v nasipe in izdelavo betonov ter preiskave uporabnosti sivice za glinasti naboj, itd..

2.2 Raziskave za fazo izdelave projekta PGD - PZI (1998 - 1999)

Za potrebe izdelave projekta »Sanacija in doinstalacije HE Moste, faza PGD – PZI«, ki je nadaljevanje projekta »HE Moste – Revitalizacija«, so bila izvedena naslednja dodatna dela :

- geotehnične raziskave : vrtanje dvaindvajsetih (22) sondažnih vrtin, od tega deset (10) za objekte, ki niso bili raziskani v fazi IP, ali je bila njihova lokacija spremenjena, odvzem vzorcev zemljin in hribine, ter preiskave in meritve v vrtinah,
- inženirsko geološko kartiranje terena in izdelava inženirsko geoloških kart v merilu M 1 : 500 v območjih tki. napadnih mest za portale dovodnega tunela (lokacija vtočnega objekta, prečkanje struge Završnice, lokacija zapornične komore), za potrebe izdelave stabilnostnih analiz oz. predloga za ustrezno zavarovanje,
- povečan je bil obseg laboratorijskih preiskav sivice, izvedene so bile tudi nekatere nove preiskave (določitev modula elastičnosti in Poissonovega števila, poskus triaksialne preiskave, mineraloške rentgenske analize, itd.),
- vzorci prodnih zemljin iz petih (5) dodatno izkopanih jaškov na lokaciji vodostana in v območju kompenzacijskega bazena so bili detajlno preiskani glede uporabnosti za betone in vgradnjo v nasipe,
- izvedene so bile geotehnične raziskave tal (4 vrtine) v podslapju obstoječe pregrade HE Moste, ki se po podatkih meritev reperjev še vedno dviga (čas izgradnje 1949–1953, premiki 0,6-1,2 mm/leto), s predlogom sanacije,
- izvedene so bile geološko – geotehnične raziskave na Slovenskem Javorniku (cca 4 km gorvodno od obstoječe pregrade HE Moste) za potrebe izdelave hidravličnega modela precejanja vode (8 raziskovalno – piezometerskih vrtin), itd.

3.0 REZULTATI RAZISKOVALNIH DEL

3.1 Geologija

Geološka zgradba ozemlja je dokaj enostavna. Večji del terena prekrivajo kvartarni sedimenti, ki ležijo na oligocenski morski glini – sivici, le v severnem delu analiziranega področja (ob obstoječi pregradi) sta zastopana cordevolski dolomitizirani apnenec in milonitizirani dolomit, ki sta hkrati najstarejši kamnini.

Kvartarni sedimenti so razdeljeni na pleistocensko (fluvioglacialni in rečni terasni sedimenti) in holocensko obdobje (najmlajše terase, lehnjak, aluvialni nanosi, pobočni grušč, vršaji, recentni koriti Save in Radovne). Pleistocenski sedimenti so razvrščeni v štiri glavne terase (II., III., IV., V.), katere na severni polovici področja sestavljajo prodno peščene rečne plasti, ki so ob robovih savskega kanjona na več mestih sprijete v konglomerat. Na južni polovici področja se poleg rečnih prodno peščenih plasti nahajajo še ostanki fluvioglacialnih sedimentov, ki se pojavljajo v obliki talnih moren in jezerskih sedimentov. Na platojih II., III. in IV. terase so odložene čelne morene.

V območju kompenzacijskega bazena odkrite manjše golice sivice (redkeje talne morene) nad koto 460 m nakazujejo kontinuirano neprepustno podlago. Tudi področje bodoče pregrade (kota kronc pregrade 454 m) prekriva neprepustna oligocenska sivica, ki sega na desnem bregu Save do nadmorske višine cca 475 m, na levem bregu pa do višine cca 470 m. Debeline sivice na širšem območju znaša okoli 100 m.

Pri inženirsko geološkem kartiranju brežin kompenzacijskega bazena niso bili ugotovljeni plazovi (zdrsi brežin po sivici) in podori (odlomi konglomeratnih blokov s konglomeratnih robov), ki bi v večjem obsegu ogrožali kompenzacijski bazen. Evidentiran je bil plaz gruščica na sivici na levem bregu Save tik pod bodočo pregrado. Drugi večji plaz na desnem bregu Save cca 300 m zahodno od pregrade gradi preperela sivica, ki sega visoko pod rob prodne terase. Pobočja, kjer sivica izdaja ali se pojavlja v podlagi, je potrebno smatrati kot labilna do nestabilna. Podori na pregledanem območju niso veliki, niti pri kartiranju niso bila registrirana večja podorna območja.

3.2 Tektonika

Območje obstoječe pregrade HE Moste leži na Savskem prelomu. Južna meja Savskega preloma (tektonski kontakt med apnencem in sivico) ne kaže znamenj recentnih tektonskih premikov. Izdanki konglomerata IV. terase (starost vsaj 50000 let), ki leže neposredno na Savskem prelomu pod pregrado, ne kažejo znakov tektonske prepokanosti. Ker je Savski prelom v bistvu široka prelomna cona z več vzporednimi pregnetenimi conami, lahko manjši tektonski premiki potekajo po kateri od bolj severno ležečih ploskev. Geodetske meritve neotektonskih premikov v Kravankah kažejo na dviganje gorovja. Morebitni horizontalni premiki so majhni.

Severno od Savskega preloma, na območju južnih Karavank, poteka še več subvertikalnih prelomov, ki so vzporedni Savskemu. Takšen je Završniški (severno od preloma apnenc, južno od preloma sivica), ki se proti zahodu priključi Savskemu. Južno od Savskega preloma je več dinarsko usmerjenih prelomov, od katerih so najvažnejši Jeseniški, Zasipski in Kranjski. Premiki ob teh prelomih so zelo mladi, saj povzročajo razpoke samo v fluvio-glacialnih sedimentih.

3.3 Hidrogeologija

V okviru hidrogeoloških raziskav so bili izvedeni nalivalni in črpalni poskusi v štirih vrtinah, poleg tega pa so hidrogeologi cca 2 leti dvakrat mesečno spremljali nivo podzemne vode v devetih piezometrih in v treh vodnjakih v vasi Breg ter merili izdatnost izvirov v okolici objektov.

Nivoji podzemne vode so bili registrirani :

- v globini 9 do 20 m na lokaciji vtočnega objekta ob obstoječi pregradi (dno tunela 19 m pod površjem),
- v globini 28 do 32 m na odseku od vtočnega objekta do Završnice (dno tunela 46 do 57 m pod površjem),
- v globini 4 do 7 m v območju Završnice (dno tunela 6 do 9 m pod površjem),
- v globini 48 do 57 m na odseku od Završnice do vodostana (dno tunela 42 do 48 m pod površjem),
- v globini 6 do 8 m na lokaciji zapornične komore (dno tunela 8 do 10 m pod površjem),
- na območju strojnice HE Moste II niha nivo podzemne vode med površjem in globino cca 2 m, na lokaciji pregrade pa med površjem in globino cca 4 m.

Z nalivalnimi in črpalnimi poskusi in-situ določeni koeficienti vodoprepustnosti so :

- prod z vložki konglomerata $k = 1,44 * 10^{-6}$ m/s
- milonitizirani dolomit $k = 5,63 * 10^{-8}$ m/s
- dolomitizirani apnenc $k = 1,86 * 10^{-8}$ m/s
- zameljen in peščen prod $k = 1,78 * 10^{-5}$ do $3,37 * 10^{-6}$ m/s

Namen hidrogeoloških raziskav je bil podati smernice za projektiranje ter pridobiti izhodiščne podatke za ugotavljanje in analize eventualnih sprememb nivoja in kvalitete podtalnice po izgradnji objektov.

Končno hidrogeološko poročilo (oktober 1999) navaja, da podzemna voda ne bo predstavljala ovir za revitalizacijo HE Moste, in da bodo vsi geotehnični problemi, povezani s posegi v območjih, nasičenih s podzemno vodo, s pravilnim načrtovanjem posegov odpravljeni. Zaključki so :

Trasa dovodnega tunela od vtočnega objekta do kanjona Završnice (stacionaža 0 do 350 m) :

- iz kamnine s slabo do zelo slabo vodoprepustnostjo (tektonska cona, milonitizirani dolomit : $k < 10^{-7}$ m/s) je pričakovati slabše dotoke vode (izecjanje), ki ne bodo povzročali težav,
- zaradi možnosti vdora vode iz vodonosnih razpok v dolomitiziranem apnencu med stacionažo 200 in 315 m je potrebno predvrtavanje skozi čelo tunela,
- voda iz prodnega zasipa med stacionažo 315 in 350 m bo vplivala na stabilnost portalnega dela tunela (zaščita), odvajati pa jo bo možno s črpalkami ;

Trasa dovodnega tunela med Završnico in vodostanom (stacionaža 350 do 2650 m) :

- v tem delu dovodnega tunela je horizont podzemne vode povsod pod koto dovodnega tunela,
- možno je sicer precejanje vode v izkop iz prodno peščeno meljnih sedimentov, v odvisnosti od padavin (ocenjen max. dotok vode do 10 litrov na 100 m tunela, $k = 10^{-5}$ do 10^{-7} m/s), vendar dotok vode ne bo koncentriran,
- potrebna je vodotesna obloga ;

Trasa tunela od vodostana preko zapornične komore do strojnice II (stacionaža 2650 do 2850 m) :

- potrebno je zagotoviti stabilnost portala pri zapornični komori (bočno dreniranje),
- voda se bo v izkopu za tunel pojavljala na celotnem odseku od zapornične komore do vodostana, njen dotok pa lahko doseže nekaj litrov na sekundo,
- na odseku tlačnega cevovoda od zapornične komore do strojnice II (širok izkop, temeljenje v sivici) bo potrebna izvedba bočnih drenaž.

3.4 Geofizika

Geofizikalne raziskave so bile izvedene vzdolž trase dovodnega tunela, na lokaciji strojnice HE Moste II, na lokaciji pregrade s strojnico HE Moste III (levi in desni breg) in v kompenzacijskem bazenu. Namen raziskav je bil podati čimbolj realno obliko reliefa podlage ter debelino in oceno litološke sestave slojev nad podlago. Uporabljene so bile pretežno geoelektrične meritve, na lokaciji strojnice II in pregrade pa so bile poskusno izvedene tudi refrakcijske in down – hole meritve. Namen teh je bil ločevanje posameznih seizmičnih plasti na osnovi različnih hitrosti longitudinalnega (V_p) in transverzalnega valovanja (V_s) ter ocena dinamičnih elastičnih parametrov.

Glede na to, da so bile geofizikalne raziskave opravljene pred pričetkom vrtanja, so bili rezultati zelo pomembni za programiranje vrtnih del v fazi idejnega projekta in kasneje. Tako so npr.: pokazali, da v trasi dovodnega tunela od vtočnega objekta do zapornične komore ni računati s pojavom sivice v globini temeljenja (ocenjena globina podlage od 5 m na lokaciji Završnice in komore do cca 110 m približno na sredini dovodnega tunela, kota podlage 510 m–440 m–470 m).

Kar zadeva kompenzacijski bazen, je bilo ugotovljeno, da so aluvialne plasti zelo heterogene, njihova debelina pa znaša 1 do 3 m (izjemoma 3 do 11 m) na desnem oziroma 2 do 5 m na levem bregu Save. S pomočjo geofizike in inženirske geologije so bila določena območja, perspektivna kot nahajališča gradbenega materiala.

Z geofizikalnimi meritvami na lokaciji strojnica II in pregrade so bile ugotovljene debeline slojev nad podlago, Poissonova števila (ν) in dinamični moduli elastičnosti (E) – vrednosti so zanimive tudi zaradi primerjave z rezultati presiometerskih meritev in laboratorijskih preiskav sivice.

Strojnica HE Moste II :

- debeline slojev nad podlago	2,5 do 5,0 m (izjemoma 13 m),	
- prod	$\nu = 0.33$	$E = 258 \text{ MPa}$
- sivica do globine 10 m	$\nu = 0.47$	$E = 1089 \text{ MPa}$
- sivica pod globino 10 m	$\nu = 0.36$	$E = 6139 \text{ MPa}$

Pregrada in strojnica HE Moste III :

- debeline slojev nad podlago	2,0 do 4,0 m (izjemoma 0 do 6 m),	
- sivica do globine 10 m	$\nu = 0.44$	$E = 1464 \text{ MPa}$
- sivica pod globino 10 m	$\nu = 0.37$	$E = 8107 \text{ MPa}$
- down – hole	$\nu = 0.35 - 0.42$	$E = 765 - 2318 \text{ MPa}$

3.5 Geotehnične raziskave

Geotehnične raziskave so obsegale sondažno vrtanje, in-situ preiskave in laboratorijske preiskave vzorcev zemljin in hribine. Vrtanje vseh vrtnin je zaradi velikih globin (v trasi dovodnega tunela) in potrebe po odvzemu čim bolj intaktnih vzorcev sivice potekalo z dvojnostenskim jedernikom in polimerno izplako. Med vrtanjem so se izvajali SPT poskusi in poskusi penetrabilnosti na vsaka 2,5 m globine v vrtninah globine do 15 m oziroma na vsakih 5 m v vrtninah globine do 74 m.

Vzorci sivice so bili odvzeti približno na vsakih 0,5 m do globine 2 m pod kontaktom, v nadaljevanju pa na vsak meter globine. Takoj po odvzemu so bili parafinirani, oviti z gazo, še enkrat parafinirani, in shranjeni v cilinder, ki je bil prav tako parafiniran. Vzorci so bili isti dan dostavljeni v laboratorij, kar je bilo posebej pomembno zato, ker je vrtanje na najbolj zahtevnih lokacijah (podslapje, zapornična komora, strojnica II in pregrada) potekalo v zimskem času in v zelo neugodnih vremenskih razmerah.

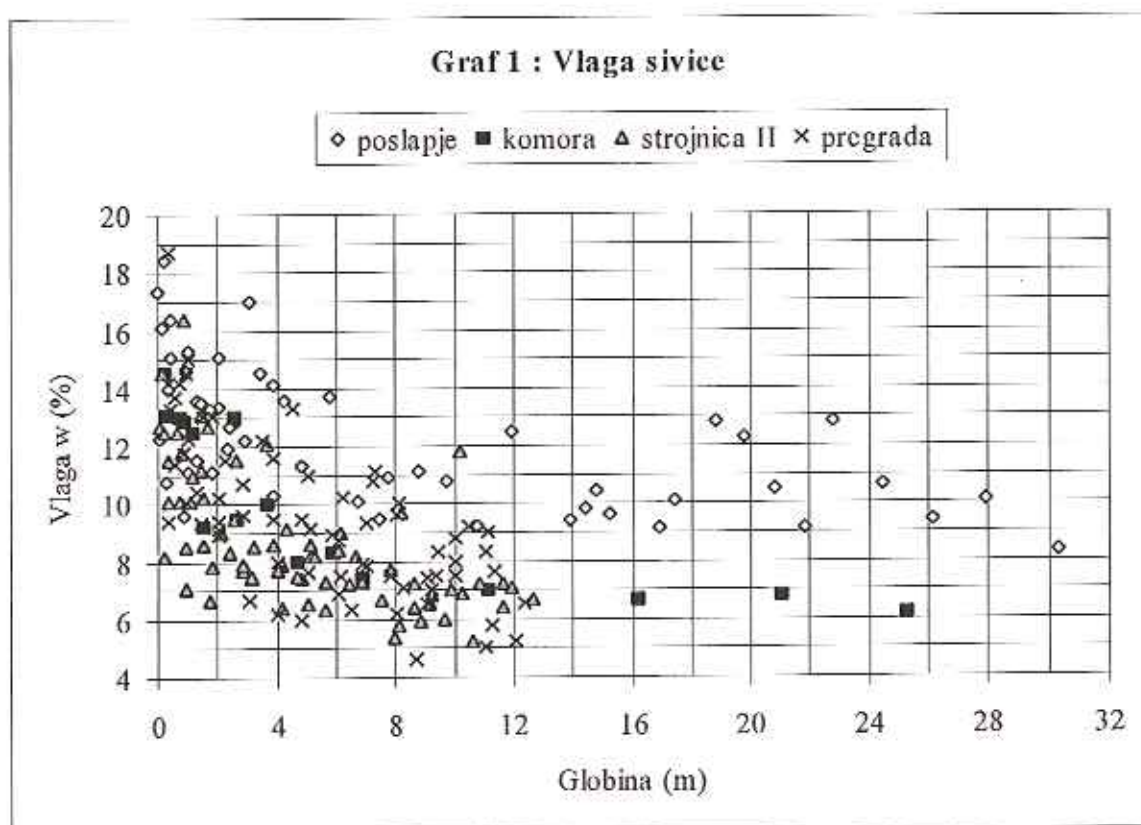
Presiometrične meritve :

Za in-situ določitev modulov elastičnosti (E) in deformacijskih modulov (D) so bile v nekaterih vrtninah izvedene tudi presiometrične meritve. Povprečne vrednosti za posamezne kamnine pri privzetem Poissonovcem količniku $\nu = 0,30$ so :

- milonitizirani dolomit :	$E = 3377 \text{ MPa}$	$D = 742 \text{ MPa}$
- sivica :	$E = 525 \text{ MPa}$	$D = 300 \text{ MPa}$

Laboratorijske preiskave sivice :

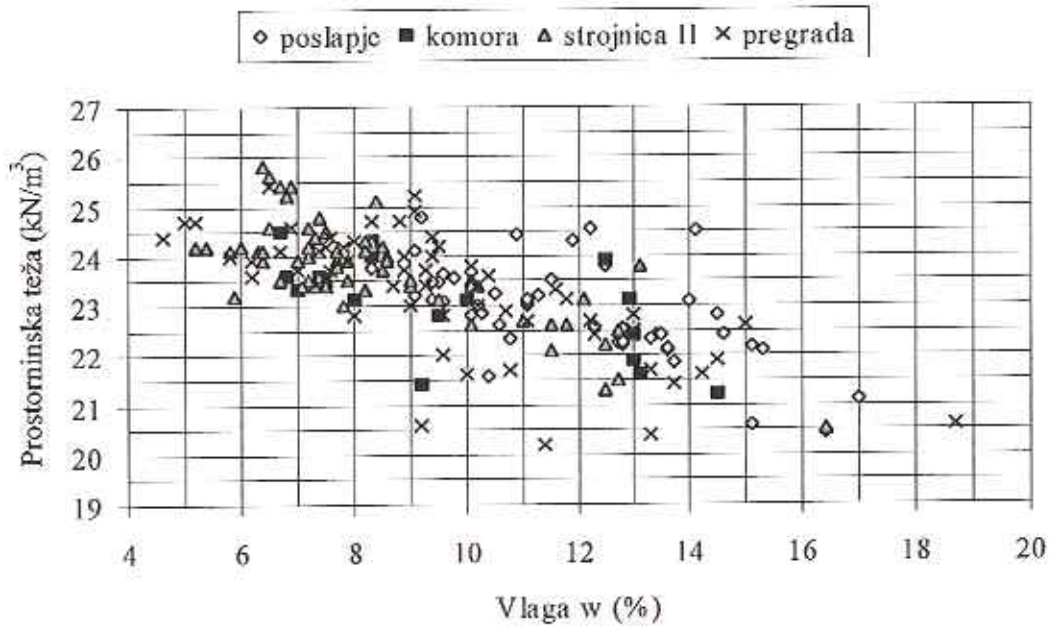
Ker so fizikalno mehanske lastnosti sivice direktno odvisne od vlage, smo jo določili na vseh odvzetih vzorcih. V grafu 1 smo prikazali upadanje vlage z globino, in sicer za vse lokacije, kjer objekti so (podslapje) ali bodo temeljeni v sivici. Iz grafa je razvidno, da izrazito odstopajo vlage v podslapju (vpliv tektonike), nekoliko manj pa vlage na lokaciji pregrade (vpliv Save).



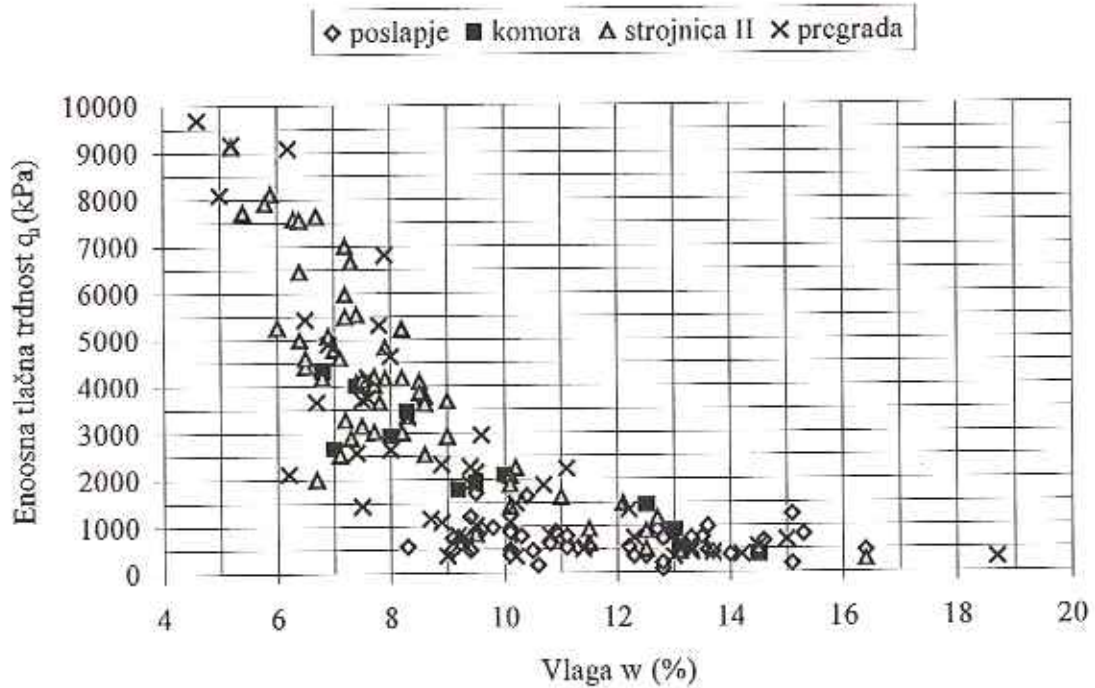
Med drugim smo vzorcem sivice določili še :

- konsistenco,
- cnoosno tlačno trdnost (graf 2) in prostorninsko težo (graf 3),
- strižni odpor v nepreplavljenem in preplavljenem stanju, ob predpostavki različnih obtežnih stanj - koti notranjega trenja (graf 4),
- module stisljivosti in koeficiente vodoprepustnosti,
- volumenske deformacije (graf 5) in nabrekalne pritiske (graf 6) ter mineraloško sestavo,
- module elastičnosti in Poissonova števila,
- preverili smo uporabnost sivice za glinasti naboj,
- poskusno smo izvedli triaksialno preiskavo sivice itd.

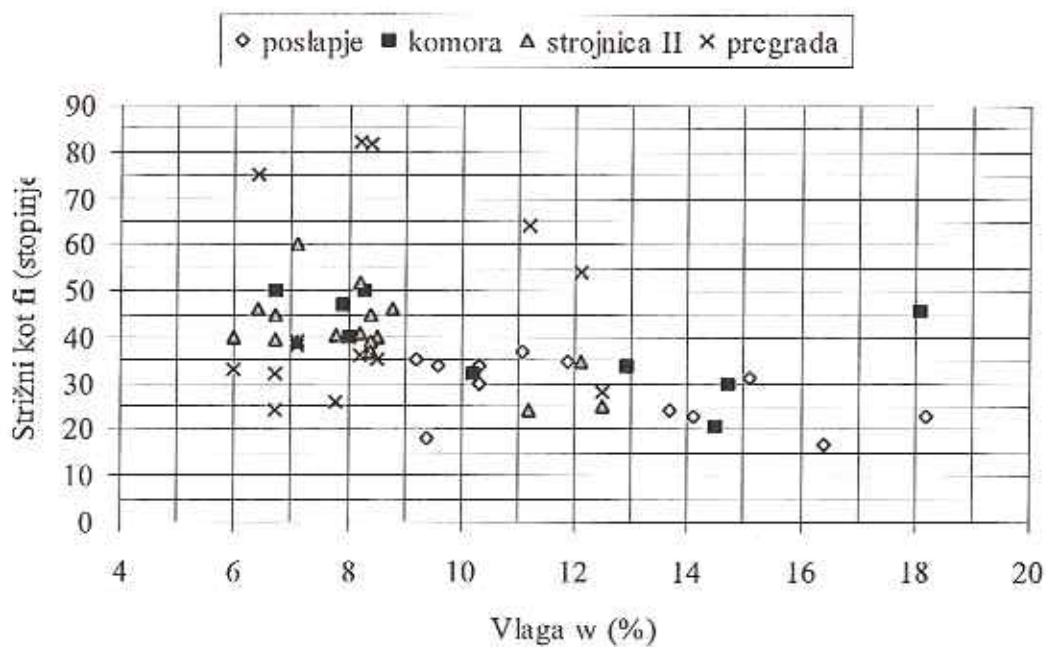
Graf 2 : Prostorninska teža sivice



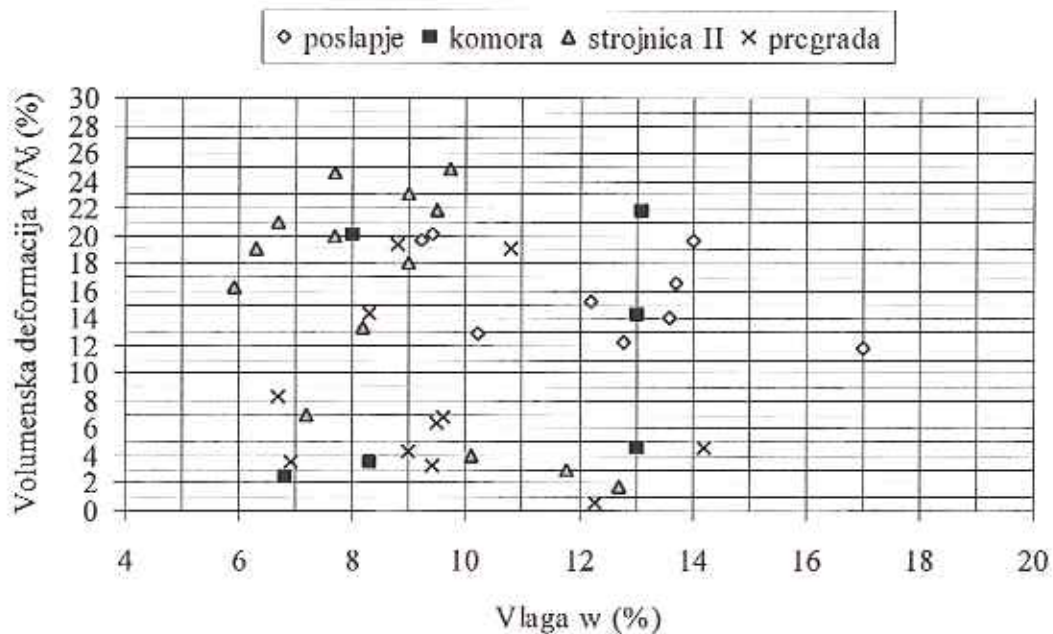
Graf 3 : Enoosna tlačna trdnost sivice

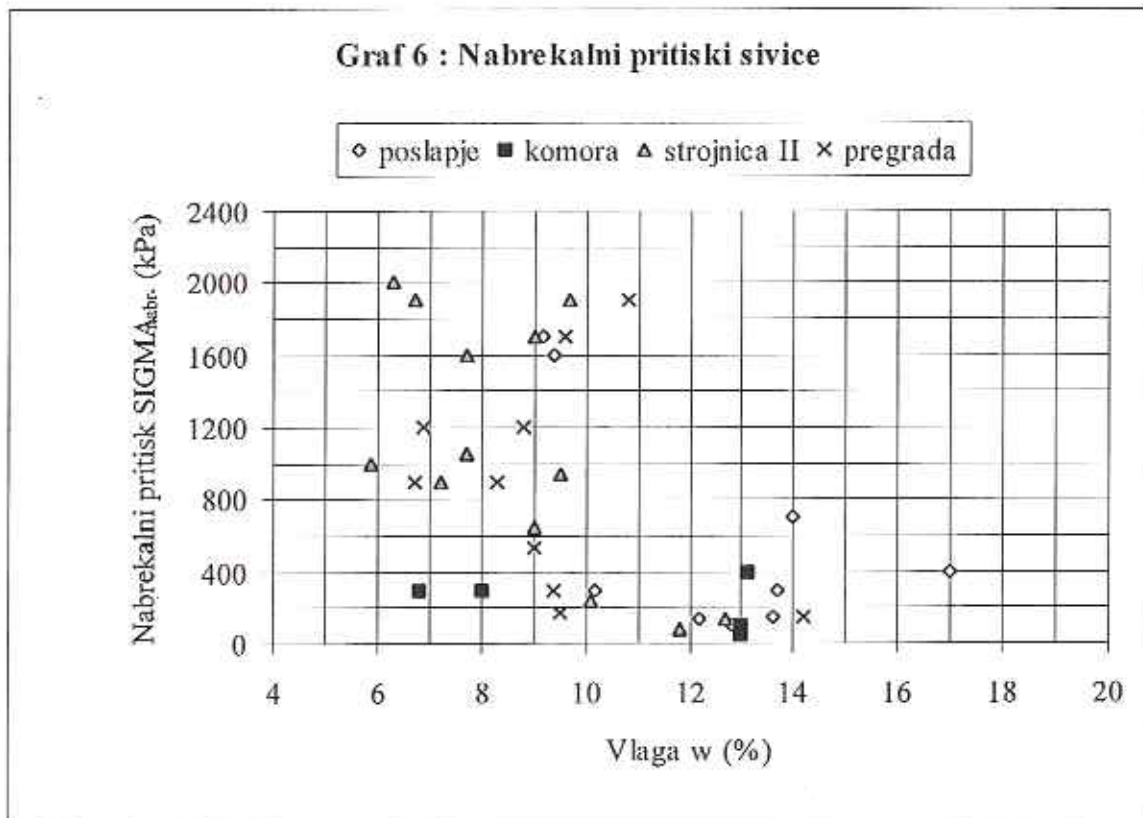


Graf 4 : Strižni kot sivice



Graf 5 : Volumenske deformacije sivice





Iz grafov je razvidno, da z upadanjem vlage naraščajo prostorninska teža svice, enoosna tlačna trdnost in strižni odpor (tudi na račun kohezijskega deleža trdnosti, ki v grafu ni prikazan). Največji raztros rezultatov kažejo vrednosti volumenskih deformacij, medtem, ko je iz prikaza nabrekalnih pritiskov razvidno, da ti naraščajo s padanjem vlage.

Rezultati nekaterih izvedenih laboratorijskih preiskav svice so naslednji :

- klasifikacija svice CL, CI, CH trdne konsistence (na kontaktu tg.-ptd.kons.)
- naravna vlaga svice $w = 19\% \text{ do } 4\%$
- prostorninska teža svice $\gamma = 20 \text{ do } 26 \text{ kN/m}^3$
- enoosna tlačna trdnost svice $q_u = 150 \text{ do } 10000 \text{ kPa}$
- strižni kot svice $\varphi = 16^\circ \text{ do } > 60^\circ$
- volumenske deformacije $\Delta V/V_0 = 0,5 \text{ do } 25\%$
- nabrekalni pritiski $\sigma_{nabr} = 150 \text{ do } > 2000 \text{ kPa}$
- vsebnost anhidrita do 6 %, Ca-montmorillonita do 12 %
- Poissonov količnik $\nu = 0,07 \text{ do } 0,23$
- modul elastičnosti $E = 150 \text{ do } 820 \text{ MPa}$

4.0 ZAKLJUČEK

V referatu sem skušala v grobem prikazati obseg del in rezultate nekaterih raziskav, ki so bile izvedene na področju HE Moste v okviru predvidene sanacije in doinstalacije, in so potekale 3 leta.

Geološko – geotehnične raziskave so bile programirane tako, da bi projektantom odgovorile na čimveč vprašanj. V fazi izvedbe raziskav nismo razpolagali z določeno opremo, ki je sedaj že na voljo (npr.: module elastičnosti prodnih zemljin v krovlini dovodnega tunela smo ocenjevali na osnovi SPT poskusov, sedaj pa je že možno izvesti meritve s presiometrom za zemljine).

Pri laboratorijskih preiskavah sivice smo se srečevali s pojavom nabrekanja. Pri preiskavah v preplavljenem stanju se je pogosto dogajalo, da se je sivica zaradi majhnih dimenzij vzorcev obnašala kot glina.

Z ozirom na raztros rezultatov preiskav nabrekljivosti sivice bi bilo potrebno izvesti dodatne analize in preiskave ter ugotoviti, kolikšen del deformacij je posledica mineraloške sestave in kolikšen del posledica vpliva prekonsolidacije sivice. Potrebno bi bilo izvesti tudi preiskave, s katerimi bi (z ozirom na nizek koeficient vodoprepustnosti sivice $k < 10^{-10}$ m/s) lahko vsaj približno napovedali časovni potek eventualnih deformacij sivice, ki je zaradi vpliva tektonike ne moremo smatrati za homogen medij.

Viri :

Geološka in geotehnična poročila za :

- projekt HE Moste – Revitalizacija (faza IPP, 1997) in
- projekt HE Moste – Sanacija in doinstalacija (faza PGD-PZI, 1999 – 2000)
Geoinženiring d.o.o. Ljubljana

Sanacija pregrade HE Moste – nedestruktivne metode raziskav

mag. Andrej Kryžanowski uni. dig.

Savske elektrarne Ljubljana, Gorenjska 46, 1215 Medvode

Povzetek

Na osnovi rezultatov dolgoletnega opazovanja pregrade Moste na reki Savi je bilo odločeno, da je potrebno zaradi starosti, dotrajanosti in zmanjšanja obratovalne varnosti izvesti celovito sanacijo objekta. V letu 1996 so bile izvedene dodatne geološke in seizmične raziskave na širšem pregrade z izvedbo raziskovalnih vrtin na območju pregrade in temeljne hribine. Vrtine smo kasneje uporabili za izvedbo raziskav stanja betona in temeljne hribine z uporabo nedestruktivnih metod - metode geotomografije. Uporabljeni sta bili dve tehniki raziskav: geoseizmična metoda in geoelektrična metoda. Tehnika raziskave omogoča trodimenzionalno skeniranje objekta s katero je omogočena detekcija vseh nepravilnosti (razpoke, šibka mesta v strukturi, kaverne ipd.) v telesu objekta na način z uporabo akustičnega signala ali elektromagnetnega impulza. Na osnovi analize geofizikalnih raziskav je v pripravi projekt sanacije pregrade.

Summary

Based on the results of many years' of monitoring of the Moste dam on the Sava river and due to the age, obsolescence and reduced operational safety it has been decided to perform the complete rehabilitation. In 1996, additional geologic and seismic research work was performed in the wider dam area by test borings in the dam and the bedrock. Bore holes were later used to establish the conditions of concrete and bedrock by using non-destructive methods - the method of geotomography. Two research techniques were used: the geoseismic and the geoelectric method. The research technique enables three dimensional scanning of the building and detection of all abnormalities (fissures, weak points in the structure, caverns, etc.) in the dam body by using acoustic signal or electromagnetic impulse. Based upon the analysis of geophysical research, a rehabilitation programme is being prepared.

1. OPIS PROBLEMA

Pregrada HE Moste, na reki Savi je s 60 m konstruktivne višine najvišja pregrada v Sloveniji. Postavljena je v ozkem profilu soteske reke Save na bloku triadnega apnenca oz. dolomita, pod katerega je podrinjena miocenska lapornata glina. Zaradi neugodne geološke zgradbe sta bila vseskozi gradnjo pregrade in kasneje tekom eksploatacije prisotna dva problema: zagotovitev zadostne nosilnosti temeljne hribine in tesnitev pregradnega profila.

Prvotno zasnovana, ločna pregrada je bila zaradi dvoma o zadostni nosilnosti desnega boka izvedena kot težnostna v ločni izvedbi. Ob tem je bil vzpostavljen obsežen sistem opazovanja in meritev (geodezija, meritve inklinacij in zasukov) pregradnega objekta z vplivnim prostorom (boki pregrade in kontrolni jašek). Na podlagi dosedanjih zapisov opazovanja ni bilo registriranih dogajanj, ki bi odstopala od predvidenih v projektu. Geodetske meritve so pokazale, da je prišlo do manjšega dviga umirjevalnega bazena, ki je posledica nabrekanja baznega dela v miocenski glini. Ker gre za sorazmerno stacionarni proces ocenjujemo, da ni nevarnosti za stabilnost celotnega objekta. Večji problem je bilo zagotoviti tesnitev pregradnega profila. Tesnitev profila je izvedena s tesnilno zaveso, ki sega v globino do nepropustne podlage, v bokih pa sega izven propustnih con ob pregradi. Kljub tesnilni zavesi ocenjujemo, da znašajo povprečne izgube iz bazena okoli 0,5 m³/s. Za zmanjšanje vzgonskih pritiskov na območju pregrade je bil izveden drenažni sistem, ki zbira preecedne vode skozi pregrado in bočno hribino (slika 1).

V sklopu projekta sanacije in doinstalacije sistema HE Moste je predvidena celovita sanacija pregrade, ki obsega: (1) v prvi fazi celovito obnovo pregrade s ciljem doseči projektne parametre varnosti, (2) v drugi fazi sanacijo evakuacijskih objektov ter (3) tretji fazi nadvišanje objekta za 1,25 m. V letu 1999 je bila uspešno izvedena sanacija pregrade, podslapja in temeljnega izpusta. V funkcijo so vzpostavljeni drenažni sistemi. S kontaktnim injektiranjem so bili sanirani slabi stiki med betonom in pregrado. Ponovno so bili preverjeni projektni faktorji varnosti na osnovi posebne študije tveganja pri obratovanju objekta. V zaključku študij je ugotovljeno, da po izvedenih sanacijskih objekt zadošča sedanjim kriterijem varnosti. V letošnjem letu bomo pričeli s sanacijskim ukrepi druge faze, to je sanacija in rekonstrukcija evakuacijskih objektov (prelivi, temeljni izpust). S to fazo sanacije bodo vsi objekti pregrade v normalni obratovalni funkciji.

Osnovno vodilo pri pripravi programa potrebnih raziskav v pregradnem območju je bilo pridobiti čim več informacij o stanju objekta in vplivne okolice na podlagi katerih bo možna odločitev o potrebnem obsegu sanacijskih ukrepov ter zagotovitev maksimalne možne varnosti pri obratovanju objekta. Preveritev stabilnosti pregrade je bila izvedena z dinamičnim 2D in 3D modelom za kar je bilo potrebno pridobiti podatke o stanju betonov pregrade, kvaliteti okoliške hribine ter kontaktnih ploskev med pregrado in hribino. Predvsem slednje je bilo predmet natančnejše obdelave. Glede na zahteve je bilo potrebno izbrati tako metodo raziskave na podlagi katere bi bilo možno določiti karakteristike materiala v katerikoli smeri in globini.

2. RAZISKOVALNA DELA

2.1 Metode raziskav

Na osnovi predpisanih zahtev sta bili izbrani nedestruktivni metodi raziskav kvalitete betonov in hribine, ki delujeta po naslednjem principu:

Geotomografija V oddajni točki vzbujamo seizmično valovanje, ki potuje skozi pregrado do geofona v sprejemni točki. Za prostorsko ponazoritev je potrebno, da sta oddajna in sprejemna točka v različnih nivojih. Na podlagi registracije časovnega prehoda seizmičnih valov je možno preračunati hitrost propagacije. S ponazoritvijo variacij hitrosti prečno čez pregrado je možno konstruirati tomografsko sliko, ki kaže različnosti v kvaliteti materiala. Metoda omogoča določitev področja z oslabljeno strukturo materiala v konstrukciji, ki bi lahko vplivali na varnost pregrade.

Georadar Princip raziskave je tak, da na površini pregrade oddajamo elektromagnetni signal v telo pregrade in nato registriramo odbojne valove na sprejemni napravi. Na osnovi registracije odbojnih valov je mogoče konstruirati bodisi z vodo nasičena področja ali pa anomalije v strukturi pregrade (razpoke, kaverne ipd.).

2.2 izvedba raziskav

V letu 1997 je bilo v sklopu geoloških in seizmičnih raziskav v pregradnem profilu izvedenih 5 raziskovalnih vrtin - od tega 3 v telesu pregrade, ter po ena pa na vsaki strani v bočni hribini. Globina vrtanja je bila 60 m in je segala približno 8 m v temeljno hribino v pregradi. Vrtine v telesu pregrade so bile izvedene rotacijsko na jedro, v bočni hribini pa s pnevmatskim kladivom. Iz betonskih jeder so bili izbrani vzorci za laboratorijsko preiskavo tlačnih trdnosti, prostorninskih mas in vodonepropustnost. Na osnovi rezultatov laboratorijskih raziskav je bilo ugotovljeno, da je beton homogene sestave, v celoti zmerno porozen, da pa glede na sorazmerno velik raztros rezultatov meritev obstaja verjetnost, da obstajajo mestoma v pregradi področja z manj kakovostnim betonom. Izdelane vrtine so bile kasneje uporabljene za izvedbo geofizikalnih raziskav na območju pregrade.

Geotomografija Meritve so bile izvajane vzdolžno s krono pregrade med posameznimi vrtinami in v prečni smeri vzdolž osi pregradnega telesa. Posamezna meritev je obsegala vzbujanje seizmičnih valov v posamezni oddajni točki in registracijo časa prehoda seizmičnega valovanja v nizu 12. sprejemnih točk (geofonov) na razmaku 1 m (slika 1). Geotomografski profil je bil določen z izvedbo serije meritev z razmakom oddajnih točk na 1 m po višini in pozicioniranjem niza sprejemnih točk po višini pregrade. Vzbujanje seizmičnih valov je bilo pod vodo izvedeno z zračnim topom, na zračni strani pa z udarcem s kladivom. Registracija je potekala s seizmografom z delovno frekvenco 32,5 KHz, ki je zagotavljala zadostno stopnjo natančnosti za doseg želenih ciljev raziskave.

Pri izvedbi meritev v vzdolžni smeri so bile uporabljene raziskovalne vrtine (slika 2), pri čemer so bile zaradi optimizacije časa izvajanja meritev sprejemne točke v osrednjih vrtinah (B2 in B4) oddajne pa v zunanjih in centralni vrtini (B1, B3, B5). Za zagotovitev kvalitetne izvedbe meritev so bile vrtine v času izvajanja meritev napolnjene z vodo ali bentonitno izplako, kjer so bile pričakovane prekomerne izgube vode zaradi poroznosti vrtin. Pri izvedbi meritev v vzdolžni smeri so bile sprejemne točke v osrednjih vrtinah v pregradi (B2, B3, B4), oddajne točke pa na vodni strani ob pregradi in dolvodno po drči prelivnega polja.

Po izvedbi terenskih meritev je sledila obdelava podatkov s preračunom odgovarjajočih hitrosti propagacije seizmičnih valov s pomočjo uporabe računalniškega programa. Pri preračunu so bile opravljene določene korekcije za pridobljene podatke glede na račun pozicije oddajnih in sprejemnih točk ter vpliva potovanja valov skozi vodo. Rezultat računa je podan z grafično predstavitevjo razvitega geotomografskega profila v raziskovanih smereh. V tej fazi je bila opravljena tudi kalibracija hitrosti propagacije seizmičnih valov glede na tlačno trdnost betonskihorcev iz preizkusnih vrtin. Kalibracija je bila izvedena z merjenjem ultrazvočne hitrosti v vzorcih, primerjana z etalonom.

Georadar Meritve so bile izvedene vzdolž drče prelivnih polj v petih profilih. Raziskave so potekale z oddajanjem na dveh frekvencah (300 Mhz in 900 Mhz), pri čemer je bila gostota petih

oddajno-sprejemnih točk na dolžinski meter. Meritev z nižjo frekvenco je omogočala vpogled v globino do 15 m, merjeno iz površine prelivnega polja s katero smo pridobili podatke o homogenosti strukture in kvaliteti betonov pregrade. Meritev z višjo frekvenco pa je omogočala detekcijo eventualnih diskontinuitet (fug, razpok, kavern ipd.) v telesu pregrade.

Po izvedbi terenskih meritev je sledila obdelava v laboratoriju, kjer so bile s filtriranjem registriranih podatkov odpravljene anomalije zaradi postopkov izvajanja meritev. Rezultat meritev je grafični prikaz notranje strukture pregrade z izraženimi anomalijami.

2.3 analiza rezultatov raziskav

Laboratorijske raziskave Pri analizi in interpretaciji rezultatov meritev so bili upoštevani rezultati laboratorijskih raziskav na betonskih vzorcih in podatki iz literature. Na osnovi analize laboratorijskih raziskav na osnovi 54 preiskanih vzorcih je bilo ugotovljeno, da znaša tlačna trdnost povprečnega betonskega vzorca 30 Mpa, da pa je opaziti velik raztros rezultatov, pri čemer je bil ugotovljen sorazmerno velik delež betona slabših trdnosti (okoli 10% vzorcev). Le to nakazuje, da je v pregradi pričakovati področja, kjer je beton slabše kakovosti. Pri interpretaciji rezultatov meritve hitrosti propagacije seizmičnih valov so bili upoštevani predpisi iz literature (Hydro Quebec), ki ponazarjajo relacijo med kvaliteto betonov primerjeno s hitrostjo propagacije:

KAKOVOST BETONOV	HITROST PROPAGACIJE (m/s)
odlična	> 4500
zelo dobra	3500 - 4500
dobra	3000 - 3500
zadovoljiva	1500 - 3000
nezadovoljiva	<1500

ter rezultati meritev ultrazvočnih hitrosti na preiskanih vzorcih. Izmerjene vrednosti se gibljejo med 5300 m/s (vrtina B2) in 5550 m/s (vrtina B3), kar nakazuje sicer izredno kvalitetno kakovost betonov. Pri interpretaciji rezultatov je pa potrebno upoštevati, da gre za točkovni odvzem vzorcev, kjer se lahko kvaliteta materialov zaradi različnih vplivov hitro spreminja.

Geotomografija Iz geotomografskega profila (slika 3) so jasno razvidna področja ob kontaktih s hribino - predvsem ob desnem boku, v hribini med kontrolnima galcijama (med vrtinama B4 in B5) ter v temeljni hribini pod pregrado - kjer hitrosti propagacije dosegajo nezadovoljivo stanje kvalitete betona (1400 m/s). Za določitev referenčnih vrednosti hitrosti propagacije seizmičnih valov v skali je bila v vrtini B1 narejena serija meritev, na podlagi kateri je bila določena referenčna hitrost (2750 m/s). Iz geotomografskih profilov je razvidno, da kakovost betonov pregrade lahko v splošnem označimo kot zelo dobro, mestoma tudi odlično, kar se sklada tudi z zaključki laboratorijskih raziskav na betonskih vzorcih.

Prikazani rezultati so potrdili ugotovitve, ki so bile dobljene na osnovi meritve in spremljanja precdnih voda, da so v desnem bloku in v baznem delu temeljne hribine nahajajo cone kjer je kvaliteta hribine slabša. Z izvedbo geotomografskega profila je bilo omogočeno natančneje locirati ta območja, ki ji kljub predhodno izvedenim vrtinam nismo mogli locirati in se je zato izkazala kot odlična metoda, kot dopolnitev in hkrati ponuja možnost optimiranja potrebnega obsega klasičnih vrtin na minimum.

Georadar Na osnovi rezultatov meritev z elektromagnetnim signalom je bila pridobljena informacija o kakovosti oz. homogenosti betonske strukture v globino 15 m, merjeno s površine prelivnega polja. Iz prikaza je razvidno, da se v globini 30 m pod krono pregrade pojavlja mokra cona, kar bi bil lahko tudi vzrok zamakanja z zalednimi vodami na kontaktu s šibko cono ob desnem boku pregrade. Na splošno pa v sami strukturi ni bilo zaznati nikakršnih anomalij (razpok, kavern ipd.) v telesu pregrade.

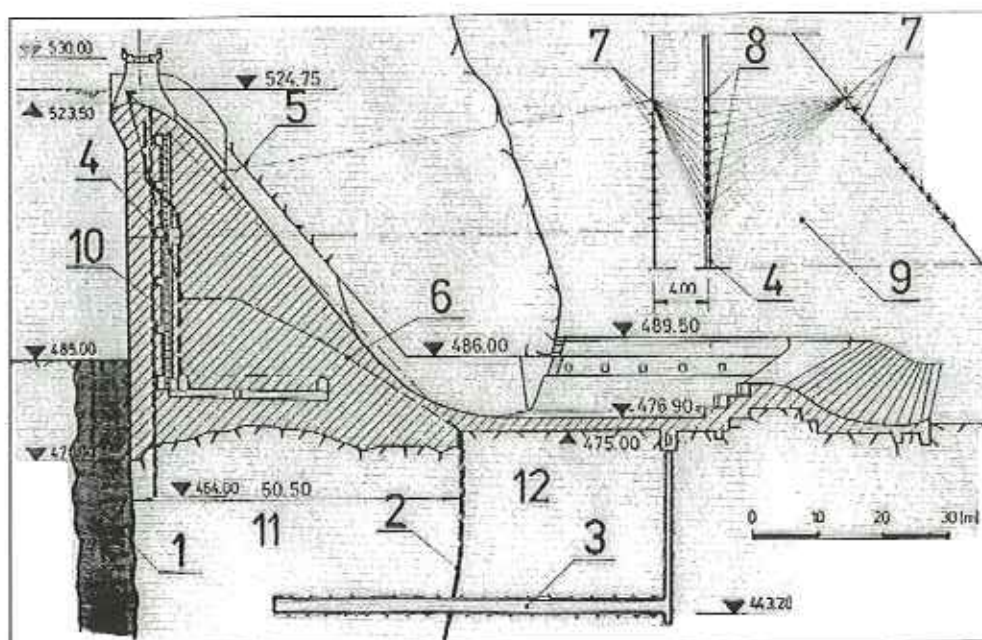
3. ZAKLJUČEK

Pri raziskavah kvalitete betonov pregrade Moste in temeljne hribine sta bili kot dopolnilo klasičnim vrtinam uporabljene nedestruktivni geofizikalni metodi raziskav materialov georadar in geotomografija. Z izvedbo geotomografskega profila je bilo omogočeno natančneje locirati območja slabših karakteristik materiala in lokalnih diskontinuitet, ki ji kljub predhodno izvedenim vrtinam nismo mogli ugotoviti.

Uporabljene geofizikalne metode raziskav na hidrotehničnih objektih so bile pri nas prvič uporabljene. Prednost teh metod pred klasičnimi je to, da območje raziskave obsega celotno strukturo objekta na osnovi katere lahko določimo kvalitativno oceno stanja objekta. Hkrati pa nam omogočajo možnost optimiranja potrebnega obsega klasičnih vrtin kot dopolnilnih raziskav k geofizikalnim metodam, ki so še vedno neobhodno potrebne za določitev kvantitativne ocene stanja materiala v konstrukciji.

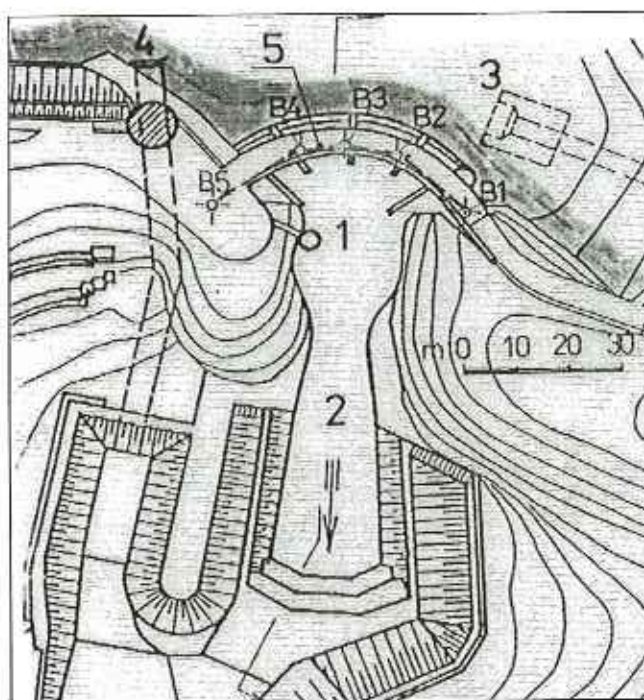
VIRI

- Niccolini, G. Gazzano G-P. 1998:** Nedestruktivne metode preiskave pregrade Moste, Tehnično poročilo, Euromin - L465/SLO, Trst.
- Kryžanowski, A. Somrak, D. 1997:** Uprating of Moste HPP, Zbornik referatov IHA Conference Portorož 1997, s. 623 - 627.
- Kryžanowski, A. 1998:** Uporaba nedestruktivnih metod raziskave kvalitete betonov in hribine pri sanaciji pregrade HE Moste, Zbornik referatov 20. zborovanje gradbenih konstrukterjev Slovenije, Bled 1998, s. 187 - 190.
- Kryžanowski, A. Mihailov, V. Somrak, D. 1998:** Rehabilitation of the Moste Dam on the Sava River, Symposium Rehabilitation of Dams - Proceedings New Delhi 1998, s. 473-491.
- Somrak, D. 1997:** Sanacija in doinstalacija HE Moste - idejni projekt, IBE - A501/28, Ljubljana.



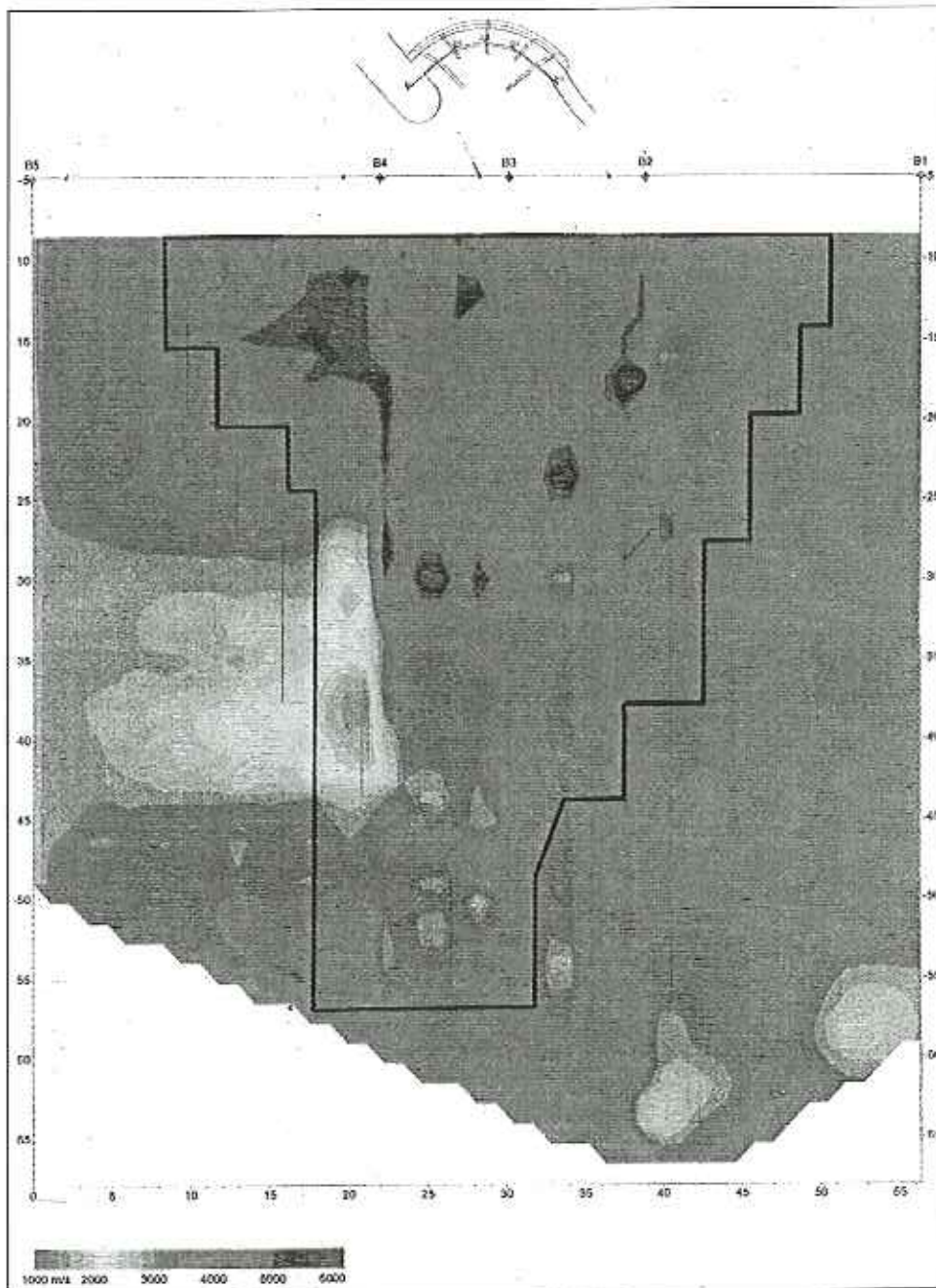
Slika 1: Prerez čez profil pregrade

(1) tesnilna zavesa, (2) prelomnica, (3) revizijski jašek, (4) vrtina, (5) polna vzgonska linija, (6) piezometri linija, (7) oddajne točke, (8) sprejemne točke – geofoni, (9) telo pregrade, (10) drenažni sistem, (11) temeljna hribina (triadni apnenec), (12) sivica;



Slika2: Pregledna situacija

(1) preliv, (2) podslapje, (3) vtok, (4) temeljni izpust, (5) geotomografski profil



Slika 3: Geotomografski profil po razviti širini pregrade

Primer gradbenega monitoringa – pregrada HE Moste

Rudi Brinšek, univ.dipl.inž.gradb.
Savske elektrarne Ljubljana, d.o.o. Gorenjska cesta 46, Medvode

Povzetek

V prispevku je prikazan sistem avtomatiziranega gradbenega monitoringa pregrade HE Moste, ki je lahko tudi primer za spremljanje drugih tovrstnih objektov. Podana je možnost računalniške analize obnašanja objekta pa tudi napovedi, kaj bi se z njim zgodilo, če bi se pogoji zanj spremenili.

Summary

The usage of automated construction observation on HE Moste dam, which is also suitable for other similar buildings, is described in the article. Computer added analysis is chosen for implement dam behaviour and event prediction in case of changed dam parameters.

1.0 UVOD

Pregrada HE Moste predstavlja del hidroenergetskega sistema Moste, ki na letni ravni proizvede 64 GWh električne energije. Pregrada HE Moste je v Sloveniji najvišji pregradni objekt betonskega tipa. Za pregrado se razteza akumulacijsko jezero s prostornino 6.2 mio. m³. Pregrada predstavlja v prostoru zaradi svoje gradbene višine določeno tveganje, saj bi v primeru njenega rušenja prišlo do nedopustnih posledic za ljudi in okolje nizvodno. Vsled tega je na pregradi izdelan sistem gradbenega monitoringa, ki omogoča podrobno spremljanje njenega obnašanja. Del tega sistema je opisan v tem prispevku.

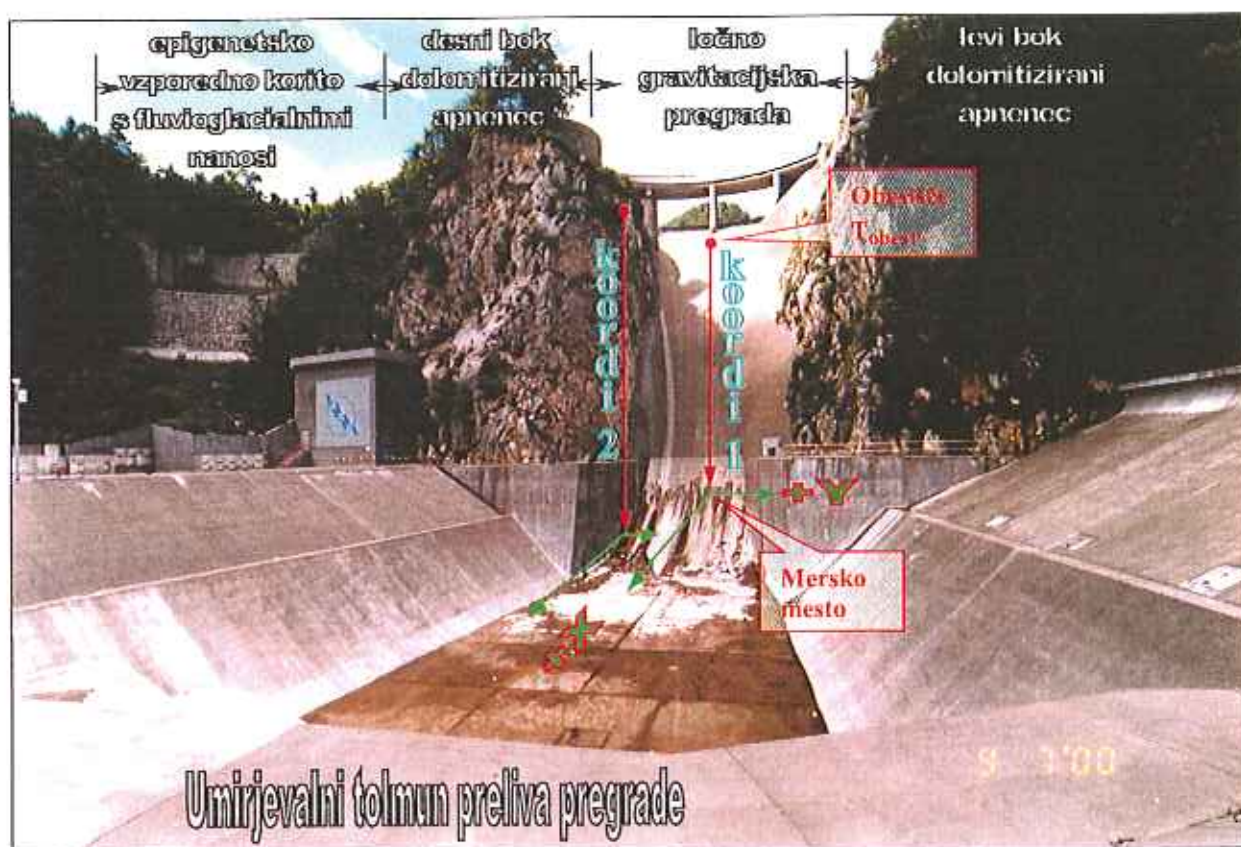
2.0 SPLOŠNO

Betonska ločnogravitacijska pregrada Moste je zgrajena na reki Savi Dolinki v ozki 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 krone pregrade oziroma roba preliva na koti 524.75 znaša 53.95 m, do vrha mostne ograje pa 60.8 m. Krona pregrade je dolga 49.85 m. Razen elementov mostu in obloge preliva betonsko telo pregrade ni armirano. V pregradi se nahajata dva vzdolžna kontrolna hodnika, zgornji na koti 503.00, spodnji s prečnim krakom pa na koti 481.50. Kontrolna hodnika sta med sabo povezana z dvema vertikalnima jaškoma. Prvi se nahaja v temenu loka pregrade, drugi pa nekoliko nizvodno na kontaktu z desnim bokom pregrade. V drugem jašku so izdelane tudi zavite stopnice za dostop s krone pregrade do spodnjega kontrolnega hodnika. V desnem boku pregrade se nahaja talni izpust, premera 5.25 m in dolžine 90 m. V betonskem podslapju sta na koti 477.00 izdelana umirjevalni tolmun preliva pregrade in talnega izpusta.

Geološka zgradba pregradnega profila je zelo pestra. Boka pregrade tvori tektonsko poškodovan in v notranjosti mestoma mifonitiziran apnenec, ob desnem boku pa tudi fluvioglacialni nanosi, ki zapolnjeno epigenetsko vzporedno korito Save (slika 1). Poleg tega se pregradni profil nahaja neposredno ob geološkem prelomu (imenovan savski prelom), tako da so dolomitizirana apnenčasta boka in podlaga pregrade ob njem poševno narinjeni na podlago oligocenske morske sivce meljne gline (sivica), ki izdanja neposredno nizvodno od pregrade. Ob prelomu je sivica premešana s samcami in drobirjem apnenca. Zaradi stika z vodo je tu razmehčana.

Najprej je bil projektiran ločni tip pregrade, zaradi ugotovljene zapletene geološke zgradbe pregradnega profila pa je bil ta kasneje spremenjen v ločno-gravitacijski. Graditelji so se zavedali, da varnosti objekta

zaradi navedenega računsko ne bodo mogli dokazati, zato so posebno pozornost posvetili meritvam med prvim polnjenjem akumulacijskega jezera. Glavni poudarek so dali rezultatom meritev deformacij pregradnega profila, pridobljivih s pomočjo dveh obešenih grezil oziroma visečih koordimetrov, ki sta nameščena v navedenih dveh jaških pregrade. Koordimetra so skušali vgraditi tudi v oba boka pregrade, vendar niso uspeli zagotoviti vertikalnosti vrtin. Poleg tega so prvo polnjenje akumulacije izvedli že, ko je bila pregrada zgrajena do kote 514.00 in ker merjene deformacije posebnosti v obnašanje objekta niso nakazale, so z gradnjo pregrade nadaljevali do njene sedanje velikosti. Jašek v temenu loka pregrade so tako zgradili od kote 518.60 do kote 482.90, stopniščni jašek ob desnem boku pregrade pa od kote 519.10 do kote 481.50. Obesišča obeh žic koordimetrov so izvedli na stropu jaškov, njune proste jeklene uteži, mase cca 400 kg, pa pri dnu jaškov oziroma na koti spodnjega kontrolnega hodnika. Dolžina koordimetra v jašku temena loka pregrade (KOORDI1) tako znaša 35.50 m, koordimetra v stopniščnem jašku (KOORDI2) pa 38.20 m. Merski mesti za optično čitanje pomikov so namestili neposredno iznad uteži koordimetrov. Koordinatne osi v horizontalni ravnini so orientirali v vzdolžni in prečni smeri pregrade. Pozitivna X os kaže v smeri toka vode, pozitivna Y os pa od desnega proti levemu boku (slika 1 in 2).



Slika 1: pogled na nizvodno stran pregradnega profila

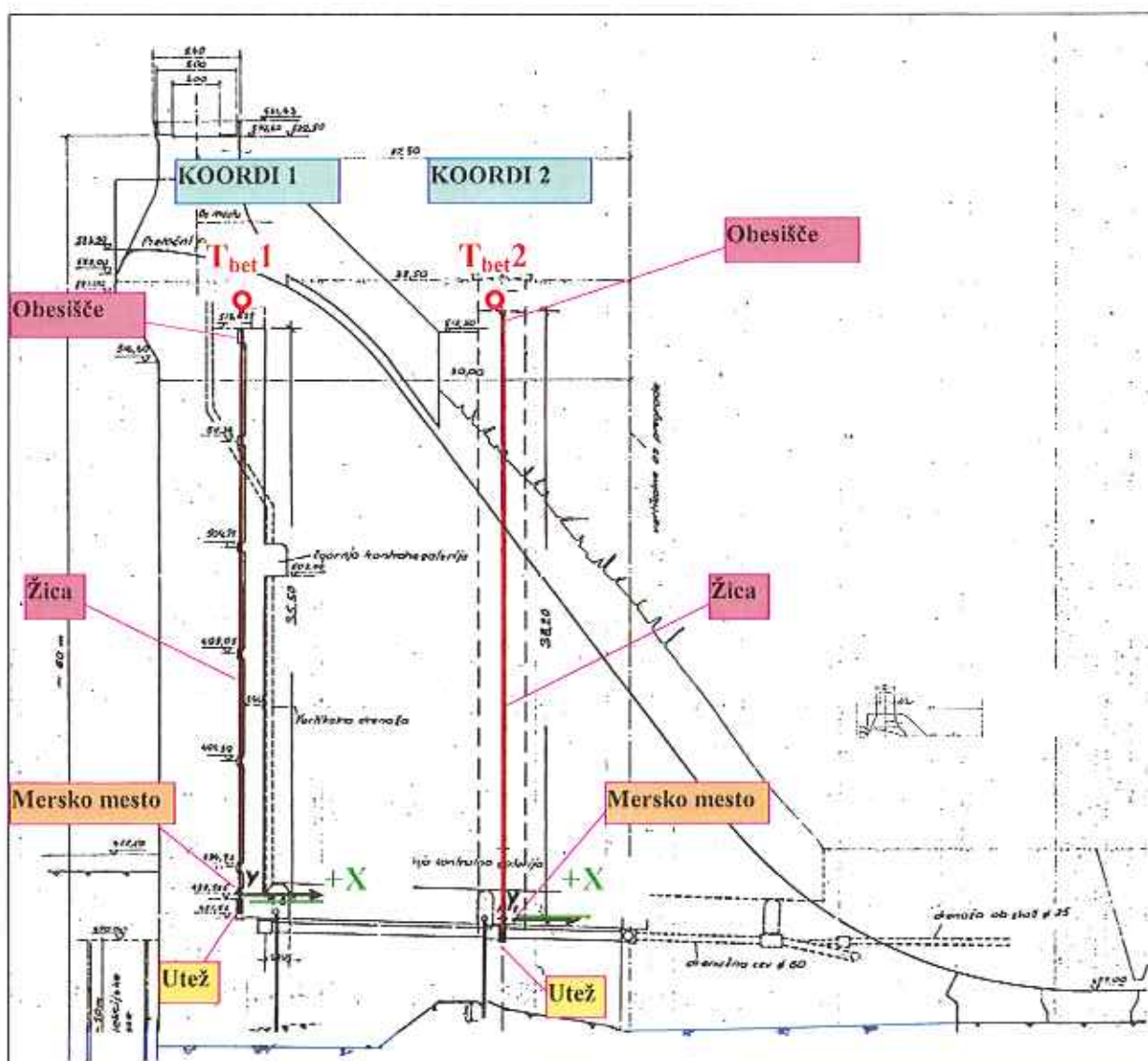
Spremljanje deformacij pregrade s pomočjo merjenja pomikov obeh koordimetrov je za analizo njenega stanja oziroma varnosti bistvenega pomena še danes. Zavedajoč se dejstva, da predstavljajo izmerjeni pomiki koordimetrov večji del deformacij oziroma rotacij pregrade in njene podlage (višina KOORDI1 znaša 66% višine pregrade, višina KOORDI2 pa 71%), je bil sistem merjenja pomikov v letu 1998 moderniziran z vgradnjo elektronskih telemerskih senzorjev. Merilna naprava (izdelal jo je DMS, Golnik 3) omogoča zajem podatkov s poljubno nastavljivim časom vzorčenja in njihov preračun ter arhiviranje. Podatki v obliki kronoloških diagramov so na računalniku na objektu dosegljivi preko poslovne mreže Savskih elektrarn Ljubljana, d.o.o. v vsakem času in iz poljubne lokacije. Sistem zagotavlja tudi ustrezno alarmiranje.

3.0 ANALIZA MERJENIH VELIČIN

Opisani merilni sistem omogoča merjenje relativnih horizontalnih pomikov obesišč koordinimetrov glede na njuni merski mesti, oziroma, rečeno poenostavljeno, merjenje pomikov krone pregrade glede na njen fundament. Merska mesta so v danih okoliščinah izbrana tako, da je omogočeno spremljanje karakterističnih pomikov pregrade, ki so za njeno stabilnost pri vseh možnih obtežnih primerih najprezentativnejši.

Merjeni pomiki pregrade so posledica različnih vzrokov, kot so:

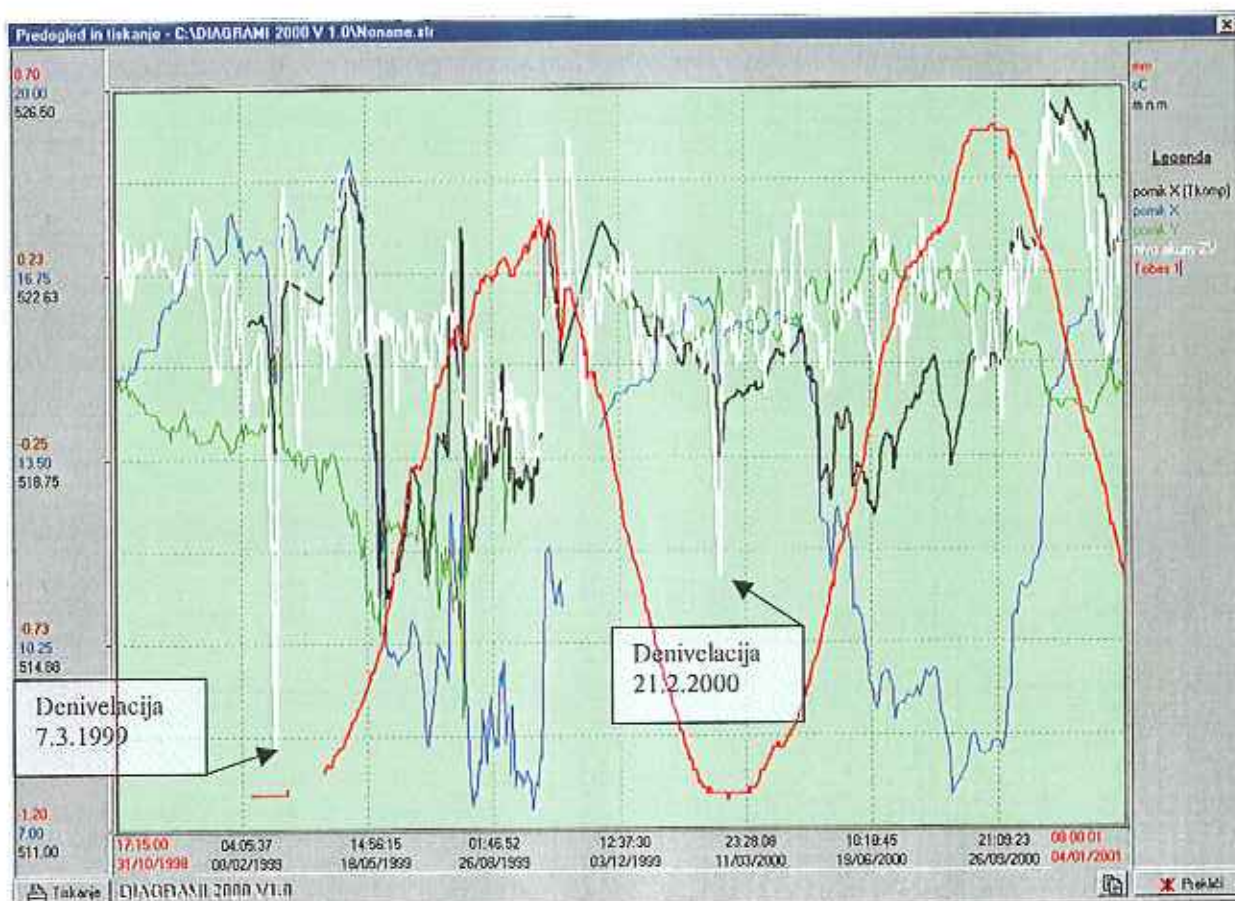
- 1) spremembe obtežb:
 - temperaturne obtežbe celotnega pregradnega profila,
 - gladine zaježbe in posledično spremembe hidrodinamičnih obtežb v pregradnem profilu,
 - potresne obtežbe,
- 2) spremembe lastnosti materialov pregradnega profila (dolgoročni destruktivni procesi),
- 3) deformacije litosfere in drugo.



Slika 2: Prečni prerez pregrade

Ustrezne analize merjenih pomikov ni mogoče izvesti brez upoštevanja njihovih vzrokov, ki so navedeni pod točko 1), zato so v merilni sistem pregrade vključene tudi kontinuirane meritve gladine nivoja akumulacijskega jezera (ZV) in temperature betona T_{obes1} in T_{obes2} kot reference za temperaturno obtežbo celotnega pregradnega profila.

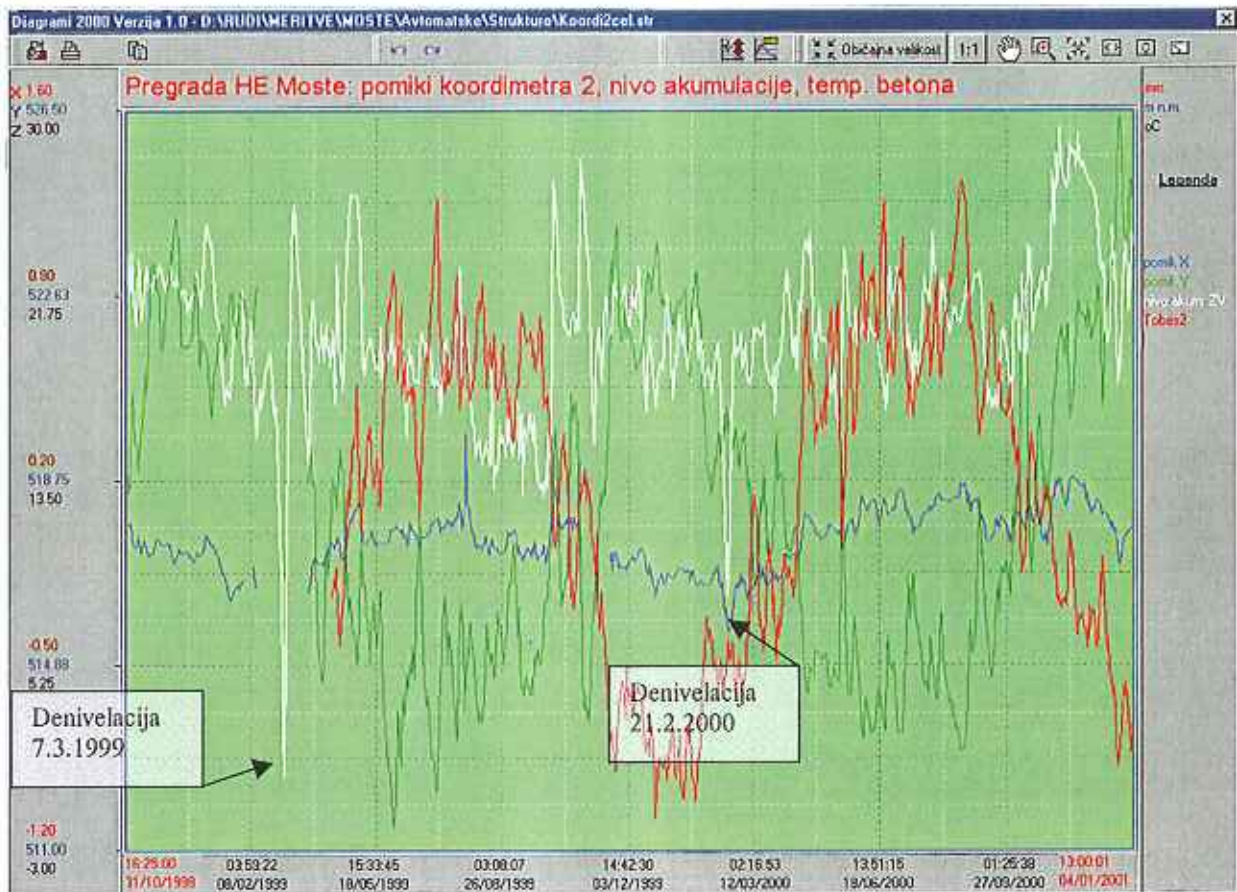
Na **sliki 3** so od vzpostavitve sistema oktobra 1998 do konca leta 2000 prikazani kronološki diagrami merjenih parametrov, ki so vezani na mersko mesto KOORDII. Izbrani interval vzorčenja znaša 1 uro. V obdelavo je vključenih preko 60000 podatkov. Z belo barvo je prikazan diagram nivoja akumulacijskega jezera (ZV), z rdečo temperatura betona na obesišču koordinetra (T_{obes1}), z modro komponenta pomika koordinetra v smeri X, z zeleno pa komponenta v smeri Y. Z rdečo barvo je v mm predstavljena ordinata pomikov, z modro v °C ordinata temperature, s črno pa v nadmorski višini m n.m. ordinata nivoja akumulacijskega jezera.



Slika 3: prikaz pomikov KOORDII, nivoja jezera ZV in temperature betona T_{obes1}

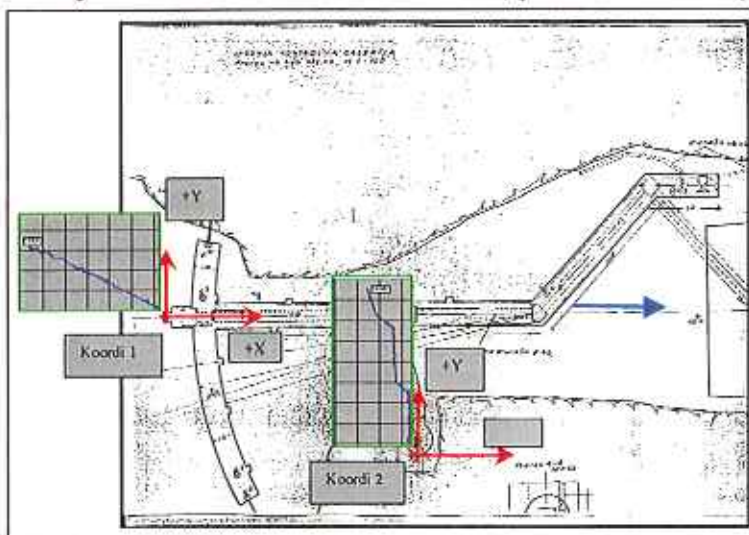
Že iz podanih diagramov je razvidno, da so izmerjeni pomiki KOORDII v temenu loka pregrade v občutni korelaciji s temperaturo betona T_{obes1} in nivojem jezera ZV. Obesišče KOORDII se nahaja v masivnem betonskem delu pregrade, zato so opazne le letne spremembe temperature, ki se v opazovanem obdobju gibljejo v mejah od 7.6 do 19.3 °C. S porastom temperature se krona pregrade pomakne proti jezeru in obratno. Dejstvo nakazuje vpliv ločnega tipa pregrade. Pomiki v smeri X zajemajo vrednosti med 0.53 in -1.15 mm, pomiki v smeri Y pa so bistveno manjši (med 0.30 in -0.70 mm), kar je glede na deformacijske pogoje pregradnega profila tudi pričakovano. Priraščanja merjenih pomikov s časom ni opaziti, kar pomeni, da trajne deformacije pregradnega profila v opazovanem obdobju ne obstajajo. Posebno pozornost je treba posvetiti spremembam merjenih pomikov v času večje praznitve jezera. Iz diagrama nivoja jezera je razvidno, da sta dne 7.3.1999 oziroma 21.2.2000 zaradi planiranih rednih letnih remontov elektrarne izvedeni dve večji praznitvi jezera. V odvisnosti od planiranega trajanja remonta se jezero pred remontom izprazni, v odvisnosti od dotoka Save pa se med remontom polni. V času obeh remontov je reakcija obeh komponent pomika lepo vidna. Pričakovano je večja sprememba nastopila pri pomiku v smeri X. Pri znižanju nivoja jezera za 8.8 m se je krona pregrade pomaknila v smeri proti jezeru za 0.3 mm. Podrobnosti v zvezi s tem bodo podane v nadaljevanju.

Na **sliki 4** so podani kronološki diagrami merjenih parametrov, ki so vezani na mersko mesto KOORDI2. Barve, s katerimi so prikazani posamezni diagrami, so izbrane identično kot v predhodni sliki.



Slika 4: prikaz pomikov KOORDI2, nivoja jezera ZV in temperature betona T_{obs2}

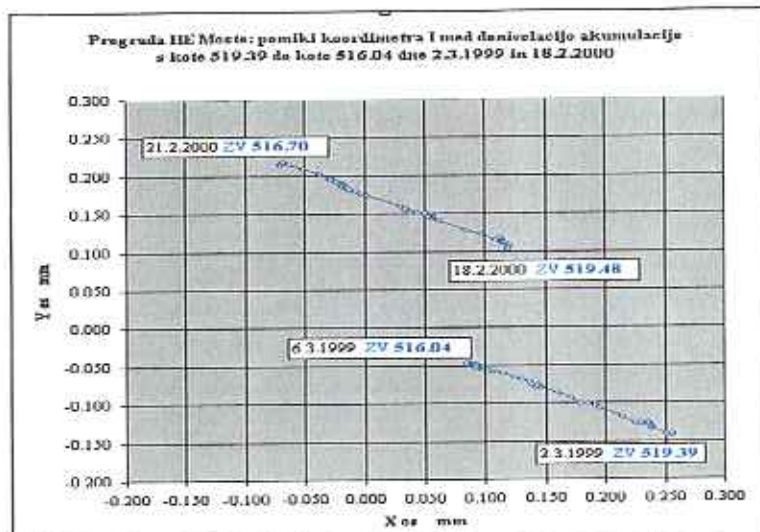
Iz diagramov je razvidno, da so izmerjeni pomiki v smeri Y v občutni odvisnost od dnevnih in letnih sprememb temperature betona T_{obs2} . Obesišče KOORDI2 se nahaja na vrhu stopniščnega jaška, ki sega izven telesa pregrade (slika 2). Izmerjeni pomiki so posledica deformiranja zunanega dela jaška, ki je pod večjim vplivom osončenja le iz smeri Y (slika. 1). Pomiki v smeri Y zajemajo v opazovanem obdobju vrednosti med 1.57 in -1.11 mm, pomiki v smeri X pa so relativno majhni (med 0.22 in -0.34 mm).



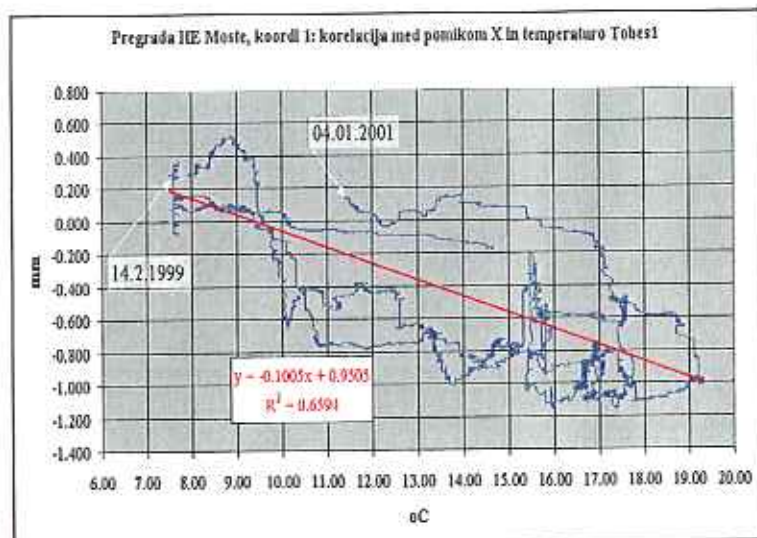
Slika 5:

V času praznitve jezera je opazna reakcija pomikov v smeri X, v smeri Y pa je manj izrazita. Ker se mersko mesto KOORDI2 ne nahaja v masivnem delu pregradnega profila, oziroma je pod velikim vplivom temperaturnega delovanja, za analizo ni zanimivo, zato v nadaljevanju ne bo obravnavano.

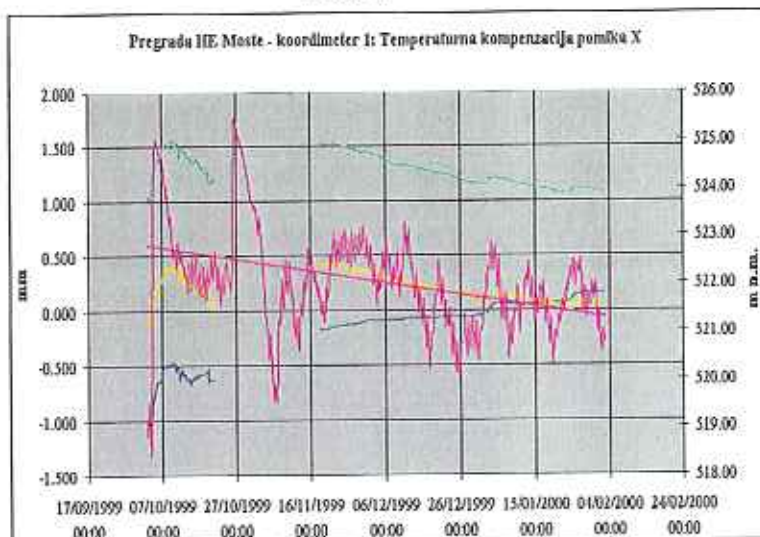
Na **sliki 5** so prikazani sočasni pomiki obeh koordimetrov, ki so se razvili v času praznitve jezera marca 1999. Pomiki obesišče so projicirani na horizontalno ravnino skozi spodnji kontrolni hodnik pregrade. Pomiki so



Slika 6



Slika 7



Slika 8:

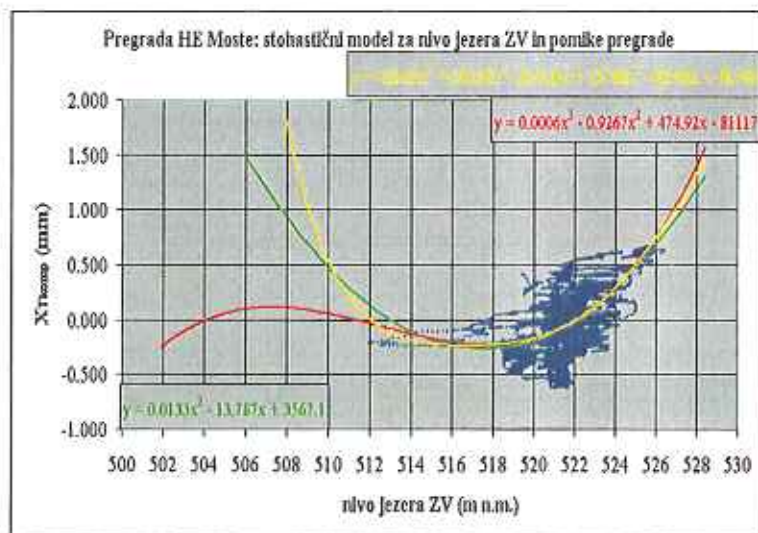
praktično premočrtni, velikostnega reda 0.3 mm. Smer pomika KOORDI2 je glede na deformacijske pogoje nepričakovana. Pri ponovni praznitvi konca februarja 2000 se ni ponovila, zato so bili takšni pomiki verjetno posledica drugih vzrokov. Pač pa se je med obema praznitvama, kot je prikazano na **sliki 6**, ponovila smer pomikanja KOORDI1. Prikazan je le tisti del pomikov, ki se je razvil pri približno enakih hirostih praznjenja in spremembah gladine jezera. Pomiki niso soležni, ker praznitvi nista potekali pri enakih temperaturnih pogojih. Jasno pa je razvidno, da se

med spreminjanjem gladine jezera krona pregrade pomika tudi proti njenemu desnemu boku in vedno v enaki smeri, kar pomeni, da je togost desnega boka relativno majhna. Točke na diagramih pomikov sopodane ob polni uri natančno v času vzorčenja. Razdalje med točkami niso enake, kar pomeni da pomikanje pregrade pri enaki hitrosti zniževanja gladine jezera ni enakomerno. Na **sliki 7** je za obdobje od 14.2.1999 do 4.1.2001 prikazana korelacija med izmerjenim pomikom KOORDI1 v smeri X in temperaturo betona T_{obes1} . Za navedena parametra je izračunana

regresijska premica, podan je tudi koeficient korelacije, ki znaša $\rho = -0.812$. Podobno sliko, ki pa ni prikazana, dobimo tudi za korelacijo med pomikom X in gladino jezera ZV, le da je v tem primeru koeficient korelacije pozitiven in bistveno manjši. Dokler so izmerjeni parametri v okviru njihovih envelop, lahko rečemo, da je obnašanje objekta normalno.

Na **sliki 8** je za prikazano obdobje podana temperaturna kompenzacija pomika KOORDI1 v smeri X. S temno modro barvo je prikazan pomik X kot posledico spremembe gladine jezera in temperature hkrati (izmerjeni pomik), s svetlo modro in

rumeno barvo pa pomik X_{Tkomp} le kot posledico spremembe nivoja jezera ZV. S svetlo modro barvo označeni pomiki X_{Tkomp} so izračunani s pomočju enačbe: $X_{Tkomp} = X + kT_{obes}$, pri čemer je k koeficient temperature, oziroma naklonski kot premice, določene pri enakih nivojih jezera ZV. Z rumeno barvo označeni pomiki so izračunani na osnovi regresijske premice iz slike 7. Z vijola barvo je prikazan nivo jezera ZV in njegova linija trenda. Diagrama X_{Tkomp} , določena po navedenih dveh metodah, sta razmaknjena namenoma. Iz njiju je razvidno, da sta metodi temperaturne kompenzacije izmerjenih pomikov enakovredni, saj dajeta praktično enake rezultate. Medtem ko pomik X s časom raste, pomik X_{Tkomp} pada in sicer vzporedno z linijo trenda ZV, kar pomeni, da so ti pomiki pri danem obtežbenem nivoju v linearni odvisnosti od obtežbe ZV. Diagram pomikov X_{Tkomp} , določenih s pomočju regresijske premice, je za celotno opazovano obdobje prikazan na sliki 3 (črna barva).



Slika 9:

Slika 9 prikazuje stohastični model za analizo sovisnosti med nivojem jezera ZV in pomikom krone pregrade X_{Tkomp} . Lahko bi rekli, da območje dobrega prileganja privzetih regresijskih krivulj predstavlja „deformacijski zakon“ pregrade. Kaže, da ga najbolje opisuje polinom tretjega reda. Razvidno je tudi, da je model za nižje nivoje jezera ZV zaenkrat neuporaben, sprejemljivo dobre rezultate pa daje do nivoja jezera 528.00 m n.m.. Podane krivulje vsekakor nakazujejo pomembno dejstvo, da pomik X_{Tkomp} z dvigovanjem jezera do navedenega nivoja ne bi rasel preko vseh meja. Objekt bi bil pri statičnih obtežbah v tem primeru še vedno stabilen. Model se bo z leti nadgrajeval in bo dajal vse bolj zanesljive rezultate tudi za večja praznjenja jezera.

4.0 ZAKLJUČKI

Opisani primer gradbenega monitoringa podaja možnosti spremljanja tovrstnih pa tudi drugih gradbenih objektov, pri katerih je projektne osnove težko določiti in preverjati. Na opisani način je mogoče analizirati, ali se objekt obnaša v običajnih okvirih, do neke mere pa tudi napovedati, kaj bi se z njim zgodilo, če bi se pogoji za njegovo življenje spremenili. Predstavljeni primer monitoringa bi vsekakor veljalo nadgraditi s povezavo med stohastičnim (statističnim) in determinističnim modelom.

VIRI:

- Poročilo o opreventivnem monitoringu pregradnega objekta HE Moste v letu 1999, NTF Ljubljana,
- Merjenja i posmatranja na brani HE Moste za vreme probnog punjenja akumulacionog basena, ing. Matej Kleindienst, prof.dr. Lujo Šuklje,
- Sicherheit und Kontrolle von Talsperren, Von O. Ganser und A. Niel, 1980,
- Akvizicija i obrada podataka o ponašanju brana, Uporedjenje sa statističkim i determinističkim modelima, Upravljanje rezultatima, prof. ing. M. Fanelli, ENEL,
- Predlog preverbe varnosti pregrade HE Moste, R. Brinšek, Velike pregrade, 1997.

TEHNIČNO OPAZOVANJE STROJNICE MOSTE

Mojca Ravnikar Turk, univ.dipl.inž.gradb.,

Vodja odseka za geotehnično opazovanje, ZAG Ljubljana, Dimičeva 12, Ljubljana

Povzetek

Podzemna strojnica HE Moste je okoli dvajset metrov vkopana v prekonsolidirano sivo lapornato glino. Horizontalni elementi strojnice so armirano-betonski, medtem ko so stene iz nearmiranega betona. Kmalu po izgradnji leta 1952, oziroma tudi že med gradnjo, so se v nearmiranih stenah strojnice začele pojavljati razpoke. V letu 1954 so bila vzpostavljena prva merska mesta. Število in širina razpok sta se večali, zato se je obseg tehničnega opazovanja postopno povečeval. Rezultati dolgoletnih meritev so kazali, da se objekt razteza v vertikalni smeri in da se zgornji del nagiba proti Savi. Deformacije strojnice se v kasnejši letih niso umirjale. Pogojevalc so varnost delovanja agregatov, zato je bila strojnica večkrat sanirana, med drugim so bile nearmirane stene ojačane s prednapetimi sidri.

Tehnično opazovanje strojnice Moste se izvaja že 47 let. Sedaj imamo tri opazovalne sisteme: objekt podzemne strojnice, vplivnega terena strojnice ter strojne opreme.

V prispevku je opisan obstoječi opazovalni sistem, ki zajema geodetske meritve horizontalnih in vertikalnih pomikov, meritve razpok in meritve vertikalne inklinacije.

MONITORING OF THE MOSTE POWER PLANT

Abstract

For the underground structure of the Moste power plant about twenty meters deep excavation has been made into gray preconsolidated marley clay. The walls of the structure are made of plain concrete while the slabs are made of reinforced concrete. Soon after the completion of works in 1952 or during the construction, cracks became visible in the plain concrete walls. In the year 1954 first measuring points were set up. The number of visible cracks was increasing while the existing cracks were widening. The extent of monitoring was gradually increased. The results of long-term measurements showed displacements upwards and towards the river Sava. Since the deformations did not show decreasing tendency, safe operation of the power plant was endangered. Different types of remedial works have been accomplished including reinforcing of the walls with prestressed steel anchors.

Monitoring of the Moste power plant has been implemented for the last 47 years. Nowadays three objects are being monitored: the underground structure, the ground affected by the structure and the engines in the underground power plant.

The paper deals with the established monitoring system, which consists of the surveying of vertical and horizontal movements, measurements of vertical inclination and crack measurements.

1 UVOD

Strojnica HE Moste je situirana približno en kilometer dolvodno od pregrade Moste na levem bregu Save Dolinke. Na območju strojnice je dno korita Save približno na koti 467m. Strojnica je podzemna, na koti terena 472,3 m je le krovna plošča z odprtinami za transport večje strojne opreme in prezračevanje. Najnižja kota strojnice je 451,45m, tako da je višina objekta 21m. Vzdolžna os strojnice je približno paralelna s koritom Save. Zunanji del objekta je prikazan na sliki 1.



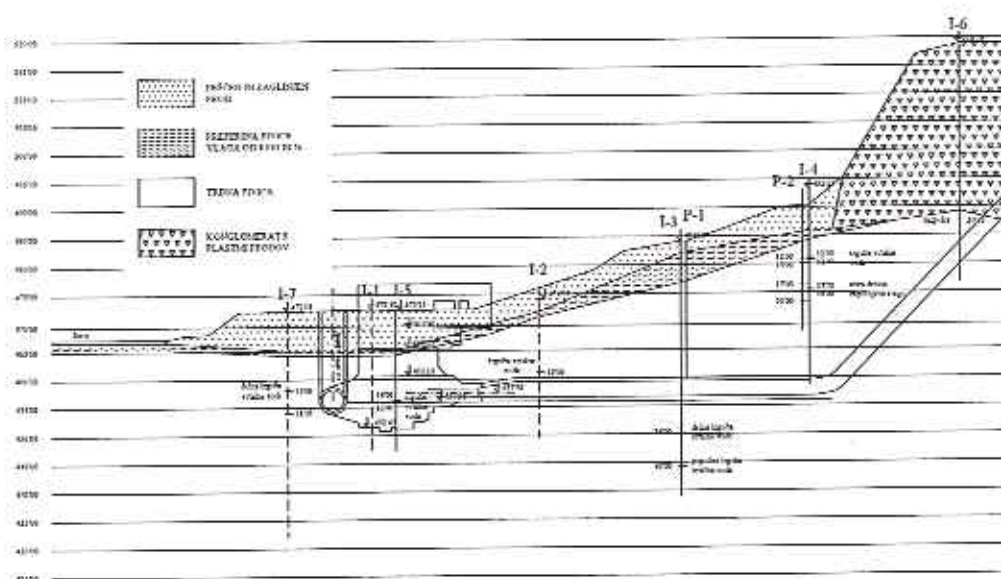
Slika 1 - Podzemna strojnica Moste

Gradbena dolžina objekta je 37m in ima štiri etaže: turbinska etažo širine 16,6m, regulatorsko širine 14,3m, spodnjo generatorsko širine 18,6m in zgornjo generatorsko dvorano širine 24,3m. Prerez strojnice s shematsko prikazanimi etažami je na sliki 2.

Pomembnejši elementi strojnice so še zračni jaški na savski strani ter objekti, ki so priključeni na strojnico: dovodna tlačna jeklena cevovoda sistema Moste in sistema Završnica na pobočni strani ter odvodni tunel na savski strani strojnice. Jekleni cevovod sistema Moste je ob strojnici razvejan na tri manjše cevovode, premera 1,5 m, ki vodijo do turbin agregatov 1, 2 in 3. Na vzvodnem delu strojnice je vgrajen reverzibilni agregat sistema Završnica, povezan z ločenim cevovodom premera 1,4 m. Na savski strani strojnice so turbinski iztoki vseh štirih agregatov, ki vodijo v odvodni tunel, premera 4,0 m in dolžine 1500 m. Širina strojnice z upoštevanjem odvodnega rova je 26,1 m.

Skupna maksimalna moč agregatov znaša 21,7 MW. Vertikalne, 11,8 m dolge osi agregatov imajo nosilne ležaje tik pod generatorji, vsaka os pa ima še štiri vodilne ležaje, dva generatorska in dva turbinska.

Strojnica je bila dograjena leta 1952. Prostor za agregat na dolvodni strani je bil v spodnjem delu izkopen podzemno, da bi se čim bolj preprečilo vlaženje izkopnih površin in zavarovala njihova stabilnost. Ker je ostala glina po odkopu trdna, je bila gradbena jama za ostale agregate izkopana po vsej globini odprto (proti padavinam je bila zavarovana z začasno streho). Večje nabrekanje in luščenje se je pojavilo le v odvodnem rovu, kjer so ostale površine dolgo nezabetonirane. Horizontalni elementi strojnice so armirano-betonski, medtem ko so vsi vertikalni elementi zgrajeni iz nearmiranega betona. Nekatere stene so bile obzidane z opeko.



Slika 2 - Geološki prerez

Strojnica HE Moste je vkopana v oligocensko prekonsolidirano sivo lapornato glino, imenovano sivico. V sivici je s tanjšim rečnim prodnim pokrovom oblikovano korito Save. Karakteristični prerez pobočja in lega strojnice je na sliki 2. Površje sivice je prekrito z dva do štiri metre debelo prodno plastjo. V plasti glinasto peščenega proda oziroma nasutja se nahaja le generatorska etaža strojnice. Zaglinjen peščen prod se nahaja tudi na pobočju nad strojnico. Pod to plastjo se pojavlja preperela sivica s vsebnostjo vlage od 8 do 21%, ki dokaj naglo preide v trdno sivico naravnosti vlažnosti od 2 do 5%. Trdna sivica se nahaja tudi še na koti 430 m, to je okoli 37 m pod dnom korita Save, globlje pa hribina ni bila raziskana. Pobočje zaključuje strma konglomeratna brežina, ki se konča s teraso na koti cca 519 m, na kateri se nahaja upravna stavba, razvodna postaja in ostali spremljajoči objekti. Nad upravno stavbo terasa zopet pride v brežino, konglomeratno prodne sestave, ki se zaključi z zgornjo savsko teraso na koti cca 542 m. Pod konglomeratno teraso se sivica v najvišji točki pojavlja na koti 489 m, kjer dobi tudi nasprotni naklon. Sivica je prekonsolidirana in tektonsko prepokana. V prisotnosti zraka in vlage nabreka.

Kmalu po izgradnji strojnice v letu 1952, oziroma tudi že med gradnjo, so se v nearmiranih stenah strojnice začele pojavljati razpoke. Ker so se hitro večale, so bila v letu 1954 vzpostavljena prva merska mesta za registriranje pomikov. Obseg meritev se je postopno povečeval in obnavljal. Rezultati meritev so kazali, da se objekt razteza v vertikalni smeri in striže v horizontalnih ravninah. Deformacije strojnice se v kasnejši letih niso umirjale. Pogojevale so varnost delovanja agregatov, zato je bila strojnica v začetku leta 1980 sanirana s prednapetimi sidri. Po nekaj letih so začela sidra popuščati in deformacije strojnice so začele zopet priraščati. V letih 1993 in 1994 je bila strojnica ponovno sanirana s prednapetimi sidri. Vgrajena so bila večinoma vertikalno v nearmirane stene. Dodane so bile tudi armaturne palice za prevzem strižnih sil. Zadnja sanacija strojnice je bila obsežnejša od predhodne. Procent armiranja vertikalnih elementov strojnice znaša z izdelavo vertikalnih linijskih ojačitev cca 0.07%. Večjega procenta armiranja v osnovnem betonu z izdelavo ni več mogoče izvesti.

Rezultati raziskovalnih del in meritev kažejo, da so deformacije strojnice posledica zemeljskih pritiskov, nastalih zaradi počasnega plazenja trdne sivice po starih navlaženih razpokah, plazenja

preperle sivice na pobočju, reoloških pojavov v trdni sivici zaradi njene razbremenitve v geološki preteklosti in sedanjosti.

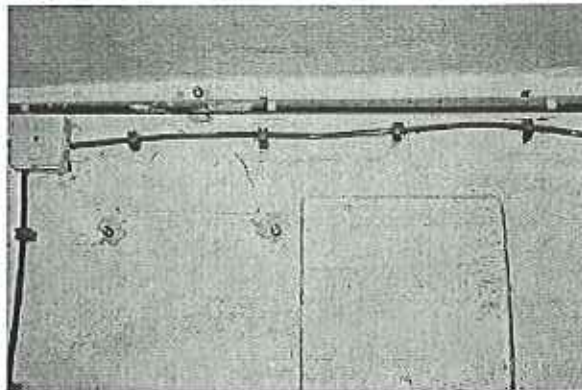
Dve leti po dograditvi podzemnega objekta so se vzpostavila prva merska mesta za registriranje pomikov. Obseg meritev se je postopno povečeval in obnavljal. Tako imamo 47 let pozneje tri opazovalne sisteme:

- 1) objekt strojnice - meritve razpok in geodetske meritve (redne, ki se izvajajo enkrat letno, ter izredne v času remontov in posebnih dogodkov - potres),
- 2) vplivnega terena v okolici strojnice - geodetske meritve in meritve vertikalne inklinacije (redne letne meritve),
- 3) strojne opreme (3-osni koordinimeter, elektronske libele - stalne meritve).

2 TEHNIČNO OPAZOVANJE PODZEMNE STROJNICE

2.1 Meritev razpok

Odpiranje oziroma zapiranje karakterističnih razpok v vseh etažah strojnice se spremljajo s pomočjo deformetra. Mersko mesto sestavljajo tri točke: dve na eni strani razpoke in tretja na drugi. Razdalja med temi točkami se meri z natančnostjo 0,05 mm. Meritve razpok se v zadnjih letih izvajajo enkrat letno. Delovanje dveh razpok v spodnji turbinski etaži se spremlja od leta 1954. Ena izmed njiju se v zadnjih desetih letih ne odpira več, se pa je pojavila višje pod stropom nova razpoka. Na sliki 3 sta prikazani staro in novo mersko mesto.



Slika 3 - Staro in novo mersko mesto v turbinski etaži

Objekt je najbolj poškodovan na dolvodni strani; zaledna stena, vogalni jašek in zunanja stena ob stopnišču v nivoju plošče regulatorске etaže. Če bi poznali podatke o odpiranju vseh razpok nosilnih elementov konstrukcije, bi lahko izračunalo pomike celotnega objekta. Vendar pa so nekatere nosilne stene strojnice obzidane z opečnimi in betonskimi zidovi (obe glavni stopnišči ter tudi nekatere vzdolžne stene).

Veliko poškodb v nosilnih elementih je skritih, tako da jih nismo evidentirali in njihovega razvoja nismo spremljali. V nosilnih betonskih stenah so razpoke z zamiki nekaj centimetrov. Velike deformacije strojnice in njenega zaledja so se izvršile že v času gradnje objekta. Na sliki 4 je prikazana zunanja stena stopnišča. Vidna je razpoka v steni, ki pa ni nosilen element temveč

obloga. Pod njo je na nosilni steni viden prestrig, ki je nastal že v času gradnje. Novo mersko mesto je vzpostavljeno na nosilni steni strojnice.

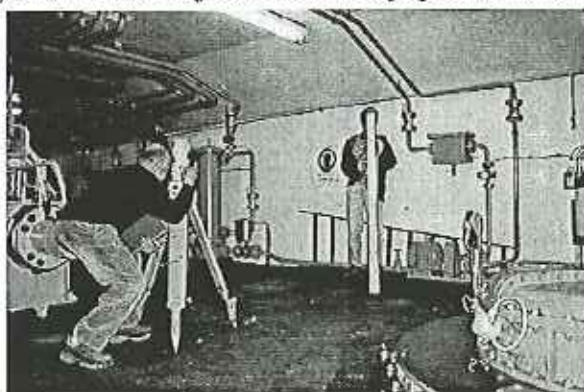


Slika 4 - Zunanja in obložna stena južnega stopnišča

prednosti	dolgoletno redno opazovanje karakterističnih razpok omogoča spremljanje trendov	meritev je zelo natančna
pomanjkljivosti	veliko razpok ni dostopnih	ne spremljamo vseh deformacij

2.2 Precizni nivelman

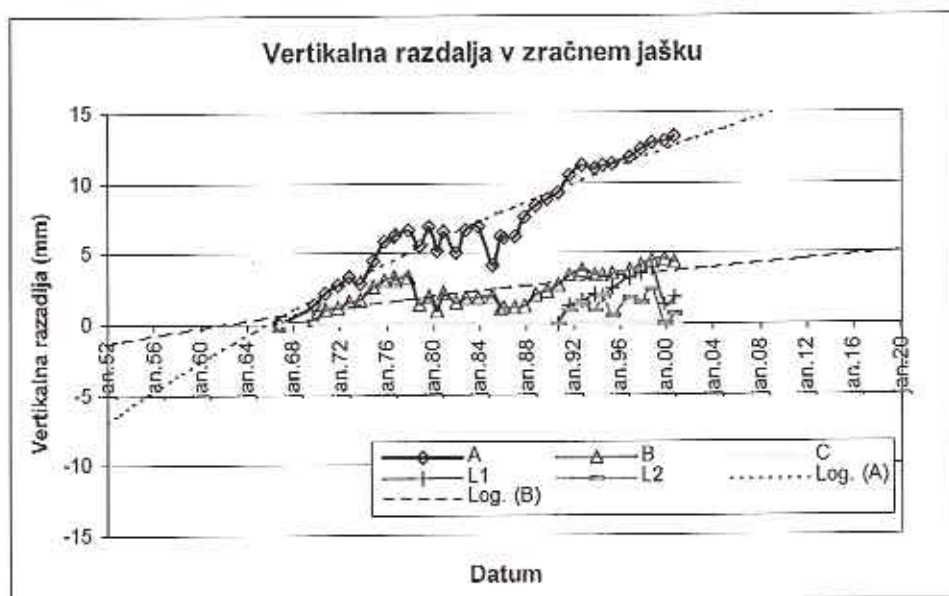
V istem času kot meritve razpok se izvajajo tudi geodetske meritve vertikalnih komponent pomikov reperjev v vseh etažah strojnice z natančnostjo $\pm 1\text{mm}$. V vsaki etaži strojnice je šest do osem repernih točk, vgrajenih v stene strojnice. Na sliki 5 je prikazano niveliranje v cni etaži.



Slika 5 - Niveliranje v regulatorski etaži

V enem izmed zračnih jaškov je osnovni reper za posamezno etažo (v spodnji generatorski etaži preciznega nivelmana ni). Reper C se nahaja v zračnem jašku na nivoju turbinske etaže, reper B v regulatorski etaži, reper A pa je osnova za meritve v generatorski etaži in na krovu strojnice. S pomočjo invarske žice merimo razdaljo med posameznimi reperji in tako dobimo relativne vertikalne pomike reperjev v strojnici glede na turbinsko etažo. Med turbinsko etažo in talno ploščo strojnice sicer ni evidentiranih razpok, ki bi kazali na večje pomike med temelji in reperjem C, vendar le-ta gotovo ni nepomičen. Zaradi neugodne geološke sestave tal v okolici strojnice Moste nismo mogli vzpostaviti nepomičnega stojišča. Da bi ugotavljali absolutne dvižke oziroma posredke strojnice, je vsaki dve leti narejena navezava na osnovni reper v naselju Moste. Ker je višinska razlika med tema reperjema velika (okoli 70m) je ta meritev manj natančna. Glede na te

meritve je absolutni dvig krova strojnice (točka A od leta 1966) 2,6 cm. Na sliki 6 je prikazano povečevanje razdalje med turbinsko etažo in krovom strojnice v zračnem jašku. Meritev se je pričela leta 1966, povečanje razdalje pa znaša 1,3cm. Če suponiramo še začetno tendenco, je dosedanji raztezek zračnega jaška strojnice okoli 2cm. Na diagramu so prikazani tudi rezultati meritev razdalje med tlomi turbinske in stropom regulatorne etaže (L1, L2).



Slika 6 - Povečevanje vertikalne razdalje med reperji A, B in C

prednosti	dolgoletne meritve omogočajo spremljanje trendov	poznani so relativni pomiki v posameznih etažah
pomanjkljivosti	vertikalni raztezek objekta se meri le na enem mestu	meritev absolutnih vertikalnih pomikov je manj natančna

2.3 Horizontalni premiki

Zaradi neugodne geološke sestave tal v okolici strojnice Moste nismo mogli vzpostaviti mreže nepomičnih stojšč, ki bi omogočale določitev koordinat točk z veliko natančnostjo.

Horizontalni pomiki točk na vrhu zračnih jaškov v prečni smeri strojnice (proti Savi) so se merili glede na objekt Završnica. Rezultati meritev so kazali pomike objekta za 7 do 9 mm v tridesetih letih (1961-1989). Od leta 1990 se spremljajo v zračnih jaških odkloni od vertikale (na dolžini 13,5m). Iz teh meritev dobimo horizontalne pomike glede na spodnjo točko. Rezultati meritev v treh jaških od leta 1990 kažejo pomike od 2 do 4mm proti Savi. Kljub manjši natančnosti določitve koordinat točk je očitno, da se krov objekta pomika proti Savi in sicer na dolvodnem delu bolj kot na gorvodnem delu.

prednosti	dolgoletne meritve dajo grobo oceno o relativnih horizontalnih pomikih	
pomanjkljivosti	ne poznamo absolutnih pomikov strojnice	ne moremo ugotavljati prostorskih deformacij strojnice

2.4 Druge meritve

V sklopu rednih letnih meritev se spremljajo tudi deformacije zračnih jaškov. Pred drugo sanacijo s prednapetimi sidri so se pričele meritve spreminjanje odprtine na sredini zračnih jaškov na koti krova. Odprtina se v vseh treh jaških počasi večja, vendar povečanje še ni preseglo enega milimetra.

Ob vsakem remontu (zadnja sta bila 1995 oziroma 2001) se s preciznim nivelmanom preverja horizontalnosti zvezd nosilnih ležajev agregatov v generatorski etaži.

2.5 Vizualni pregledi

Kataster razpok je bil prvič izdelan v začetku leta 1990 v okviru sanacije konstrukcijskih razpok na objektu. V vzdolžnih stenah strojnice so razpoke horizontalne, pretežno diagonalne pa v prečnih stenah v stopniščih na gorvodni in dolvodni strani ter v zračnih jaških. Na sliki 7 so prikazane poškodbe v regulatorski etaži (2001).



Slika 7 - Regulatorska etaža

Po vsaki sanaciji strojnice (prednapeta sidra, razpoke), večjih remontnih delih (dela na tlačnem cevovodu), ali drugih vplivih (potres) se napetostno stanje v nosilnih elementih strojnice spremeni. Zato se nekatere razpoke stisnejo ali se prenehajo širiti, pojavijo pa se nove poškodbe. Zaradi obzidave nekaterih nosilnih elementov pa vsch poškodb do sedaj še nismo evidentirali, kar brez večji gradbenih posegov tudi ni mogoče. Kataster razpok je potrebno redno obnavljati.

3 OPAZOVANJE VPLIVNE OKOLICE STROJNICE

Vplivna okolica strojnice zajema območje med Savo in konglomeratno teraso (slika 2). Sistem geodetskega opazovanja pomikov reperjev na poševni žerjavni progi med strojnico in upravno stavbo (od kote 519m do 472m) je bil vzpostavljen že leta 1966. Leta 1991 pa je bil le-ta temeljito obnovljen in dopolnjen. Na bregu je bilo postavljenih osem geodetskih točk ter izdelanih sedem vrtn, v katere so bile vgrajene inklinacijske cevi.

3.1 Geodetske meritve

Merjene vertikalne komponente celotnega sistema ob strojnici in na pobočju nad njo so vezane na osnovni reper v naselju Moste, horizontalne komponente na vzdolžno os poševne žerjavne proge, tako da se merijo le pomiki v eni smeri - proti Savi.

Absolutna kota reperja ob vrhu poševne žerjavne proge (na konglomeratni terasi) je ostala od začetka meritev pred tridesetimi leti do sedaj praktično nespremenjena. Pri reperjih na spodnji polovici proge pa so izmerjeni dvigi, ki se zvezno večajo od višje proti nižje ležečim reperjem. Največji dvizek ima spodnja točka in sicer 2 cm.

prednosti	evidencimo površinske nestabilnosti nad strojnico	
pomanjkljivosti	reperne točke so izpostavljene poškodbam - ni kontinuitete	merimo horizontalne pomike le v eni smeri

3.2 Meritve vertikalne inklinacije v okolici strojnice

Z merjenjem inklinacije vrtin je predvideno spremljati horizontalne komponente pomikov sivice in njene preperine na pobočju in ob strojnici. Lokacija vrtin je prikazana na Sliki 2. Inklinacijska sonda meri odklone glede na vertikalo v dveh med seboj pravokotnih oseh A in B, definiranih s smerjo utorov na profilirani cevi Φ 50mm v vrtini. Pozitivna A os kaže v smeri padnice pobočja (pričakovana smer pomikov), pozitivna B os pa proti toku Save. Natančnost merilne sonde je 0,02mm na korak. Pri posameznem koraku se izmeri odklon od vertikale dvakrat. Če je vrednost pri obeh meritvah enaka, je napaka posameznega koraka zelo majhna oziroma enaka natančnosti naprave. Natančnost posamezne meritve pa je odvisna predvsem od stanja inklinacijske cevi. Če je cev umazana, močno deformirana ali pa je kontakt med profilirano cevjo in zemljino slab, je na posameznem koraku natančnost meritve manjša, kar bistveno vpliva na natančnost cele meritve. Pri izvedbi meritev na obstoječe stanje cevi ne moremo vplivati. Pri vseh merskih mestih je privzeto, da je spodnja točka nepomična, kar je zaradi velike dolžine vpetja v trdno sivico, realno.



Slika 8 - Izvedba meritev

Dve inklinacijski vrtini (I-3, I-4), ki ležita višje na pobočju (slika 2) sta bili štiri leta po vgradnji prckinjeni na kontaktu med trdno in preperelo sivico. Rezultati meritev kažejo, da so horizontalni pomiki na vseh ostalih merskih mestih manjši od 2cm. Izvedba meritev je prikazana na sliki 8.

Meritev vertikalne inklinacije potrjujejo rezultate geodetskih meritev na bregu nad strojnico. Del brežine drsi oziroma leze po kontaktu med preperelo in trdno sivico. Globina drsne ploskve je na opazovanih območjih osem do deset metrov. Smeri in hitrosti lezenja s preostalim oprazovalnim sistemom ne moremo določiti.

prednosti	deformacije spremljamo po globini (prostorski pomiki)	meritev je natančna
pomanjkljivosti	potrebna je obnova, saj sta dve ključni merski mesti uničeni	

4 ZAKLJUČEK

Rezultati raziskovalnih del in tehničnega opazovanja kažejo, da so velike deformacije strojnice Moste posledica zemeljskih pritiskov, nastalih zaradi lezenja trdne sivice po starih navlaženih razpokah, plazenja preperle sivice na kontaktu s trdno sivico ter reoloških pojavov v trdni sivici. Z meritvami izvedenimi v okviru tehničnega opazovanja, je dokazano lezenje preperle sivice na kontaktu s trdno sivico ter nabrekanje sivice v temeljnih tleh strojnice. Ti pojavi bodo tudi v naslednjih letih vplivali na deformacije strojnice. Zadnja sanacija strojnice s prednapetimi sidri je povečala monolitonost konstrukcije, kar je izboljšalo odpor proti prečnim silam. Vendar pa je trenje ob razpokah še vedno premajhno, da bi nudilo zadosten odpor zemeljskim pritiskom. Pričakujemo lahko nadaljnje deformiranje strojnice predvsem na dolvodni strani.

Tehnično opazovanje, ki bi omogočalo napovedovanje trendov, pa bi moralo zagotavljati:

- natančne podatke o prostorskem deformiranju objekta strojnice in o dosedanjih trendih deformiranja le-te.
- čim bolj realne podatke o silah na objekt oziroma podatke o smeri in hitrost drsenja preperine po trdni sivici.
- podatke o varnosti obratovanja - takojšnja zaznava spremembe položaja strojne opreme

Stanje objekta strojnice je, kljub številnim sanacijam, s stališča konstruktivne varnosti kakor tudi uporabnosti objekta, že dalj časa slabo. Vsekakor je smiselno, da se čim prej prične gradnja novega objekta strojnice Moste.

Viri:

- J. Batagelj - 2000 - Poročilo o geodetskih meritvah deformacij strojnice HE Moste v letu 2000, ZAG, Ljubljana
- M. Ravnikar Turk - 2001 - Poročilo o tehničnem opazovanju objekta HE Moste - strojnica v letu 2000, ZAG, Ljubljana
- V. Štruel, R. Brinšek - 1992 - Poročilo o vzpostavitvi dodatnega sistema tehničnega opazovanja z analizo rezultatov meritev in pregledov ter geomehanske raziskave zalednih materialov strojnice HE Moste, ZRMK Ljubljana
- L. Šuklje - 1980 - Zemeljski pritiski na podzemno strojnico Moste, Gradbeni vestnik

Vodostan HE Moste II

doc. dr. Andrej Širca, univ.dipl.inž.grad.

IBE, d.d., svetovanje projektiranje in inženiring, Hajdrihova 4, Ljubljana.
Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Hidrotehnična smer, Hajdrihova 28, Ljubljana.

Povzetek

Načrtovani vodostan HE Moste II je bil zanimiv izziv za slovensko hidrotehnično prakso. Prvotno zamišljena klasična rešitev se je izkazala za neoptimalno, zato so bile z uporabo matematičnih modelov študirane številne alternative. Na podlagi teh analiz je bil za izvedbo izbran diferencialni vodostan, ki je v Evropi razmeroma redek. V prispevku so prikazana izhodišča za načrtovanje, tri glavne variantne rešitve, osnovne enačbe matematičnih modelov ter vsebina simulacij. Za izvedbo izbrana varianta diferencialnega vodostana predstavlja optimalno rešitev treh specifičnih problemov lokacije HE Moste II: zaseda razmeroma majhno površino, je praktično v celoti pod zemljo in zato predstavlja majhen vpliv na okolje ter z nadtlaki le minimalno obremenjuje dovodni tunel. Poleg tega ima ugodne obratovalne karakteristike pri vseh manevrih, saj učinkovito blaži tlačna nihanja v sistemu.

Summary

The planned HPP Moste II surge tank showed up as an interesting challenge for the Slovenian hydro-technical sphere. The originally designed classic-type solution proved not optimal which resulted in studying of numerous alternative solutions by mathematical models. Based on these analyses, a differential surge tank which is rather unusual in Europe has been selected. The article gives designing starting-points, three main alternative solutions, basic equations of mathematical models and simulations contents. The differential surge tank selected for implementation gives an optimal solution of three specific problems of the HPP Moste II location: it covers a relatively small area, it is located under ground practically as a whole, and consequently its impacts to the environment are relatively weak. Last but not least, the headrace tunnel is only minimally impacted by the overpressures. Moreover, it has got favourable operating characteristics in all manoeuvres, for the pressure oscillations in the system are damped very effectively.

1.0 UVOD

Vodostan je objekt, ki se v sodobni slovenski, pa tudi marsikateri drugi hidrotehnični praksi razmeroma redko pojavlja. Razlog za to je vedno manjše število novih srednjetačnih in visokotlačnih hidroelektrarn, ki bi takšne objekte potrebovale, pa njihova izvedba često zastane zaradi vprašanj tehnološke narave. Poleg dveh novih vodostanskih objektov z manjšimi padci na

Soči (Plave II, Doblar II) je bil vodostan HE Moste zahtevnejši projektantski izziv, saj gre za sistem s srednjim padcem (75 m).

V okviru Idejne študije izgradnje HE Moste II je bil med dovodnim rovom in tlačnim cevovodom prvotno predviden klasičen vodostan z zgornjo in spodnjo komoro ter dušilko na povezavi z dovodnim rovom (Doinstalacija HE Moste, II. faza, IBE, 1996). Dodatna analiza je pokazala, da bi bila izvedba takšnega vodostana problematična, saj bi zgornja komora v obliki treh horizontalnih rofov segala s svojim zgornjim robom skoraj 2 m, skupaj s predvidenim zemeljskim nadkritjem pa 3 m nad obstoječo koto terena 530, pri čemer je visoka lega zgornje komore pogojena z visoko maksimalno koto gladine v bazenu (526). Takšna izvedba bi bila nesprejemljiva tako z vidika rabe prostora kot tudi estetskega vidika, zato so se v okviru Idejnega projekta iskale variantne rešitve z diferencialnim vodostanom (A), klasičnim vodostanom z zgornjo diferencialno (prelivno) komoro (B), vodostanom z veliko konusno zgornjo komoro (C) ter v obliki sinhronnega izpusta.

2.0 VARIANTNE REŠITVE

Ob izdelavi Idejnega projekta se je izkazalo, da prvotno predlagana rešitev s klasičnim vodostanom z zgornjo in spodnjo komoro ter dušilko na dnu ni optimalna iz naslednjih razlogov:

1. **najvišja kota akumulacije** je bila na lokaciji predvidenega vodostana le 4 m pod koto terena, kar je pomenilo, da je za zgornjo komoro na voljo le malo prostora: imeti bi morala zelo veliko površino ali pa gledati iz terena. Velika površina ni bila sprejemljiva zaradi potrebe po pridobitvi večjih kmetijskih površin,
2. še kritičnejši pa je med izvedbo IP postal **okoljski vidik**, saj je prišlo do zahtev, da je objekt kar najmanj moteč za okolje (krajinsko arhitekturni vidik). V smislu teh zahtev so postala nesprejemljiva zemeljska dela na večjih površinah.
3. tretji razlog za spremembo objekta je bila ugotovljena razmeroma **nizka nosilnost temeljnih tal** na območju dovodnega rova, iz česar je izšla zahteva, da se nadtlaki iz vodostana nič ali vsaj v čim manjši meri prenašajo v dovodni rov.

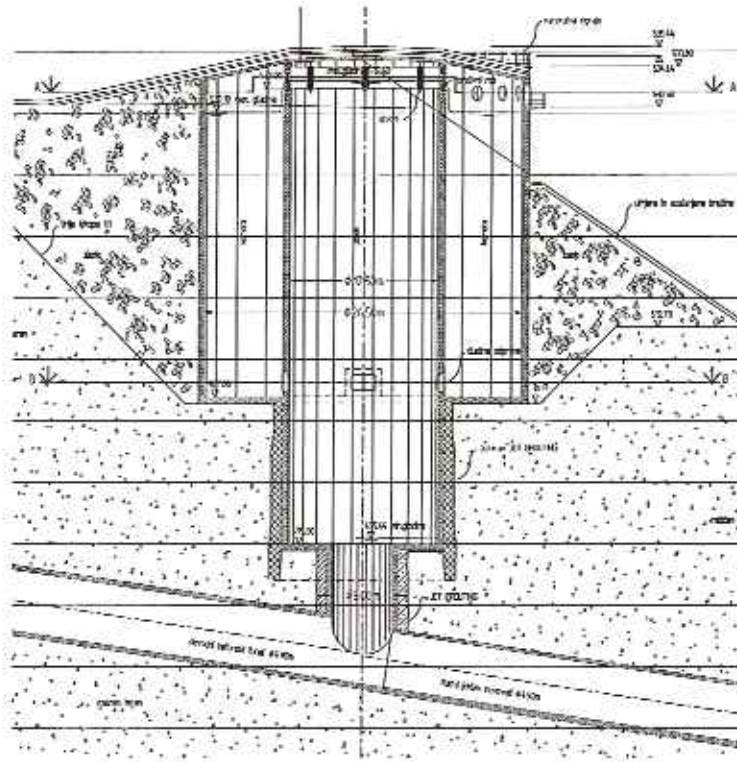
Sledilo je preizkušanje večjega števila različic, ki so v nadaljevanju prikazane v obliki treh osnovnih variantnih rešitev.

2.1 Varianta A – diferencialni vodostan

Ta varianta je bila po postopnem eliminiranju alternativ izbrana za optimalno, saj je izpolnjevala vse predhodno naštetje zahteve: izognila se je izvedbi površinsko obsežne zgornje komore, zagotovila majhen poseg v okolje ter dobro vklopljenost v okolje ter zagotovila tako varnost dovodnega rova kot učinkovitost obratovanja. Od vseh študiranih variant je bila namreč najbolj učinkovita pri dušenju masnih nihanj.

Diferencialni vodostan (slika 1) ima obliko dveh koncentričnih valjev, pri čemer ima jašek (notranji valj) svetlo površino prereza 123 m^2 ($\varnothing 12.5 \text{ m}$), komora pa 400 m^2 . Z upoštevanjem debeline stene jaška 0.5 m (zunanji \varnothing jaška 13.5 m), bi morala imeti torej komora notranji premer cca 26.3 m , zunanji premer pa večji za dvakratno debelino obodnega zidu. Kota preliva jaška je 532, kar je 2 m nad sedanjim nivojem terena. Vsi rezultati simulacij veljajo za opisano koncentrično postavitve, ki omogoča prelivanje vode med jaškom in komoro po celotnem obodu jaška. Dušilka na dnu

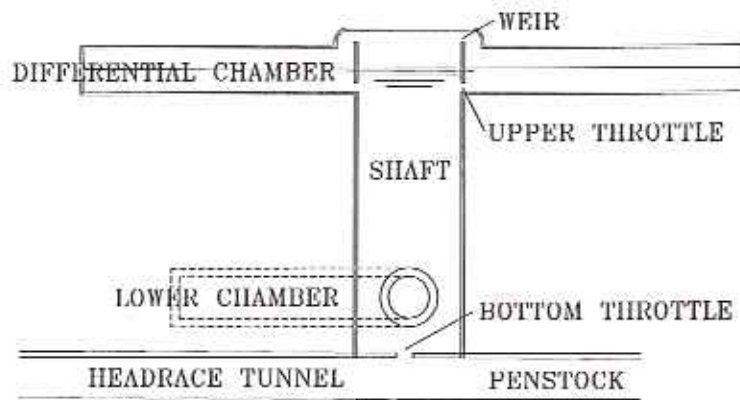
komore je nesimetrična s koeficientom asimetrije 2.48 in večjo prepustnostjo pri iztekanju iz komore (upadanju gladine). Dno diferencialne komore je predvideno na koti 507. Koristni volumen vodostana do kote terena je v tem primeru 13700 m³, volumen potrebnega izkopa pa cca 15800 m³. Višina vodostana do kote terena (globina izkopa) je 23 m. Vodostan (A) nima niti spodnje dušilke niti spodnje komore.



Slika 1: Delovna oblika diferencialnega vodostana (varianta A). Končna oblika po opravljeni reviziji s strani Verbundplana v letu 1998 ima vitkejši jašek in je brez zožitve na dnu.

2.2 Varianta B – ploščata zgornja komora

Vodostan v varianti B (slika 2) bi bil sestavljen iz prizmatične zgornje diferencialne komore s površino 1000 m², s koto spodnjega roba 525 in višino 5.5 m, jaška s premerom 12.5 m ter spodnje komore krožnega prereza \varnothing 4 m, dolžine 122 m in spodnjim robom na koti 497. Med jaškom in komoro bi bila nameščena enostransko prepustna zaklopka (klapna), ki omogoča le iztekanje vode iz komore. Vtok v komoro bi bil možen le preko preliva jaška na koti 530, kar je enako koti terena. Dušilka na dnu jaška bi imela koeficient asimetrije 1.5, z večjo prepustnostjo v primeru naraščanja gladine v vodostanu. Takšno orientacijo dušilke nam narekuje pogoj, da tlaki v dovodnem rovu ne smejo bistveno preseči statičnega tlaka ob najvišji koti gladine v bazenu (526 mm). Koristni volumen vodostana bi bil 11500 m³, volumen izkopa pa cca 13400 m³.



Slika 2: Skica rešitve vodostana v varianti B. Oznake pomenijo: differential chamber = diferencialna komora, weir = preliv, upper throttle = zgornja dušilka, shaft = jašek, lower chamber = spodnja komora, bottom throttle = spodnja dušilka, headrace tunnel = dovodni tunel, penstock = tlačni cevovod.

2.3 Varianta C – konusna zgornja komora

Varianta C je bila študirana kot potencialna modifikacija variante A, ko je bila sprejeta odločitev za gradnjo variante A v odprti gradbeni jami. Kar sama se je namreč ponujala rešitev, da se gradbena jama uporabi kot zgornja vodostanska komora. Vodostan, ki bi nastal na tak način, bi od variante A povzel le osnovni jašek v spodnjem delu. Temu bi v spodnjem delu dodali še horizontalno, cilindrično spodnjo komoro, kakršna je bila uporabljena v varianti B. Na zgornjih 24 m višine bi se jašek razširil na premer 85 m, pri čemer bi dobili lijakasto zgornjo komoro brez krovne konstrukcije (odprt bazen). Ta varianta je bila opuščena predvsem zaradi nesprejemljivega vpliva na okolje, pa tudi zaradi slabih karakteristik dušenja.

2.4 Ostale rešitve

Od analiz v zvezi z izborom objekta za redukcijo vplivov vodnega udara velja omeniti še dve: študijo možnosti uporabe sinhronega izpusta ter možnost uporabe visoko asimetrične (vrtinčne) dušilke. Za **sinhroni izpust** je bilo ugotovljeno, da že osnovna enačba za preliminarne analize:

$$T_1 = \frac{Q_{MAX}}{gH_0} \sum_1^n \frac{L_i}{A_i} \dots [s]$$

daje rezultat preko 12 s, kar pomeni, da je potrebno uporabiti vodostan. Za takšno rešitev je govorilo tudi dejstvo, da bo možna raba IIE Moste tudi za vzdrževanje frekvence in druge sistemske storitve, pri čemer bi ob uporabi sinhronega izpusta prihajalo do nesmiselnega trošenja v Sloveniji tako dragocene akumulirane vode. Oznake v navedeni enačbi pomenijo: T_1 = vztrajnostna konstanta derivacije pod pritiskom, Q_{MAX} = največji pretok pod derivaciji, H_0 = bruto padec, L_i = dolžina posameznega odseka derivacije, A_i = površina prereza posameznega odseka derivacije.

V zvezi z uporabo visoko asimetrične vrtilne dušilke sta bili v zvezi z njeno izvedbo ugotovljeni dve oviri: uspešnost objekta je bila vprašljiva zaradi razmeroma majhnega padca (do sedaj so se takšne dušilke uporabljale pri večstometskih ali celo tisočmetskih padcih), izvedbeno pa je veliko težavo predstavljala slabo nosilna hribina, saj je potrebno tovrstne objekte zaradi močnih vibracij ob disipaciji energije zelo dobro sidrati. Iz obeh razlogov je bila izvedba takšne dušilke opuščena, še vedno pa obstaja možnost uporabe več manjših diodnih dušilk v sklopu načrtovanega diferencialnega vodostana. Za tega namreč velja, da je tem uspešnejši, čim večja je asimetrija dušilke (ali dušilk) na povezavi med jaškom in komoro.

3.0 ORODJA

Pri načrtovanju sta se uporabljala programa CHAMTANK in DICHTANK s številnimi delovnimi različicami (Širca, 1997). Razmeroma preprosti CHAMTANK (CHAMber surge TANK) se je uporabljal predvsem za preverjanje prvotne, klasične rešitve. Program DICHTANK (Differential & CHAMber surge TANK) se je postopoma razvil v kompleksno in prilagodljivo orodje, ki lahko simulira masna nihanja v kombiniranem vodostanu z zgornjo diferencialno komoro, jaškom, spodnjo klasično komoro in dodatno dušilko pod spodnjo komoro. Površina zgornje komore po višini ni spremenljiva (stoječa prizma ali valj), spodnja komora pa ima krožen prečni prerez (ležeč valj). Program je sestavljen splošno, zato ga lahko z ustrežno kombinacijo parametrov uporabljamo za preračun čistih diferencialnih vodostanov (komora po vsej višini jaška) in kombiniranih vodostanov (zgornja diferencialna komora, z ali brez spodnje komore, z ali brez spodnje dušilke).

Oba omenjena programa sta bila verificirana z rezultati sorodnih matematičnih modelov in deloma z meritvami na fizičnih modelih, kar je podrobno prikazano drugje (Širca, 1998a). Prav tako so drugje podrobneje prikazane teoretične osnove modelov (Širca, 1997, 1998a, 1998b), ki so povzete tudi v nadaljevanju besedila.

3.1 Teoretične osnove

Enačbe za model DICHTANK so povzete po klasični literaturi (Rajar, 1980). Dinamična enačba za sistem dovodni rov - vodostan se uporablja v obliki:

$$\frac{L}{g} \cdot \frac{dQ_r}{S_r dt} + z_j + \lambda \frac{L \cdot Q_r^2}{S_r^2 2gD_r} = 0 \quad (1)$$

V njej kot L , Q_r , D_r , S_r nastopajo dolžina, pretok, premer in površina prereza dovodnega rova, gravitacijski pospešek g , čas t , denivelacija (glede na statično koto gladine akumulacijskega bazena) v jašku diferencialnega vodostana z_j in λ , koeficient hrapavosti dovodnega rova po Darcy-Weissbachu, ki ga izračunamo z uporabo Colebrook-Whiteove implicitne enačbe. Denivelacija z_j je pozitivna navzgor od statičnega nivoja. Naslednja enačba je kontinuitetna enačba za stik med dovodnim rovom, tlačnim cevovodom in jaškom diferencialnega vodostana:

$$Q_r - Q_t = Q_j + Q_k \quad (2)$$

v kateri poleg že omenjenega Q_r nastopajo še pretok v tlačnem cevovodu Q_t (pretok na turbini), pretok v jašku diferencialnega vodostana Q_j in pretok v komori Q_k . Q_r je pozitiven v primeru toka proti vodostanu, Q_t pa v primeru toka proč od vodostana. Q_j in Q_k sta pozitivna ob vtoku vode iz cevovoda v jašek oziroma komoro. Enačba dušilke med jaškom in komoro je enaka izrazu za račun gladin v veznih posodah (Steinman, 1992) in se glasi:

$$Q_k = \mu_d S_d \sqrt{2g(z_j - z_k)} \quad (3)$$

pri čemer je μ_d koeficient pretoka dušilke, odvisen od oblikovanosti odprtine. Njegova največja realna vrednost je 0.96, običajna 0.65, lahko pa je tudi manjša. V našem programu je upoštevana možnost asimetrične dušilke, zato se μ_d podaja posebej za iztok iz jaška in posebej za vtok vanj. S_d je površina prereza dušilke, z_k pa denivelacija (glede na statično koto gladine akumulacijskega bazena in pozitivna navzgor) v komori diferencialnega vodostana. Kontinuitetna enačba za jašek se glasi:

$$Q_j = \frac{S_j \Delta z_j}{\Delta t} + Q_{pr} \quad (4)$$

v kateri poleg že znanega Q_j nastopajo še površina prečnega prereza jaška S_j , sprememba kote v jašku Δz_j v časovnem koraku Δt in pretok preko preliva jaška Q_{pr} , ki je pozitiven v primeru toka iz jaška v komoro. Podobno obliko ima kontinuitetna enačba za komoro:

$$Q_k + Q_{pr} = \frac{S_k \Delta z_k}{\Delta t} \quad (5)$$

v kateri pomeni S_k površino prereza komore, Δz_k pa spremembo kote gladine v komori glede na statično koto v akumulaciji, v časovnem koraku Δt . Pretok preko preliva izračunamo z izrazom:

$$Q_{pr} = \frac{2}{3} \mu_{pr} B_{pr} \sqrt{2g(z_j - z_{pr})}^{3/2} \quad (6)$$

v katerem nastopajo pretočni koeficient preliva μ_{pr} , dolžina preliva B_{pr} in višinski položaj kote preliva z_{pr} (glede na statično koto v bazenu). Koeficient preliva se glede na oblikovanost, potopljenost in še nekatere druge dejavnike v praksi giblje med 0.4 in 0.8 (Preissler in Bollrich, 1980). Vpliv dušilke pod spodnjo komoro opišemo z enačbo izgub Δh_d :

$$\Delta h_d = \gamma_d Q_j |Q_j| \quad (7)$$

kjer je γ_d koeficient lokalnih izgub z dimenzijo $T^2 L^{-5}$, ki ima lahko glede na različne možnosti oblikovanja dušilk (zaslonke, zaklopke, fiksne in premične mreže) lahko zelo različne vrednosti. Učinkovitost oz. moč dušilke se zato običajno izrazi z največjimi izgubami, ki nastopijo pri največjem ali inštaliranem pretoku, in so reda velikosti od 1 do nekaj 10 metrov. Ker je Q_j pozitiven v primeru toka v jašek, so v tem primeru tudi izgube na dušilki pozitivne. Navedene enačbe predstavljajo sistem 7 enačb za 7 neznank:

- pretok v dovodnem rovu Q_r
- pretok v jašku Q_j
- pretok v komori Q_k
- pretok preko preliva Q_{pr}
- denivelacijo (glede na koto gladine v akumulaciji) v jašku z_j
- denivelacijo (glede na koto gladine v akumulaciji) v komori z_k
- tlak pod spodnjo dušilko h_j

V primeru, da je gladina v jašku nad spodnjim robom zgornje (diferencialne) komore, imamo čisti diferencialni vodostan in je možnih 5 kombinacij gladin (Frank, 1957):

- nepotopljeno prelivanje iz jaška v komoro
- potopljeno prelivanje iz jaška v komoro
- nepotopljeno prelivanje v jašek
- potopljeno prelivanje v jašek
- izenačevanje gladin v jašku in komori brez prelivanja

Tem petim variantam moramo dodati še dve za primer, ko je gladina v jašku pod spodnjo koto zgornje (diferencialne) komore in imamo primer kombiniranega vodostana:

- v zgornji komori je voda (prost iztok iz zgornje komore v jašek)
- v zgornji komori ni vode (gibanje vodnega stolpca samo v jašku)

4.0 SIMULACIJE

S programoma CHAMTANK in DICHTANK smo simulirali 5 značilnih manevrov:

1. hitro zapiranje od 70 na 0 m³/s pri max koti 526 v bazenu (slika 3)
2. hitro odpiranje od 0 na 70 m³/s pri min koti 518 v bazenu (slika 4)
3. hitro zapiranje od 70 na 0 m³/s in nato hitro odpiranje na 70 m³/s v kritičnem trenutku, ko je iztekanje iz jaška največje, pri min koti 518 v bazenu. Pri vodostanu A so kritične razmere za ponovno odpiranje nastopile po 119 s, pri vodostanu B pa po 151 s.
4. hitro odpiranje od 0 na 70 m³/s in nato hitro zapiranje na 0 m³/s v kritičnem trenutku, ko je pozitivna hitrost v jašku največja, pri max koti 526 v bazenu. Pri vodostanu A so kritične razmere za ponovno zapiranje nastopile po 99 s, pri vodostanu B pa po 123 s.
5. približno polurno obratovanje elektrarne, med katerim pretok na turbini najprej v 4 min zmanjšamo s 70 na 17.5 m³/s, obratujemo s tem pretokom 3 min, povečamo pretok v 6 min nazaj na 70 m³/s, ga v naslednjih 4 min znova zmanjšamo na 35 m³/s, obratujemo tako 4 min, v naslednjih 4 min spet povečamo pretok na 70 m³/s, ga v 3 min znova zmanjšamo na 43.75 m³/s, v 4 min vrnemo na 70 m³/s in nato do konca simulacije (še 80 s) obratujemo s polnim pretokom. Kota gladine v akumulaciji je 524.

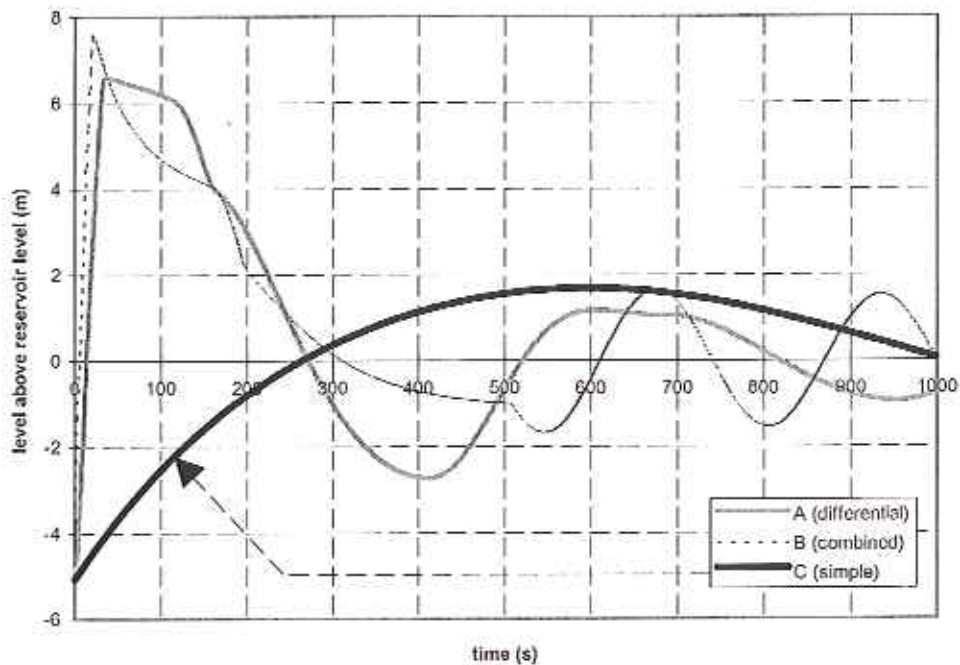
Manevra 1 in 4 sta bila merodajna za določanje maksimalnih, manevra 2 in 3 pa minimalnih tlakov in gladin. Izraz "hitro" pomeni 2 koraka. Pri zapiranju sta to zmanjševanje pretoka s 100 % na 20 % v 3 s, nato pa počasnejše zapiranje do 0 v nadaljnjih 10 s. Pri odpiranju pa pretok najprej v 10 s povečamo od 0 do 20 %, nato pa v nadaljnjih 3 s do končnih 100 %. Te manevre smo upoštevali,

ker se je izkazalo, da so celo neugodnejši od trenutnega zapiranja in odpiranja. Za razliko od uveljavljene prakse, ki narekuje uporabo minimalnega koeficienta hrapavosti pri manevrih zapiranja in maksimalnega pri manevrih odpiranja, smo v računih upoštevali trenutne koeficiente hrapavosti, ki so bili odvisni od hitrosti toka v cevovodu. Izgube zaradi trenja smo upoštevali le v dovodnem rovu, ne pa tudi v samem vodostanu. Časovni korak je bil v vseh primerih 0.1 s.

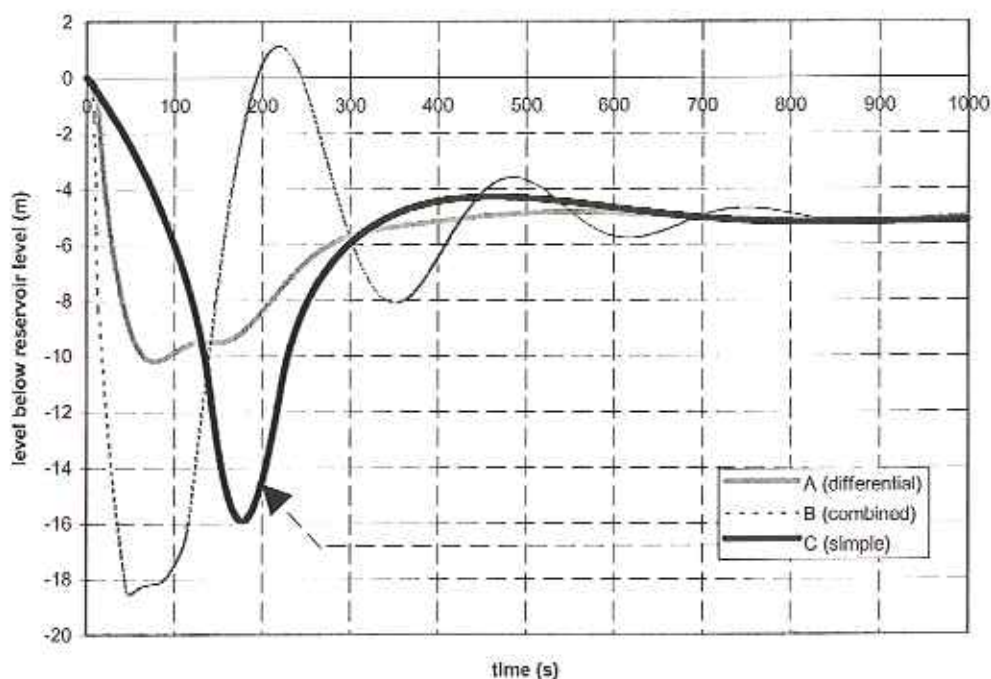
Poleg opisanih manevrov smo z manevroma 1 in 2 ovrednotili tudi vpliv dveh značilnih faktorjev na višinsko lokacijo vodostana:

- za premer dovodnega rova smo upoštevali vrednosti $\varnothing 4.5$, $\varnothing 4.9$ in $\varnothing 5.5$ m,
- za hrapavost dovodnega rova pa vrednosti $\epsilon = 0.1$, 1 in 3 mm

Analizirali smo le spremembe višinskih kot za diferencialni tip vodostana (Δ), vendar bi bili rezultati podobni tudi za tip (B). Glede povezave višinskih kot in prostornine vodostana pri obeh tipih velja, da zviševanje potrebne kote pomeni tudi večanje volumna, oziroma, praktično gledano, večjo višino objekta na površini (manjšo vkopanost).



Slika 3: Primerjava učinkovitosti variant vodostana za primer hitrega zapiranja. Za vse tri variante so prikazani časovni poteki tlakov na stiku vodostana in dovodnega rova.



Slika 4: Primerjava učinkovitosti variant vodostana za primer hitrega odpiranja. Za vse tri variante so prikazani časovni poteki tlakov na stiku vodostana in dovodnega rova.

2.0 ZAKLJUČKI

Na podlagi opravljenih simulacij in pregleda dodatne literature lahko zaključimo, da ima diferencialni vodostan (A) v primeru HE Moste II številne prednosti pred klasičnim z 2 komorama in dušilko, predvidenem v prvotnem projektu:

- je po vseh razpoložljivih literaturah idealen za srednje padce
- z njim se izognemo neugodni, napol površinski izvedbi zgornjih komor, kot je bila predvidena po Idejni študiji
- omogoča zelo hitro dušenje ob prehodnih pojavih (odpiranje in zapiranje turbine) medtem ko se pri klasičnem vodostanu gladina po ekstremnih manevrih umirja zelo dolgo, celo več kot 1 uro
- diferencialni vodostan zelo dobro duši tudi zelo hitre zaporedne manevre nasprotnih predznakov, s čimer se zelo poveča učinkovitost celotne elektrarne v vršnem obratovanju.

Za varianto kombiniranega vodostana (B) so zaključki naslednji:

- vodostan (B) ima ob dvigovanju gladine (zapiranju turbin) lastnosti diferencialnega, ob upadanju pa lastnosti klasičnega vodostana. Nekaj anomalij, ki nastanejo ob vmesnih režimih, na končno sliko uspešnosti ne vpliva bistveno. Bistven pa je vpliv dodatne spodnje dušilke, ki kljub dobri vtočni prepustnosti precej zviša max tlak v dovodnem rovu v primerjavi z diferencialnim vodostanom (A).

- boljše dušenje spodnje dušilke bi se doseglo le z večjo asimetrijo, kar bi zahtevalo uporabo vrtinčne dušilke, ki pa že iz geomehanskih razlogov ni izvedljiva. Po drugi strani ne smemo večati dušenja ob vtoku v vodostan, ker s tem dvigujemo maksimalni tlak v dovodnem rovu
- kombinirana izvedba (B) predstavlja torej kompromis za primer težavne izvedbe celotnega cilindra (višine 23 m) diferencialnega vodostana, zato, če je le izvedljivo, priporočamo diferencialno izvedbo v celotni višini.

VIRI

IBE (1997) Sanacija in doinstalacija HE Moste, Idejni projekt, december 1997.

Širca, A. (1997) Vodostan, Paket programov za račun masnih nihanj v vodostanih – Navodila za uporabo s primeri. IBE, interna publikacija, 50 strani.

Širca, A. (1998a) Development, verification and application of a mathematical model for differential surge tanks. Proceedings of the International Conference on Modelling, Testing and Monitoring for Hydro Powerplants III, Aix-en-Provence, October 5 – 7, pp. 199 – 210.

Širca, A. (1998b) Matematični model diferencialnega vodostana s primerom uporabe - Mathematical model of a differential surge tank with an example of application (dvojezično). Acta hydrotechnica 16/23, pp. 31 – 47.

Modeliranje tokov in erozije v akumulaciji Moste v bližini talnega izpusta

prof. dr. Rudi Rajar, FGG, Katedra za Mehaniko tekočin, Hajdrihova 28, Ljubljana. E-Mail: rrajar@fagg.uni-lj.si

izr. prof. dr. Matjaž Četina, FGG, Katedra za Mehaniko tekočin, Hajdrihova 28, Ljubljana.

mag. Andrej Kryžanowski, Savske Elektrarne, Ljubljana.

mag. Mario Krzyk, FGG, Katedra za Mehaniko tekočin, Hajdrihova 28, Ljubljana.

Povzetek

Savske elektrarne bi v bodoče morale po potrebi odpirati talni izpust za izpraznjenje bazena Moste, ne da bi s tem povzročile večje izpiranje sedimenta. Eden od možnih načinov rešitve tega problema je lokalna utrditev dna. Glavni cilj študije je bil s pomočjo simulacij tokov s tri-dimenzionalnim matematičnim modelom določiti, katera so tista področja površine dna, kjer bi bile ob iztekanju skozi talni izpust strižne napetosti večje od kritičnih, kar pomeni, da jih je treba utrditi, sicer bi se sedimenti izpirali.

Izračuni so bili izdelani za dve različni koti vode v akumulaciji, nominalno koto 526 m in nižjo koto 510 m. Rezultati so pokazali, da je področje, ki ga bo treba utrditi, veliko le cca 15 x 20 metrov. Hitrosti ob dnu se naglo manjšajo z razdaljo od izpusta. Vendar pa je treba upoštevati, da bo erozija nastopila tudi v zadnji fazi praznjenja, v najnižjem delu struge in po celi dolžini bazena zaradi pretoka Save skozi bazen, kjer bodo vse brežine hudo razmočene. Zato je potrebna posebna previdnost pri popolnem praznjenju bazena.

Summary

From time to time, water should be let out of the Moste reservoir, on the upper Sava River. The problem is, that near the bottom outlet, the velocities would be very high, the critical shear stress for the sediment resuspension would be exceeded. Due to ecological impact, the sediment should not be transported downstream. One of possible solutions to this problem is to fix the erodible region of the bottom near the outlet. In the present study this region was determined by means of 3-dimensional modelling.

The simulations were carried out for two water levels in the reservoir, the nominal level 526 m, and the level 510 m. The results have shown, that the region to be fixed is small, about 15 x 20 meters. The bottom velocities diminish quickly with the distance from the outlet. But it should be taken into account, that another phenomenon is dangerous: when the reservoir will be almost empty, the Sava river inflow would cause erosion along the lowest part of the whole reservoir length.

1. Opis problema

V akumulaciji Moste se od izgradnje pregrade dalje usedajo sedimenti, ki so delno tudi kontaminirani, predvsem zaradi raznih odpadnih snovi, ki ji je v preteklih letih v Savo izpuščala železarna Jesenice. Leta 1979 so odprli temeljni izpust, pri tem pa je voda izprala iz akumulacije

velike količine sedimenta, kar je povzročilo pomor rib v Savi, delno zaradi velikih koncentracij sedimenta v vodi, delno pa tudi zaradi izpranih toksičnih snovi.

Savske elektrarne bi v bodoče morale po potrebi odpirati talni izpust, ne da bi s tem povzročile večje izpiranje sedimenta. Eden od možnih načinov rešitve tega problema je lokalna utrditev dna. Načrtuje se, da se tiste površine dna, kjer bi bile hitrosti toka tako veliko, da bi povzročile izpiranje sedimentov, na primeren način utrdijo.

Glavni cilj študije je bil s pomočjo simulacij tokov s tri-dimenzionalnim (3D) matematičnim modelom določiti, katera so tista področja površine dna, kjer bi bile ob iztekanju skozi talni izpust strižne napetosti večje od kritičnih, kar pomeni, da bi se sedimenti izpirali.

V posebni nalogi, ki tu ni prikazana, je bil tudi izračunan potek tokov v celotni akumulaciji, kar bo služilo za nadaljnje ocene raznih procesov v zvezi s kakovostjo vode v bazenu.

2. Opis modela

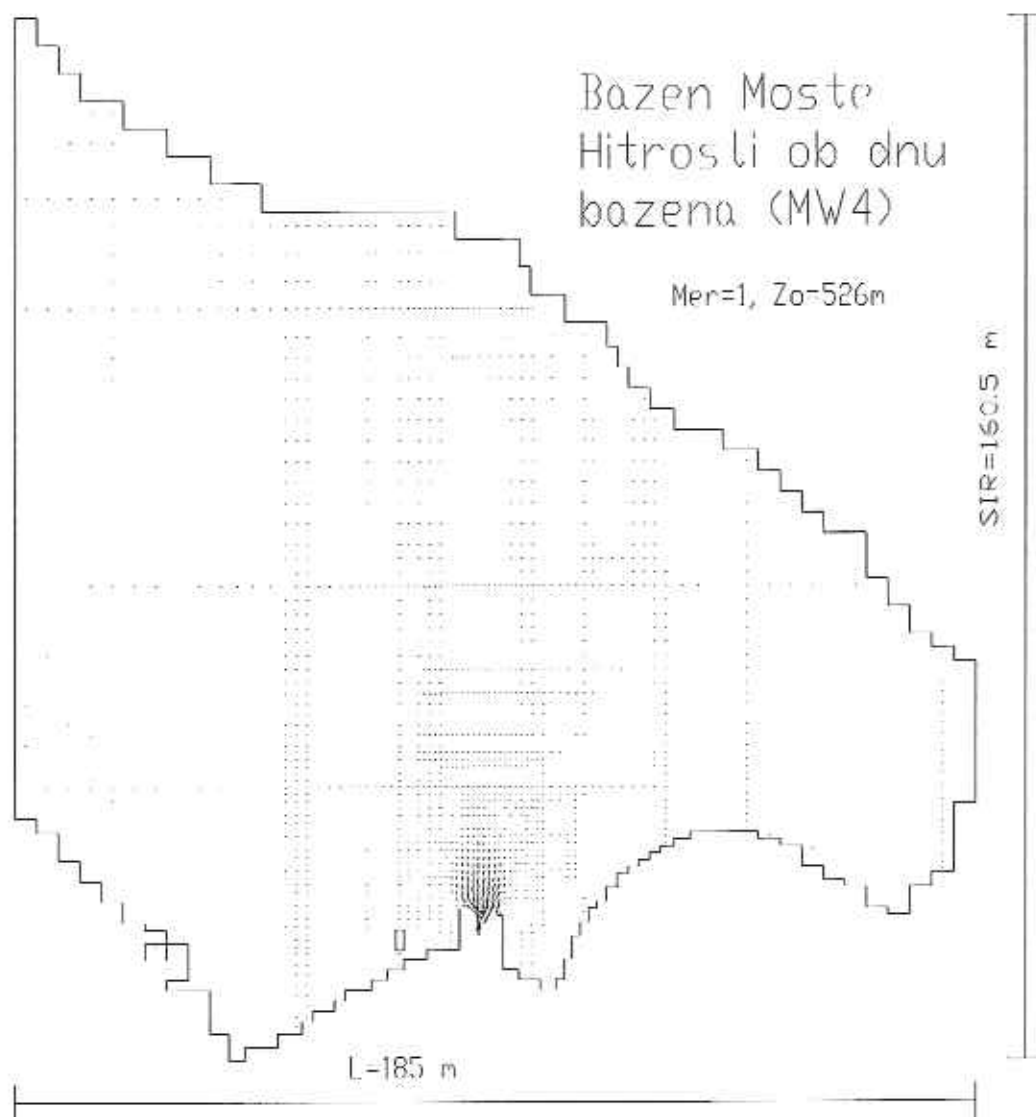
Na Katedri za mehaniko tekočin že od leta 1985 dalje razvijamo, izpopolnjujemo in uporabljamo v praksi tridimenzionalni (3D) matematični model PCFLOW3D. To je polno 3D, nelinearen model, ki ga v osnovi sestavljata hidrodinamični modul (HD) in sedimentacijski modul (ST). Sistem diferencialnih enačb se rešuje po metodi končnih volumnov. V horizontalni ravnini sta koeficienta turbulentne viskoznosti in turbulentne difuzije konstantna, po vertikali pa se upošteva parabolična razporeditev po Koutitasu. HD modul izračunava polje hitrosti, pri tem pa je vključen tudi istočasni izračun toplote (ki je izražena s temperaturo) in slanosti. Ta dva parametra vplivata na gostoto vode in ta spet na hitrosti toka (baroklini model). Možna je tudi simulacija transporta in disperzije toplote zaradi dotoka iz toplotnih virov (toplotna polucija) in pri tem upoštevanje segrevanja iz atmosfere. Model je detajlno opisan v lit. (1) in (2), zato ga podrobneje tu ne opisujemo.

Pri uporabi opisanega modela pri tej študiji je zaradi posebnosti primera nastopilo nekaj specifičnih problemov, npr. velika vertikalna komponenta hitrosti in zelo neenakomeren razpored turbulence po bazenu. To smo morali rešiti aproksimativno, zato pa je v končni fazi upoštevan varnostni faktor. Detajlno so ti problemi in njihovo reševanje opisani v (5) - poročilu Katedre za mehaniko tekočin (1998).

3. Podatki

Topografija. Topografija bazena v treh dimenzijah, kot je jo je potrebno podati za model PCFLOW3D, je bila izrednotena iz detajlnih meritev profilov s pomočjo programa QUICKSURF. Za primere detajlnega izračuna hitrosti v bližini iztoka smo upoštevali samo področje v zadnjem delu bazena, veliko 185 x 160.5 metra, ki je prikazano na sliki 1. Računska mreža je zelo gosta: v področju blizu izpusta je dolžinski korak $D_x = D_y = 1$ m, v najbolj oddaljenih delih področja pa so $D_x = D_y = 4$ m. V vertikalni smeri je dno računskega modela predpostavljeno na koti 485.0 metra, nato pa za primer A (kota jezera 526.0 m) model upošteva 12 aktivnih slojev, v primeru B (kota jezera 510 m) pa gornja dva sloja odpadeta, tako je v modelu 10 aktivnih slojev. Na lokaciji tik ob izpustu smo topografijo poenostavili v toliko, da je tik nad izpustom v modelu vertikalna stena, kar pa lahko le minimalno vpliva na rezultate.

Robni pogoji. Računali smo dva primera: Primer A s koto gladine v bazenu na 526 m, in Primer B s koto 510 m. Iz poročila o modelnih raziskavah tega objekta ((4)-VL 1953), je razvidno, da je pri koti 526 m pretok skozi talni izpust $127 \text{ m}^3/\text{s}$, pri koti 510 pa $97 \text{ m}^3/\text{s}$, kar je upoštevano v simulacijah. Zaradi omejitev modela smo kot iztočni profil vzeli presek, ki je 2 m pred dejanskim iztokom in ima presek 6 x 6 metrov. V tem profilu smo podali hitrosti, ki smo jih izračunali tako, da celoten pretok



Slika 1. Tloris računskega področja s točkami numerične mreže in vektorji horizontalnih komponent hitrosti toka pri delovanju izpusta pri koti gladine 526 m (primer A).

ustreza podancmu ($127 \text{ m}^3/\text{s}$ v primeru A in $97 \text{ m}^3/\text{s}$ v primeru B), razpored hitrosti po preseku pa je bil približno določen po teoriji curka.

Dotok v računsko področje ($Q = 127 \text{ m}^3/\text{s}$ v primeru A in $97 \text{ m}^3/\text{s}$ v primeru B) smo na nekoliko poenostavljen način upoštevali skozi profil, kjer je meja s celotnim bazenom (levi rob na sliki 1).

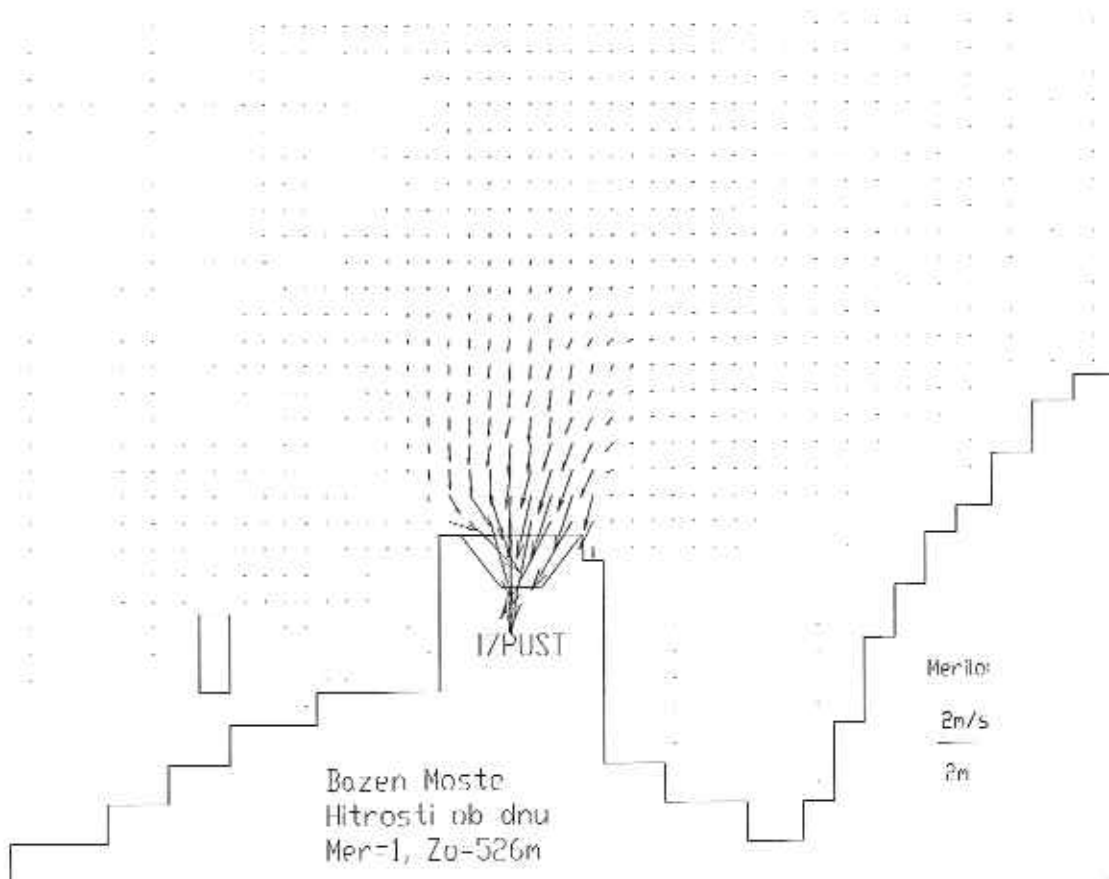
Podatki za simulacije v matematičnem modelu.

Horizontalni koeficient turbulentne viskoznosti. Pri zelo velikem razponu hitrosti v področju (od cca 0.05 do preko 5.0 m/s) bi morali upoštevati koeficiente turbulentne viskoznosti v odvisnosti od intenzitete turbulence za vsako računsko celico. Ker ta izračun v modelu PCFLOW3D ni vgrajen, smo s približno konfiguracijo s pomočjo 2D modela (ki ima vgrajen izračun tega koeficienta po metodi k-epsilon) določili vrednosti v vseh celicah. 2D model je pokazal razpon od $0.16 \text{ m}^2/\text{s}$ neposredno pri iztoku do $0.015 \text{ m}^2/\text{s}$ v področjih, oddaljenih od iztoka.

Vertikalni koeficient turbulentne viskoznosti. Ker ta v večji meri vpliva na računске rezultate kot horizontalni, je v modelu PCFLOW3D vgrajena možnost podajanja vrednosti tega koeficienta po slojih. Upoštevali smo vrednosti med 0.05 in 0.3 m²/s.

4. Rezultati

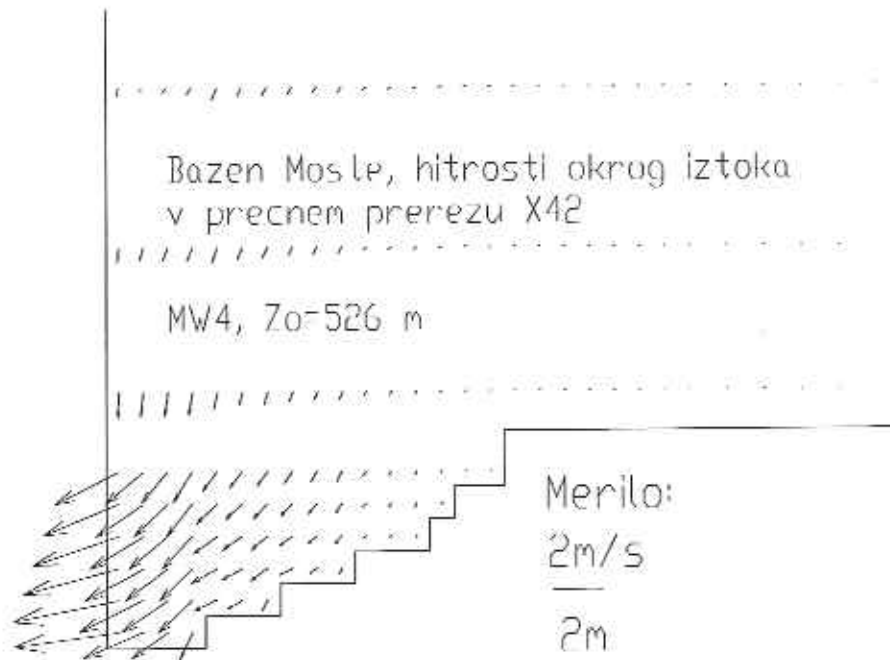
Za primer A so na slikah 1 do 4 prikazane hitrosti toka v tlorisu in vertikalnem prerezu, sl. 5 pa kaže tlorisne hitrosti in strižne napetosti za primer B. Vidimo, da hitrosti ob dnu v obeh primerih razmeroma hitro padajo z razdaljo od izpusta. Zanimivo je, da je področje možne erozije večje v primeru B, torej pri nižji koti gladine v akumulaciji. Ta pojav je možno tolmačiti z dejstvom, da kljub temu, da je pretok preko izpusta manjši v primeru B (97 m³/s) kot v primeru A (127 m³/s), pa se v primeru B zaradi znižane gladine presek že bistveno zmanjša in so hitrosti ob dnu lokalno večje kot v primeru A.



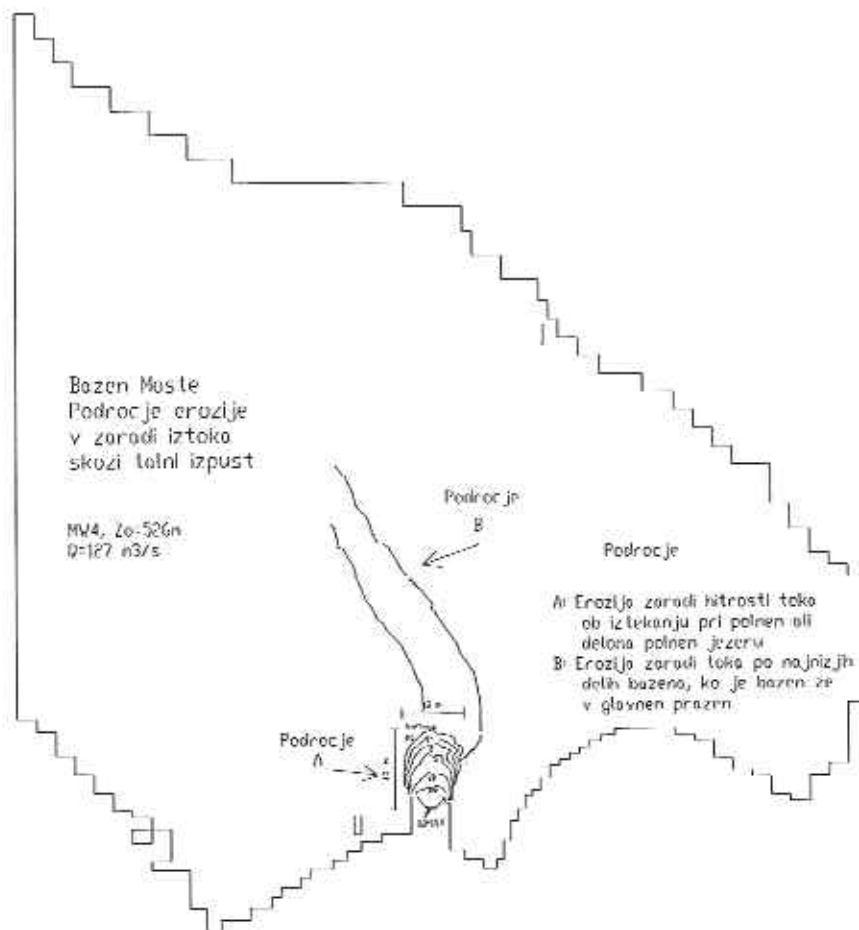
Slika 2. Detajl slike 1 v bližini izpusta z vektorji hitrosti toka.

Na sliki 5 so zrisane izolinije strižnih napetosti ob dnu v primerjavi s kritično strižno napetostjo, τ/τ_{krit} . To pomeni, da so pri izoliniji z vrednostjo 1.0 ravno dosežene kritične strižne napetosti. Zaradi omenjenega faktorja varnosti pa priporočamo, da se kot področje možne erozije upošteva vse, kar je nad vrednostjo $\tau/\tau_{krit} > 0.5$.

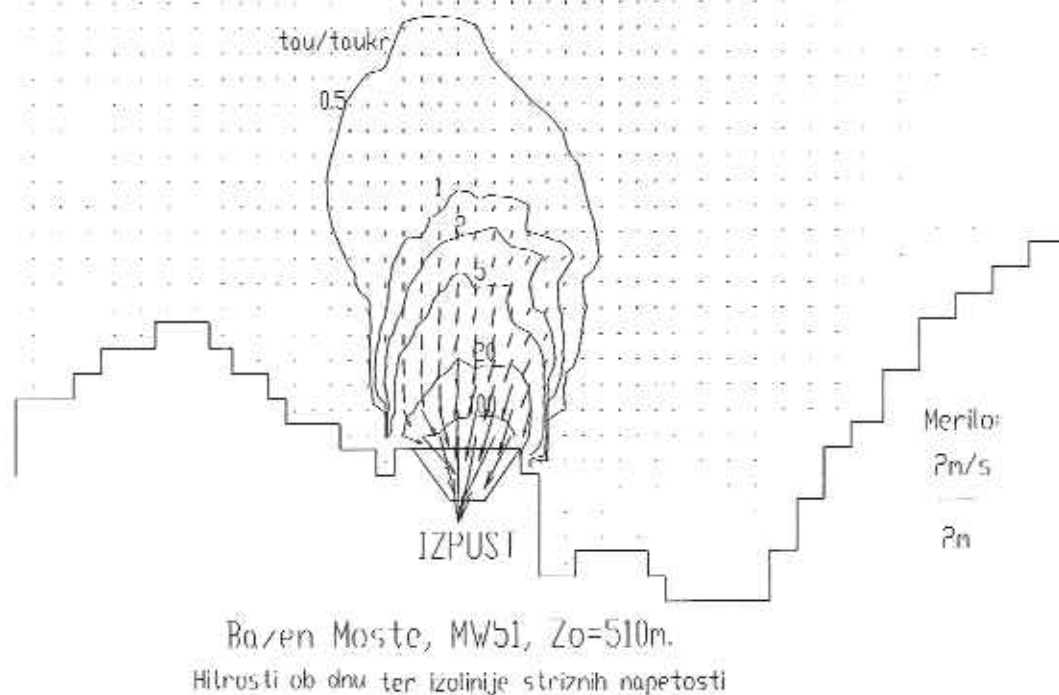
Na sliki 4 je tudi prikazano področje, kjer bi voda zaradi iztekanja že pri v glavnem izpraznjem bazenu lahko povzročila erozijo (glej detajlnejši opis v Zaključkih). Prikazana je le groba ocena na osnovi topografije dna. To področje poteka vzdolž linije najnižjih točk dna vzdolž celega bazena. Za primer B (kota gladine 510 m) je to področje enako, saj bodo pri iztekanju ob določenem odstotku izpraznitve nastopile enake razmere.



Slika 3. Prikaz vektorjev hitrosti toka v bližini izpusta v vertikalnem prečnem prerezu za primer A (kota gladine 526 m).



Slika 4. Prikaz področja erozije v tlorisu za primer A (kota gladine 526 m).



Slika 5. Prikaz hitrosti toka ob dnu in razmerja strižnih napetosti proti kritični strižni napetosti (začetek erozije) za primer B (kota gladine 510 m).

5. Zaključki

1. Izračun hitrosti v bazenu Moste je bil izvršen s 3D modelom PCFLOW3D za dva primera, ko je kota gladine v bazenu še razmeroma visoka (Primer A s koto 526 m in primer B s koto 510 m). Na podlagi hitrosti ob dnu in karakteristik sedimentov je narejen izračun, na katerih delih bazena je strižna napetost večja od kritične, kar pomeni, da bi na omenjenih področjih voda erodirala sedimente in jih odnašala skozi talni izpust. Ti glavni rezultati študije so prikazani na sliki 4 za primer A in na sliki 5 za primer B. Varnost zaradi nesigurnosti v simulacijah je upoštevana pri izračunih hitrosti, dodatno pa priporočamo varnostni faktor 2, kar pomeni, da je treba upoštevati vse področje, kjer je τ_0/τ_{krit} večji od 0.5.
2. Opozoriti moramo na drugi del tega pojava, ko bo tudi nastopila možnost erozije in odnašanja sedimentov. Kadar bo bazen že v večji meri izpraznjen in bo gladina vode v njem že bistveno znižana, bo nastal tok po najnižjem delu dna jezera, podoben nestalnemu toku v reki. *Ta tok bo nastal po celotni dolžini bazena.* Ta izračun ni bil predmet študije, zato je bila narejena samo kratka ocena na osnovi topografije dna bazena. Približna skica tega področja je podana na sliki 4, prikazano področje pa ni odvisno od začetne kote gladine v bazenu, saj bi ta erozija nastopila proti koncu praznjenja. *Vsekakor je treba upoštevati, da bi erodiralo vzdolž matice bazena, posebno veliko sedimenta pa bi lahko odneslo na mestih, kjer so brežine bazena zelo strme, saj bi se tam brežine pri hitrejšem praznjenju rušile v strugo. Zato popolnega praznjenja ne priporočamo.* Eventuelno bi ga bilo možno izvesti brez hujšega odnašanja sedimentov skozi izpust ob razmerah, ko bi bil dotok Save v bazen zelo majhen. V tem primeru bi lahko v zadnjem stadiju praznitev izvajali zelo počasi in skozi izpust izpuščali zelo majhne pretoke.

Reference:

- (1) Rajar, R., Četina, M.: Hydrodynamic and Water Quality Modelling: An Experience. *Ecological Modelling*, 1997, No. 101, str.195-207.
- (2) Rajar, R., Četina, M., Širca, A.: Hydrodynamic and Water Quality Modelling: Case Studies. *Ecological Modelling*, 1997, No. 101, str. 209-228.
- (3) Žagar, D., Rajar, R., Četina, M.: Tridimenzionalni model za račun transporta lebdočih plavin v površinskih vodah. *Acta Hydrotechnica*, No. 15/17, 1997, str. 61-78.
- (4) Vodogradbeni laboratorij: Poročilo o modelni raziskavi odvodnega predora HC Moste. *Poročilo*, 1953.
- (5) Katedra za mehaniko tekočin: Matematični model gibanja vode v akumulaciji Moste zaradi iztekanja skozi talni izpust. 1 del: Določitev hitrosti in področij možne erozije v bližini izpusta. *Poročilo*, julij 1998, 7 str., 19 prilog.

