

28. siječnja 1993.



IZDAVAČ

HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA



SANACIJA BRANE PERUĆA

ZBORNIK RADOVA

UREDNIŠTVO

Dr. JOSIP RUPČIĆ
ZVONIMIR SEVER
MARIN VILOVIĆ

GLAVNI UREDNIK

MARIN VILOVIĆ

RECENZENT

Dr. JOSIP RUPČIĆ

PREVODITELJ

SABINA EKINOVIĆ, prof.

TEHNIČKI UREDNIK

MLADEN BATIĆ

FOTOGRAFIJE

MLADEN BATIĆ
ZVONIMIR SEVER
MIJO ŽEC
ANTE VERZOTTI

TISAK

OFFSET KRAJNOVĆ

UVEZ

GRAFIČKI ZAVOD HRVATSKE

NAKLADA

700 kom.

ORGANIZACIJA KONFERENCIJE

HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA



**HRVATSKO DRUŠTVO ZA
VELIKE BRANE**



S A D R Ź A J

1. ULOGA BRANE PERUĆA U HIDROENERGETSKOM SUSTAVU RIJEKE CETINE, OKUPACIJA BRANE I POKUŠAJ RUŠENJA	1
<i>Marin Vilović, dipl.ing.grad.</i>	
2. IZBOR RJEŠENJA SANACIJE BRANE PERUĆA	29
<i>Doc.dr.sc. Josip Rapčić, dipl.ing.grad.</i>	
3. PROJEKT SANACIJE BRANE PERUĆA	65
<i>Zvonimir Sever, dipl.ing.grad.</i>	
4. ORGANIZACIJA GRAĐENJA I IZVOĐENJE RADOVA NA SANACIJI	113
<i>Mijo Zec, dipl.ing.grad.</i>	
5. SEIZMOLOŠKA I SEIZMOTEKTONSKA ISTRAŽIVANJA	177
LOKACIJE BRANE PERUĆA	
<i>Mr.sc. Vlado Kuk dipl.ing.</i>	
<i>Prof.dr.sc. Eduard Prelogović, dipl.ing.</i>	
6. ANALIZA VELIKIH VODA NA PREGRADNOM	195
PROFILU BRANE PERUĆA	
<i>Dr.sc. Ranko Žugaj, dipl.ing.grad.</i>	
7. GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI I PRORAČUNSKI PARAMETRI	211
ZA NALIZE STABILNOSTI BRANE PERUĆA	
<i>Mr.sc. Tomislav Ivšić, dipl.ing.grad.</i>	
<i>Prof.dr.sc. Antun Šavits-Nossan, dipl.ing.grad.</i>	
<i>Mr.sc. Mehmed Salih Kovačević, dipl.ing.grad.</i>	
8. ANALIZA SEIZMIČKE STABILNOSTI BRANE PERUĆA	229
<i>Prof.dr.sc. Antun Šavits-Nossan, dipl.ing.grad.</i>	
<i>Mr.sc. Tomislav Ivšić, dipl.ing.grad.</i>	
<i>Mr.sc. Mehmed Salih Kovačević, dipl.ing.grad.</i>	

9.	ANALIZA STANJA NAPREZANJA I DEFORMACIJA BRANE PERUĆA . . .	249
	<i>Prof.dr.sc. Antun Szavits-Nossan, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Mr.sc. Meho Šušić Kovačević, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Mr.sc. Tomislav Ivrić, dipl.ing.grad.</i>	
10.	ISTRAŽNI RADOVI NA NALAZIŠTIMA MATERIJALA	261
	I KONTROLA UGRADNJE U NASUTI DIO BRANE	
	<i>Krešimir Sever, ing.geotech.</i>	
	<i>Miroslav Ivoš, ing.geotech.</i>	
	<i>Ivo Barbačić, dipl.ing.grad.</i>	
11.	INJEKTIRANJE JEZGRE BRANE	295
	<i>Doc.dr.sc. Josip Ručić, dipl.ing.grad.</i>	
12.	IZVOĐENJE DIJAFRAGME OD PLASTIČNOG BETONA	313
	<i>Dalibor Bojanić, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Zvonimir Šćepac, dipl.ing.grad.</i>	
13.	LABORATORIJSKA ISPITIVANJA GLINOBETONA DIJAFRAGME	345
	<i>Prof.dr.sc. Velimir Ukrainczyk, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>V. Čalagović, dipl.ing.grad., V. Žugelj, dipl.ing.grad., I. Banjad, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Doc.dr.sc. Dunja Mikulić, dipl.ing.fiz.</i>	
14.	OŠTEĆENJA I SANACIJA INJEKCIJSKE GALERIJE	365
	<i>Zvonimir Sever, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Mijo Zec, dipl.ing.grad.</i>	
15.	INJEKCIJSKI RADOVI KOD SANACIJE BRANE	403
	<i>Doc.dr.sc. Josip Rupčić, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Nenad Kezić, dipl.ing.geol.</i>	
16.	IZVOĐENJE PRELJEVNE GRADEVINE I HIDROMEHANIČKA OPREMA .	423
	<i>Doc.dr. Ante Krstulović, dipl.ing.grad.</i>	
	<i>Dalibor Bojanić, dipl.ing.grad.</i>	
17.	Zvonimir Sever, dipl.ing.grad.	
	SUSTAV ZA TEHNIČKA PROMATRANJA NA BRANI PERUĆA	437



ULOGA BRANE PERUĆA U HIDROENERGETSKOM SUSTAVU RIJEKE CETINE, OKUPACIJA BRANE I POKUŠAJ RUŠENJA

MARIN VILOVIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj tima za sanaciju brane

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.

SPLIT

SAŽETAK

Terorističkim činom aktiviranja podmetnutog eksploziva u kontrolnoj galeriji nasute brane Peruća dana 28. siječnja 1993. godine u 10⁴⁶ sati od srpskog agresora uništena je 32. godine stara građevina, koja se ipak uspjela održati odolivši udaru i zadržavši "rođenu bombu" od 470 x 10³ m³ vode, čije bi posljedice rušenja nizvodno od brane sve do grada Omiša bile nesagledive.

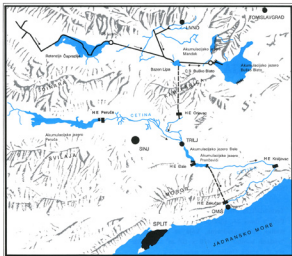
UVOD

Rijeka Cetina sa svojim širim slivom površine 4150 km² i srednjim protokom na ulazu u Jadransko more od 102 m³/s, predstavlja vodni potencijal izuzetne vrijednosti.

Od prvog objekta HE Kraljevac izgrađenog 1912. godine do danas rijeka Cetina sa svojim pripadajućim slivom postala je vrijedan izvor električne energije, koja se dobiva iz pet izgrađenih hidroelektrana ukupne instalirane snage od 877,6 MW.

Energetski vrijedni zahvati na rijeci Cetini i njenom slivu započeli su upravo gradnjom brane i akumulacijskog jezera Peruća s pribranskom elektranom.

Brana i akumulacijsko jezero Peruća s pribranskom elektranom izgrađena je na gornjem toku rijeke Cetine 1960. godine sa ulogom da regulira protoke rijeke Cetine do brane Peruća, te kasnije zajedno sa akumulacijskim jezerom Buško Blato regulira vode Cetine na cijelom njezinom slivu tako, da se u HE Zakućac postigne maksimalna proizvodnja električne energije.



Slika 1. Hidroenergetski sustav rijeke Cetine - Situacija



Slika 2. Hidroenergetski sustav rijeke Cetine - Uzdužni presjek

HE ORLOVAC	$Q_i = 70 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_k = 380 \text{ m}$	$P_i = 237 \text{ MW}$	$E = 440 \text{ Gwh}$
HE PERUĆA	$Q_i = 120 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_k = 41 \text{ m}$	$P_i = 41,6 \text{ MW}$	$E = 120 \text{ Gwh}$
HE ĐALE	$Q_i = 220 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_k = 21 \text{ m}$	$P_i = 40 \text{ MW}$	$E = 157 \text{ Gwh}$
HE ZAKUČAC	$Q_i = 220 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_k = 250,4 \text{ m}$	$P_i = 486 \text{ MW}$	$E = 1770 \text{ Gwh}$
HE KRALJEVAC	$Q_i = 80 \text{ m}^3/\text{s}$	$H_k = 103 \text{ m}$	$P_i = 73 \text{ MW}$	$E = 40 \text{ Gwh}$

OPIS GLAVNIH OBJEKATA

Branu Peruća s akumulacijskim jezerom i pribranskom hidroelektranom smještena je na rijeci Cetini oko 14 km uzvodno od grada Sinja. Akumulacijsko jezero Peruća je jedno od glavnih akumulacijskih jezera u hidroenergetskom sustavu rijeke Cetine. Branom dobiveni pad koristi se u pribranskoj elektrani Peruća.

Izgradnjom nasute brane stvoreno je jezero Peruća, ukupne sadržine $541 \times 10^6 \text{ m}^3$ kod uspora vode na koti 360 m.n.m., koje služi za godišnje izravnane protoka rijeke Cetine. Za evakuaciju velikih voda izgrađen je na lijevoj obali preliv sa zapornicom, koji je prije miniranja brane mogao kod vodostaja 361,20 m n.m. evakuirati 100 godišnji vodni val, a zajedno sa temeljnim ispuštom 1000 godišnji vodni val.

Za dovod vode na turbine izgrađen je tunel koji u kružnoj krivini obilazi branu na lijevoj obali. Promjer tunela iznosi 6,7 m, a ukupna dužina 300 m. Tunel pred turbinama prelazi u čelični razdjelni cjevovod, koji završava predturbinskim zatvaračima. Promjer razdjelnog cjevovoda smanjuje se na 3,8 m pred leptirastim predturbinskim zatvaračima. Čelični dio cjevovoda položen je u betonskom bloku.

Strojarnica i rasklopno postrojenje smješteni su ispred brane na nizvodnoj strani.

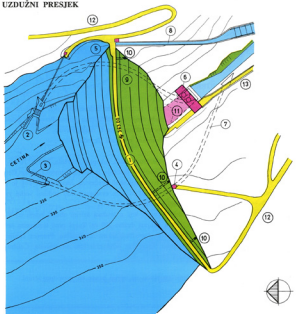
OSNOVNI TEHNIČKO - ENERGETSKI PODACI

AKUMULACIJSKO JEZERO - prije miniranja brane

Uspor:

Najveći radni	360,00 m.n.m.
Najveći prelivni	361,20 m.n.m.
Najmanji radni	325,00 m.n.m.
Volumen kod najvećeg uspora	$541,249 \times 10^6 \text{ m}^3$
Površina kod najvećeg uspora	20 km^2
Dužina kod najvećeg uspora	23 km

UZDUŽNI PRESJEK



1. BRANA
2. ULAZNA GRADEVINA DOVODNOG TUNELA
3. ULAZNA GRADEVINA TEMELJNOG ISPUSTA
4. POMOĆNI ZATVARAČ
5. PRELJEV
6. HE PERUĆA
7. TUNEL TEMELJNOG ISPUSTA I REGULACIJSKI ZATVARAČ
8. BRZOTOK
9. DOVODNI TUNEL
10. PRISTUPNI TUNEL U INJEKCIJSKU GALERIJU
11. RASKLOPNO POSTROJENJE
12. PRISTUPNE CESTE
13. PRISTUPNA CESTA HIDROELEKTRANI

Slika 3. Situacija objekata

BRANA - prije miniranja brane

Iskop:

Temelj brane	43.048	m ³
Temelj galerije	45.387	m ³
Volumen brane:	874.097	m ³
od toga: nasip od kamena	709.559	m ³
filtarski slojevi	46.976	m ³
glinena jezgra	105.023	m ³
beton galerije	12.539	m ³

Visina brane u profilu Cetine	63	m
Širina brane u profilu Cetine	220	m
Dužina brane na krani	450	m

Volumen akumulacije / Volumen brane	630/1
-------------------------------------	-------

Protočni kapacitet evakuacijskih objekata

kod uspora 361,20 m.n.m.

- preljev	340	m ³ /s
- temeljni ispust	220	m ³ /s

INJEKCIJSKA ZAVJESA

Dužina zavjese	1600	m
Najveća dubina injektirane bušotine	200	m
Dužina bušotina	164.000	m
Ukupna dužina injektiranih bušotina	140.000	m
Utrošak suhe tvari:	51.394	t
od toga:		
glina	35.144	t
cement	14.492	t
bentonit	1.260	t
soda	282	t
dolomiti pijesak	216	t



Foto 1. Pogled na hidroelektranu i branu sa nizvodne strane

HIDROELEKTRANA

Kota donje vode	
(kod $Q = 60, 120, 280 \text{ m}^3/\text{s}$)	304,06/304,86/306,30 m.n.m.
Konstruktivni pad	41 m
Srednji energetski ekvivalent	0,089 kWh/m ³
Broj agregata	2
Snaga turbine	21,3 MW
Prividna snaga generatora	26 MVA
Faktor snage	0.8
Instalirana snaga elektrane	41,6 MW
Instalirani protok	2x60 m ³ /s
Broj okretaja turbine	187,5 min1

Težina:

jedne turbine	460 t
jednog predturbinskog zatvarača	111 t
tlačne cijevi i račve	183 t
hidromehaničke opreme	545 t
Srednja godišnja proizvodnja	120 GWh
Srednji godišnji protok	42 m ³ /s
Srednji godišnji volumen dotoka	1330 hm ³

GEOLOŠKI PODACI

Dolina Cetine na području na kojem je ostvareno akumulacijsko jezero usječena je uglavnom u vapnencima i dolomitima. Dio i dio bokova su prekriveni laporima, a na uzvodnom kraju jezera na znatnom prostoru proteže se prozor plastičnih škriljavaca.

Vapnenci su uglavnom uslojeni, pločasti dobro razvijeni znatne debljine i prostiranja, a vapnenci oko pregradnog mjesta su razlomljeni s mnogim ostrim škrapama i pukotinama. Jaki proces rastrošbe tih vapnenaca rezultirao je stvaranjem znatnih količina crvenice. U vapnencima ima leća rošnjaka.

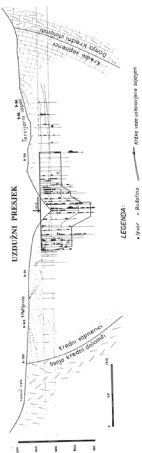
Dolomiti su uglavnom dobro uslojeni, na površini trošni, a u unutrašnjosti znatno kristalizirani, vrlo jedri i gusti.

Osnovna podloga svih tih naslaga su škriljavci, koji se poput nepropusnog sloja protežu ispod cijelog područja.

Po stratigrafskoj pripadnosti škriljavci pripadaju trijasu, vapnenci i dolomiti juri i kredi, a lapori neogena.

Osnovna struktura područja akumulacijskog jezera sastoji se iz jedne velike sinklinale u kojoj se javlja čitav niz dopunskih formi. Ta sinklinala se proteže u dinarskom smjeru i njena os se približno poklapa s osi doline Cetine.

Prema hidrogeološkoj ulozi neporemećeni lapori i dolomiti predstavljaju barijeru i čine osnovicu za rješenje vododrživosti čitavog jezera. Starije vododržive naslage, ispod donjokrednih dolomita su radi svog položaja odigrali tijekom geološke prošlosti odlučujuću ulogu smanjujući strujanje podzemne vode u području navedenih dolomita i tako ih čuvali od insektivnih krških procesa. Naslage krednih vapnenaca zahvaljujući karstifikaciji predstavljaju vodopropusnu sredinu, te je najveća vodopropusnost ispitivanjima utvrđena uz pregradni profil.



Slika 5. Hidrogeološki odnosi na pregradnom profilu

Glavni problem na lijevoj strani doline Cetine predstavljalo je potapanje jakih krških izvora kojih se dovodi probijaju uzduž poprečnih tektonskih lomova kroz denjokredne dolomitne blokove. Ispitivanja su ukazala da podzemni vodostaji u pozadini lijevog dolomitnog bloka leže visoko iznad kose uspora akumulacijskog jezera i da nema mogućnosti gubitaka vode tim putem.

HIDROLOŠKI PODACI

Akumulacijsko jezero Peruća prikuplja vode Cetine i njenih pritoka kod profila Derven i Peruća. Lokacija brane je na 76,2 km uzvodno od ušća Cetine u Jadransko more, a normalni uspor seže do mosta kod sela Vinalić udaljenog 99,3 km od brane. Gotovo svi pritoci Cetine sa s lijeve strane, a velika većina je potopljena i kod nižih razina vode u jezeru u odnosu na najvišu dopuštenu razinu prije rekonstrukcije brane, na koti 360,00 m n.m.

Površina direktnog i indirektnog sliva:	1250 km ²
Srednji protok četrdesetgodišnjeg razdoblja (1926-1965)	42,00 m ³ /s
Prosječna visina oborina	1161 mm
Srednji godišnji volumen dotoka	1330 hm ³
Odnos Q ₀ /Q _{sr}	2,86
Minimalni opaženi protok	0,166 m ³ /s
Maksimalni opaženi protok	268 m ³ /s
Velike vode:	
vjerojatnost pojave 0,0001	510 m ³ /s
0,001	427 m ³ /s
0,01	344 m ³ /s
0,1	259 m ³ /s

AKUMULACIJSKO JEZERO

Akumulacijsko jezero Peruća smješteno je u gornjem toku rijeke Cetine. Kota dna jezera na pregrađanom profilu je 300,00 m n.m. Uspor je 60 m. Svojim volumenom od 541 milijun m³, ono vrši vodno izravnjanje za korištenje energetskog potencijala sliva rijeke Cetine na nizvodnim elektranama HE Peruća, HE Đale i HE Zakućac, koji iznosi više od 2,5 milijarde kWh godišnje.

Veoma važnu ulogu ostvaruje zaštićujući od poplava nizvodno Hrvatsko i Sinjsko polje površine preko 15000 ha.

Peruća je prvo naše akumulacijsko jezero u kršu koje je ostvareno nakon niza geoloških i hidrogeoloških radova.

Dio doline Cetine u kojem leži ovo jezero proteže se uzduž sinklinale čija je jezgra iz krednih vapnenačkih naslaga debelih preko 2000 m. Pod njom u dna i bokovima slabo su propusne debele naslage donjokrednog dolomita. S uzvodne i nizvodne strane ova je sinklinalna struktura zatvorena nepropusnim varfenskim škriljancima. Nepropusne naslage predstavljaju vanjski okvir vapnenačkih naslaga u kojima je korito akumulacijskog jezera Peruća. Taj je vanjski okvir imao značajnu ulogu u oblikovanju hidrogeoloških odnosa u tim vapnenačkim naslagama usmjeravajući podzemno tečenje, a prema tome i razvoj otkrivanja prema dolini Cetine.

Stavljanje jakih krških vrela pod uspor od nekoliko desetaka metara ovog akumulacijskog jezera, smatrao se jednim od osnovnih problema o kojem je ovisio njen uspjeh, u toliko više, što je ukupna izdašnost tih izvora premašila dvije trećine dotoka vode u jezero.

Injekcijskom zavjesom presiječeni su i oštećeni bokovi pregradnog mjesta.

Trasa i dubina zavjese odabrana je na osnovi analize rezultata ispitivanja pomoću istražnih bušotina.

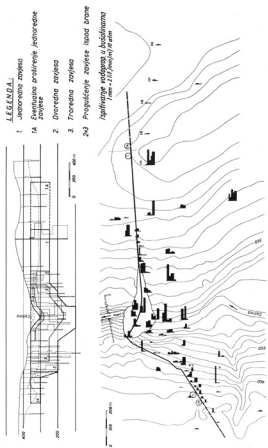
Injekcijska zavjesa duga je 1600 m, a duboka od 100 do 200 m. Za njeno ostvarenje izvedeno je 164.000 m injekcijskih bušotina, a utrošeno je 51.394 tone cementa i pripadajućih primjesa injekcijskoj smjesi. Specifični utrošak suhe injekcijske smjese je oko 198 kg/m² zavjese. Kod najvećeg uspora iz ove se akumulacije gubi oko 1,2 m³/s. Prosječni godišnji gubici vode iz jezera iznose oko 0,7 m³/s što je 1,7% srednjeg godišnjeg dotoka. Injekcijska zavjesa je u potpunosti izvršila zadatak presjecanjem glavnih krških podzemnih odvođa i pukotinskih zona, tako da nema velikog podzemnog koncentriranog otjecanja. Isto tako je potvrđeno da je masiv planine Svilaje nepropustan, tako da se voda ne gubi prema rijeci Čikoli.

NASUTA BRANA PERUĆA - prije miniranja

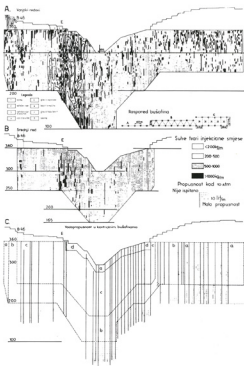
Brana Peruća visoka je 63 m od najniže točke u koritu do krune na koti 363,00 m.n.m. Najviša kota radnog uspora vode u jezeru je 360,00 m.n.m. pa je kruna brane za 3,0 m viša od najvišeg vodostaja usporene vode.

Brana se sastoji od uzvodnog i nizvodnog nasipa od lomljenog kamena između kojih je vertikalna glinena jezgra.

Između jezgre i kamena izrađeni su prijelazni filterski slojevi od prirodnog sitnog pijeska, šljunka i kamene drobine.



Slika 6. Injekcijska zavjesa



Slika 7. Utrošak suhe tvari u injekcijskoj zavjesi

Za otještjenje brane odlabrana je uska jezgra jer je u njoj blizini količina gline bila nedovoljna za široku jezgru. Pogodno je bilo što je glina bila visokog plasticiteta s mnogo sitnih frakcija. To je zahtijevalo pažljiv izbor gradacije filtera za zaštitu jezgre od hidrauličke erozije.

Uzvodna kosina brane nasuta je krupnim kamenim blokovima radi zaštite od djelovanja valova. Blokovi su samo grubo dotjerani u profil kosine bez obrade ili posebnog slaganja. Nizvodna kosina nasuta je sitnijim kamenom i grubo je dotjerana u predviđeni profil pomoću jakog mlaza vode, koji je udarno u pravcu kosine. Na taj je način materijal na kosini potpuno stabiliziran.

Zbog razlomljene temeljne stijene u koritu Cetine izveden je temelj od betona s gornjom plohom na koti 305,00 m.n.m., što je iznad male vode u Cetini nizvodno od brane. Time je ujedno i najdublji dio kontrolne galerije dignut toliko, da je ona uvijek iznad vode.

U tlocrtu je brana zakrivljena konkavno prema nizvodnoj strani, kako bi se jezgra zbijala uslijed deformacije brane pod tlakom usporene vode.

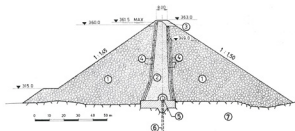
Pomoćni zagati za skretanje rijeke za vrijeme izgradnje brane kroz tunel, izgrađeni su od krupnog kamena na koji se nasuo sitni kamen i šljunak, kao podloga za uzvodni sloj gline koji je sprečavao dotok vode u građevinsku jama. Ovakvo izgrađeni zagati ostali su kao sastavni dijelovi tijela brane.

Sastavni dio brane je i obilazni tunel, koji je smješten u desnom boku, a koji je kasnije prerađen u temeljni ispuš. Ovaj je tunel snabdjeven pomoćnim tablastim zatvaračem s pogonom kroz vertikalno okno koje se nalazi uz nizvodnu kosinu brane. Na nizvodnom kraju tunela izrađen je objekt za disipaciju energije vode ispred kojeg se nalazi tablasti regulacijski zatvarač. U lijevom boku brane iskopan je dovodni tunel promjera iskopa 8,0 m. U prvoj fazi gradnje taj je tunel također korišten za evakuaciju vode.

Na lijevom kraju brane smješten je preliv reguliran automatskom zapornicom 5,0 x 10,0 m. Voda s prelijeva teče brzotokom uz lijevu padinu doline do korita Cetine, gdje se kinetička energija prelijevne vode disipira u slapštu.

Brana Peruća u 32 godine postojanja ispunila je u potpunosti svoju humanu ulogu, a za svoje graditelje bila izuzetan poticaj za daljne izazove. Građevina, dijelo vrhunskih čovjekovih ostvarenja, koja se toliko uklopila u okolinu i koja je u pravom smislu postala dio nje, u trenu je postala prijetnja čovjeka i prirodi. Nažalost iskoristio ju je čovjek, da naudi drugom čovjeku.

Na sreću stradala je samo ona **BRANA PERUĆA**.



LEGENDA

1. KAMENI NASIP
2. GLINENA JEZGRA
3. ZAGLJUVENI KAMENI MATERIJAL
4. FILTARSKI SLOJEVI
5. INJEKCIJSKA GALERIJA
6. INJEKCIJSKA ZAVJESA
7. TEMELJNA STUJENA

Slika 8. Poprečni presjek brane Peruća

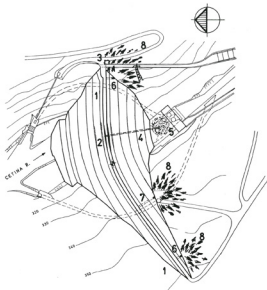
EKSPLOZIJA

Dana 28. siječnja 1993. godine u 10^h 45^{min} i 55', aktiviran je eksploziv u kontrolnoj galeriji nasute brane PERUĆA, koja se nalazi prva u nizu hidroelektrana na rijeci Cetini.

Tim činom uništena je 32. godine stara građevina čija je kvaliteta i u tom teroreističkom činu došla do izražaja odoljevi udaru i zadržavši "vodenu bombu" od 470 x 10⁶ m³ vode, koja je prijetila ugrožavanjem 20.000 stanovnika nizvodno.

Prve vijesti o eksploziji nisu govorile o veličini razaranja budući su se ratna djelovanja odvijala na širem području oko brane.

Efekt eksplozije, dim i prašina, snimljeni kamerom amatera iz velike udaljenosti govore o jačini te eksplozije.



LEGENDA

1. KRATERI NA DESNOM I LJEVOM KRAJU BRANE
2. ULEGNUĆE KRUNE NA NAJVIŠEM DIJELU BRANE
3. UNIŠTENJA PRELJEVNA GRAĐEVINA
4. DRENAŽNI ODVOD IZ INJEKCIJSKE GALERIJE
5. KOMADI GLINENE JEZGRE
6. UNIŠTENI PRISTUPNI TUNELI U INJEKCIJSKU GALERIJU
7. OŠTEĆEN PRISTUPNI TUNEL U INJEKCIJSKU GALERIJU
8. UNIŠTENJA I ZAPALJENA ŠUMA OKO ULAZA U PRISTUPNE TUNELE

Slika 9. Situacija brane s oštećenjima

Prvi pravi uvid u događaje na brani, dobiven je zahvaljujući snimatelju HTV Split, koji je uspio doći do brane sa hrvatskom vojskom i snimiti ju.

U času kada su prilike dozvoljavale, oko 20h iste večeri organiziran je obilazak građevinskih stručnjaka iz Splita na branu i strojarnicu.

U to vrijeme borbe su bile odmakle od brane nekoliko kilometara, te se uz pratnju Hrvatske vojske pomoću ručnih svjetiljki obavio prvi stručni pregled.

Brana je okupirana od strane srpskih paravojnih snaga i tzv. JNA 17. rujna 1991 godine. Zauzevši branu neprijatelj je zatvorio sve odvođe iz akumulacijskog jezera: zapornicu na preljavu i regulacijski zatvarač temeljnog ispusta.

Tim činom započele su prijetnje nizvodnom području od grada Sinja do Omiša.

Brana je postala opasno oružje u rukama neprijatelja, koji je zadnjim činom pokazao da je spreman i takve prijetnje ostvariti bez obzira na 20.000 stanovnika, kojih bi životi bili direktno ugroženi.

Za cijelo vrijeme okupacije brana je bila teško breme ucjene cijele Hrvatske. Radi toga je u studenom 1991. godine izrađen elaborat, od strane stručnjaka Hrvatske elektroprivrede, koji je predviđao ovakve i slične događaje, pod naslovom "DAN POSLJE".

Tijekom noći nakon miniranja donijeta je odluka da se ne objavi uzbuna elementarne nepogode, što bi značilo preseljenje oko 20.000 ljudi s nužnom imovinom, pri čemu bi uslijed panike bile moguće i žrtve. Odlučeno je da se izvrši tiha evakuacija oko 3.000 stanovnika iz najugroženijeg područja, selâ u neposrednoj blizini brane.

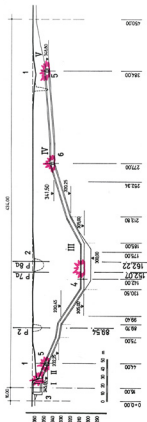
Oštećenja na brani ukazivala su na potrebu hitne intervencije, koja se morala izvesti na samom tijelu brane, sprečavanje prodora vode i eroziju, te intervenciju na otvaranju zatvarača temeljnog ispusta čime bi se omogućilo istjecanje vode iz akumulacijskog jezera, a time i rasterećenje brane.

Tijekom noći organizirano je kontinuirano praćenje protoka i mutnoće rijeke Cetine na najbliže dostupnom hidrometrijskom profilu, u Hanu, oko 12 km nizvodno od brane.

Smisao ovih mjerenja bio je da u datom trenutku pruži informacije za kvalitetnu procjenu procesa događanja na brani i time omogući pravovremeno reagiranje u slučaju ekscenih promjena.

Eksploziv u brani aktiviran je na pet mjesta u injekcijskoj galeriji, koji su označeni na uzdužnom presjeku I-V, sl. 10.

Seizmičke stanice u Trilju, Hvaru i Puntijarki zabilježile su potres magnitude $M = 2,4$ za što je trebalo 20 do 30 t TNT.



LEGENDA

1. KRATER NA DESNOM I LUVOM KRAJU BRANE
2. ULEGNUĆE KRUNE NA NAJVIŠEM DIJELU BRANE
3. UNIŠTENJA PRELJEVNA GRADJEVINA
4. DRENAŽNI ODVOD IZ INJEKCIJSKE GALERIJE
5. UNIŠTEM PRISTUPNI TUNEL U INJEKCIJSKU GALERIJU
6. OŠTEĆEN PRISTUPNI TUNEL U INJEKCIJSKU GALERIJU
- 1, II, III, IV, V PRIETPOSTAVLJENA MJESTA EKSPLOZIJE

Slika 10. Uzdužni presjek brane Peruća

Energija eksplozije izazvala je takva oštećenja na brani koja su se vizuelnim pregledom mogla predviđjeti, a kasnija ispitivanja su ih i potvrdila.



Foto 2. Krater na desnom kraju brane

Eksplozija je otvorila veliki krater na mjestu V na kojem se spaja pristupni hodnik galerije br. 1 i galerije, na desnom kraju brane, stac 3+84, gdje je bio jedini mogući pristup na kruna brane. Krater je bio oblika stošca radijusa 20-25 m i dubine 6-7 m. Krater je bio suh i voda se nije primjećivala niti u njemu niti na nizvodnom pokosu, foto 2.

Pristupni hodnik bio je urušen, a šuma ispred ulaza na udaljenosti do 100 m uništena i oprežena uslijed izbačenog materijala i topline eksplozije.

Iste posljedice, urušene pristupne hodnike galerije i spaljenu šumu u krugu stotinjak i više metara, eksplozija je izazvala i na mjestima II i IV.

Od kratera na desnom kraju prema sredini brane nastala je pukotina na asfaltu duž krune brane, udaljena 1.5 m od njezinog desnog ruba, dužine 77 m.



Foto 3. Poprečna pukotina na kruzi brani

Drugo veliko oštećenje dogodilo se na lijevom kraju brane koje je u tom trenutku predstavljalo najveću opasnost za građevinu.

Oštećenje je nastalo uslijed djelovanja eksplozije aktivirane na mjestima I i II. Eksplozija I dogodila se uz sami desni bočni zid preljevno objekta, a II u galeriji na spoju ulaznog hodnika br. 3 i galerije.

Učinak je bio kompletno rušenje desnog bočnog zida preljeva sa odnošenjem nasipa, foto 4, sa uzvodne strane sve do zapornice preljeva.

Na mjestu II eksplozijom je otvoren krater promjera 25 do 30 m, dubok oko 10 m kroz koji je voda direktno utjecala u galeriju. Nizvodni rub kratera bio je samo 30 do 50 cm viši od vodostaja u akumulacijskom jezera, a uzvodni je rub bio pod vodom.

Ove dvije eksplozije uzrokovale su najveće i najopasnije oštećenje na brani, gdje je prijetila opasnost većeg prodora vode u galeriju i prelijevanja nizvodnog ruba kratera niz pokos brane.



Foto 4. Pogled na lijevi kraj brane

Kako je došlo do miniranja bočnog zida preljeva, dijelovi koji su ostali, pomaknuti su toliko, da bi uključili eventualno podignutu zapornicu i onemogućili njezino spuštanje. Time bi se učinak prelijevanja vode preko brane i kod nižih vodostaja povećao.

Djelovanje eksplozije bilo je toliko snažno da su dijelovi bočnog zida prelijeva porazbacani u krugu od 50 m, a jedan komad od 12 m pronađen je 30 m daleko od mjesta eksplozije.

Armirano betonski most preko prelijeva odbačen je na lijevu obalu, gdje je ostao dijelom visiti preko lijevog potpornog zida.

Na najdubljem mjestu u galeriji, gdje je brana najviša, eksplozija III izazvala je vidljiva ulegnuća krune brane, sta: 0+89.54, 1+52.07 i 1+62.22, dubine 2,5 do 3 m, foto 5.

Ovdje su na uzvodnom pokosu primijećena puzanja uzvodne kamene zaštite, a povremeno i virovi koji su ukazivali na prodor vode u tijelo brane. Taj dio uzvodnog pokosa zahtijevao je intervenciju nasipavanjem s boka.



Foto 5. Ulegnuće krune na najvišem dijelu brane

Intervencija na brani započela je dozvolom pristupa brani od strane Hrvatske vojske i to u 8^h u jutro 29. siječnja 1993. godine.

Za zatrpavanje nastalih kratera i sprečavanje razvoja erozije upotrebljen je buldozer D8 tipa Caterpillar i pokretni utovarivač, a materijal je dovažen kamionima iz kamenoloma udaljenog oko 25 km od brane.

Provođenje svih aktivnosti na samoj brani bilo je dozvoljeno isključivo po obilježenim pravcima, budući je prijetila opasnost od mina postavljenih na cokolu.

Jedini put do najagrođenijeg mjesta na lijevom kraju brane bio je preko kratera na desnom kraju.

Sanacija tog dijela izvedena je tako, da se osnovni nasip brane s obje strane kratera buldozerom gurao u njega. Tako ispunjen krater uređen je sitnim materijalom iz pozajmišta čime je omogućen prijelaz mehanizacije na krunu brane.

U trenutku dolaska na drugu, lijevu stranu brane, voda je vidljivo prodirala u galeriju na mjestu II, ulaznog hodnika br. 3 na stacionaži 0+44,00 a uz sami zid preljeva voda je bila 30-50 cm ispod vrha nizvodnog nasipa brane, koji se u tom trenutku doimao kao "zečji nasip". Tada se najbolje vidjelo, da se zahvaljujući vodostaju akumulacijskog jezera, u trenutku eksplozije, od 356.20 m.n.m. nije dogodila katastrofa, koju su nam pripremali "četnici" kada su tijekom 1991 i 1992 godine prijetili eksplozijom kod vodostaja u jezera od 361.20 m n.m.

Razina vode u jezera u trenutku eksplozije bila je presudna.

Na lijevom kraju brane trebalo je hitno intervenirati, jer je postojala realna opasnost od prodiranja vode kroz preostali rastreseni nasip brane.

Za zatvaranje kratera na lijevom kraju brane trebalo je da kamioni prevezu najmanje 1000 m³ materijala.

Za takvu operaciju potrebno bi bilo osigurati oko 150 kamiona materijala. Budući da je za svaku vožnju duž brane bilo potrebno vrijeme od 5 min. i to za vožnju unatrag na 400 m udaljenosti, istovar i vraćanje na pristupnu cestu, to je značilo, da bi za tu aktivnost korištenjem kamiona i nasipavanjem bilo potrebno 12,5 sati.

Osim toga u vrijeme dovoza materijala trebalo bi sa brane ukloniti buldozer, a to bi onemogućilo nasipavanje uzvodnog pokosa.

Radi hitnosti intervencije odlučeno je da se zatrpavanje kratera na lijevom kraju brane obavi samo buldozerom tako, da se nožem stroja gura materijal sa viših dijelova tijela brane prema bočnom zidu preljeva i na taj način brže osigura nasip uz sam zid preljeva, eksplozija I, a potom i zapunjava krater kroz koji je voda prodirala u galeriju, eksplozija II.

Zatrpavanje kratera nad galerijom obavljeno je poslije osiguranja nasipa i sprečavanja prelijevanja, točno u 11^h i 10⁰⁰ toga jutra.

Za cijelo vrijeme ove operacije kamioni su bočno zasipavali oštećenja na uzvodnom pokosu.

Do trenutka zatrpavanja otvorenog kratera voda koja je ulazila u tijelo brane i galeriju, izbijala je kroz okno drenažnog odvoda galerije na rasklopištu 110 kV postrojenja HE Peruća, foto 6 i 7.



Foto 6.
Rasklopno postrojenje
110 kV HE Peruća



Foto 7.
Drenažno okno odvoda
vode iz galerije na
rasklopnom postrojenju

Na uzvodnom pokosu na lijevom kraju brane uočeno je istjecanje malih količina vode na mjestu zarušenog pristupnog hodnika oko kote 345,00 m n.m., koje je 5. veljače 1993. godine pri vodostaju u jezeru na koti 350,62 m n.m. potpuno prestalo.

Poslije zatrpavanja kratera na mjestima eksplozija I i II u 11^h i 10^{min} započelo je smanjivanje istjecanja vode kroz drenažni odvod na rasklopištu, da bi uskoro sasvim prestalo, što je ukazivalo da je smanjenjem dotoka vode u galeriju došlo do samozapepljenja drenažnog odvoda. To je ukazivalo da su zaustavljena i najveća utjecanja vode u kontrolnu galeriju brane.

Međutim oko 12 sati započelo je istjecanje vode kroz pristupni hodnik br. 2, foto 8. Odmah se počelo sa mjerenjem protoka i mutnoće vode. Toga dana istjecalo je oko 320 l/s, a najveće istjecanje izmjereno je 3. veljače 1993. u količini od oko 570 l/s. Nakon toga protok se smanjivao, da bi istjecanje potpuno prestalo 12. veljače 1993. godine.

Na mjestima eksplozija I i II izvedeno je nadvišenje od 2 m, iznad vodostaja u jezeru i okretile se sa deponijom materijala, od oko 300 m³, za hitne intervencije na brani.

Ukupna količina materijala dopremljena za potrebe sanacije iznosi oko 3 000 m³.

Utvrđivši da se intervencijom na lijevom kraju brane smanjilo istjecanje vode odustalo se od otvaranja regulacijskog zatvarača temeljnog ispusta miniranjem. Pokušaj i uspjeh da se osposobi uređaj za normalno otvaranje pripada posadi HE Peruća i Hrvatskoj vojsci. Zatvarač je uspješno bez oštećenja otvoren u 14^h i 15^{min} 29. siječnja 1993. godine.

Bio je to potpun uspjeh Hrvatske elektroprivrede i Hrvatske vojske, budući da je tada počelo pražnjenje akumulacijskog jezera protokom od oko 220 m³/s, pa se time svakodnevno smanjivala opasnost od još većih oštećenja brane.

Na brani su se obavljala svakodnevno vizuelna opažanja čestim obilascima po kruni. Pokosi brane detaljno su pregledani, jer je postojala sumnja da su i na njima postavljene mine.

Osim toga počelo se sa mjerenjima slijevanja brane na 19 profila postavljenih na kruni, mjerenjima strujanja vode na uzvodnom pokosu brane, a obavljena su i preliminarna geofizička istraživanja.

Stručni tim koji je radio na ovim opažanjima svakodnevno je prikupljao izvješća, analizirao ih i poduzimao potrebne aktivnosti.

Dana 31. siječnja 1993. godine otvorio se krater na nasutom dijelu uz preliv brane na sta: 0+40 promjera oko 5,0 m dubine 4,0 m koji je odmah nasut, uz formiranje deponije sa oko 500 m³ materijala iz kamenoloma za eventualne naknadne intervencije.

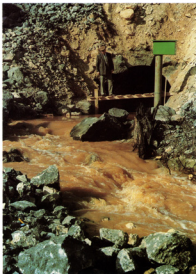


Foto 8. 5. veljače 1993. godine - Ulaz pristupnog hodnika br. 2
- mjerenje protoka istjecanja vode iz galerije

Dana 16. veljače 1993. godine otvorio se krater između stac 1+52,16 i 1+62,61 na nizvodnoj strani krune brane promjera oko 10,0 m dubine do 8,0 m, foto 9 i 10. Odmah je popunjen materijalom iz kamenoloma. U narednim danima nije bilo uočljivih naznaka da se nešto zbiva na ovom dijelu brane.



Foto 9. 16. veljače 1993 godine Krater na sta: 1+52,16 do 1+62,61
- pogled uzvodno



Foto 10. 16. veljače 1993 godine Krater na sta: 1+52,16 do 1+62,61
- pogled nizvodno



Foto 11. Kaverna na sta: 0+82,00 do 0+89,00

4. ožujka 1993. godine otvorila se kaverna između sta: 0+82,00 i 0+89,00 na nizvodnom dijelu, koja se prostirala do polovine krune brane, foto 11. Kaverna je u početku bila široka oko 5,0 m dubine do 10,0 m dok se narednih dana širila. Urušeni materijal smanjivao je njenu dubinu. Kako je vodostaj u jezeru bio na koti 325,10 m n.m. a prirodno tlo na koti 330,0 m n.m. nije bilo bojazni od eventualnog prodora vode. Ovu se kavernu nije odmah zatvorilo iz razloga, što su se i do 7,0 m od njezinog kraja uočavale pukotine koje su ukazivale na nestabilnost brane na ovom mjestu, pa je bilo opasno pristupiti sa mehanizacijom. Također su se i na uzvodnom pokosu uočila ulegnuća i deformacije.

ZAKLJUČAK

Tako je brana Peruća izdržala i ovaj ratni izazov, ali i odigrala još jednu humanu ulogu u spašavanju života nekoliko desetaka tisuća ljudi.

LITERATURA

- [1] Vilović M., Zec M., Rans J., Dani poslije, Split 1993
- [2] HE Peruća 1960-1985, Monografija prigodom 25. obljetnice, Split 1985

IZBOR RJEŠENJA SANACIJE BRANE PERUĆA

Doc.dr.sc. JOSIP RUPČIĆ, dipl.Ing.grad.

Voditelj projekta

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d.

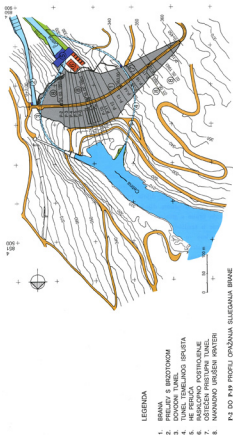
ZAGREB

SAŽETAK

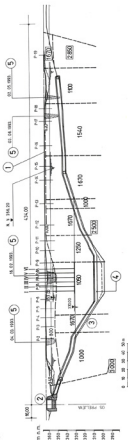
Opisana su istraživanja i rezultati ponašanja brane nakon miniranja. Na osnovi ovih podataka i vizuelnog pregleda brane postavljene su četiri osnovne varijante sanacije brane: (1) rekonstrukcija jezgrovog dijela brane na cijeloj dužini, (2) sanacija jezgre brane u središnjem dijelu izvedbom dijafragme od plastičnog betona, te rekonstrukcija lijevog i desnog kraja brane s glinenom jezgrom kao vododrživim elementom brane, (3) sanacija jezgre brane u središnjem dijelu mlaznim i klasičnim injektiranjem, a lijevog i desnog kraja brane kao u varijanti 2 i (4) izvedba uzvodnog ekrana kao vododrživog elementa brane te rekonstrukcija lijevog i desnog kraja brane kamenim materijalom. Za varijante (1) i (4) obrađene su i podvarijante i to u odnosu na materijal vododrživog elementa brane, jezgu odnosno uzvodni ekran. Analizirano je sedam varijantnih rješenja za koje su određeni troškovi i trajanje građenja kao i vrijednost izgubljene proizvodnje električne energije za vrijeme izvođenja radova. Kvantitativnom i kvalitativnom usporedbom razmatranih rješenja odabrano je kao najpovoljnije rješenje rehabilitacije brane izvedbom dijafragme od plastičnog betona i rekonstrukcijom lijevog i desnog kraja brane glinenom jezgrom kao vododrživim elementom brane.

UVOD

Varijante tehničkog rješenja sanacije brane bilo je predviđeno temeljiti na rezultatima opsežnih istražnih radova, koji su trebali što točnije definirati mjesta i veličine oštećenja njezinih pojedinih dijelova, a posebao glinene jezgre. Međutim zbog stalne opasnosti od neprijateljskih napada, od planiranih istražnih radova provedena su samo opažanja slijevanja brane. Rješenja sanacije brane postavljena su radi toga na osnovi vizuelnog pregleda, rezultata promatranja ponašanja brane provedenih tijekom nekoliko dana neposredno nakon miniranja, te opažanja slijevanja.



Slika 1. Situacija brane Peruća



LEGENDA

1. KRUNA BRANE
2. PRELJEV
3. INJEKCIJSKA GALERIJA
4. DRENAŽNI ODVOD
5. NAKNAJNO URUŠENI KRAJERI

- 340 - 1670 BRZINE UZDUŽNIH SEDIMČNIH VALOVA
U TJELEU BRANE
- 1670 - 3000 BRZINE UZDUŽNIH SEDIMČNIH VALOVA
U TEMELJNOJ STUJENI
- P-2 DO P-19 PROFILU OPAŽANJA SLUEGANJA BRANE
I DO VI PROFILU MJERENJA BRZINE VODE U JEZERU

Slika 2. Uzdužni presjek brane Peruća

Najveća vidljiva oštećenja nastala su na lijevom kraju brane, gdje je potpuno uništena prelijevna građevina, a na kruni brane desno od prelijeva formiran krater promjera 25 do 30 m, dubine oko 10 m kroz koji je voda iz jezera direktno utjecala u injekcijsku galeriju.

Na uzvodnom pokosu primijećena su pomicanja kamenog materijala, a povremeno i virovi, koji su ukazivali na prodiranje vode u tijelo brane.

Uslijed miniranja na središnjem dijelu došlo je do slijeganja od oko 2,5 do 3,0 m na dužini od 50 do 60 m.

Na desnom kraju brane formiran je krater promjera 20 do 25 m dubine 6 do 7 m.

REZULTATI PROMATRANJA PONAŠANJA BRANE NAKON MINIRANJA

Neposredno nakon miniranja provedena su geofizička ispitivanja, mjerenja brzine strujanja vode u jezeru uz uzvodni pokos brane, te mjerenje protoka i mutnoće vode koja je istjecala iz pristupnog tunela injekcijske galerije.

Geofizička ispitivanja proveo je "MOHO" poduzeće za primijenjenu geofiziku iz Zagreba.

Geofizička mjerenja provedena su sa zadaćom da utvrde mjesta i razmjere oštećenja brane. Provedena su primjenom metoda refrakcijske seizmike, mjerenjem vlastitog potencijala i geoelektričnog profiliranja, sl. 1 i 2.

Prema brzini uzdužnih seizmičkih valova bilo je moguće generalno izdvojiti dijelove na kojima je brana više oštećena u odnosu na ostale, a to su: gornji dio visine 5 do 10 m od krune, lijevi i desni kraj te središnji najviši dio brane.

Rezultate ovih ispitivanja potvrdila su i urušavanja u obliku kratera, koja su se na četiri mjesta dogodila nakon miniranja i to 16. veljače na središnjem dijelu brane, sta: 1+52,16 do 1+62,61, promjera oko 10 m, dubine do 8,0 m, 4. ožujka na sta: 0+85,5, promjera oko 5 m, dubine do 10 m s tendencijom povećavanja na što su ukazale pukotine na udaljenosti i do 7 m od kratera, te 2. svibnja na sta: 3+62 i 3. lipnja na sta: 3+42 promjera 4 do 5 m iz kojih je materijal brane kroz oštećeni beton zasipao injekcijsku galeriju.

Mjerenja brzine strujanja vode na uzvodnom pokosu brane proveo je Institut za oceanografiju i ribarstvo iz Splita.

Cilj istraživanja bio je otkrivanje mjesta na uzvodnom pokosu brane na kojima voda više ili manje koncentrirano utječe u tijelo brane.

Za mjerenja je odabran najviši dio brane, na kojem je miniranje izazvalo slijeganje krune oko 3,0 m. Na osnovi toga se je zaključilo, da je i na tom potezu aktiviran eksploziv u galeriji brane, te pretpostavilo da su uslijed toga u uzvodnoj potpornoj zoni i jezgri brane mogle nastati pukotine i šupljine kroz koje voda protječe u injekcijsku galeriju. U tom bi

slučaju to bila potencijalna mjesta razvoja procesa unutrašnje erozije, koji bi mogli uzrokovati još veća oštećenja pa i proboj brane s vrlo teškim posljedicama.

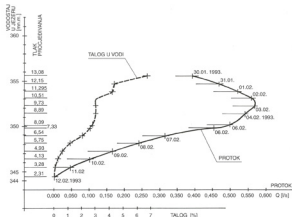
Istraživanja su obavljena od 2. do 5. veljače 1993. godine, dakle u vrijeme kada je protok vode iz galerije bio najveći, sl. 3.

Mjerenja su provedena na prostoru dimenzija 25 m po dužini brane, 35 m u smjeru jezera, te između visinskih kota 353 i 330 m n.m., sl. 1 i 2.

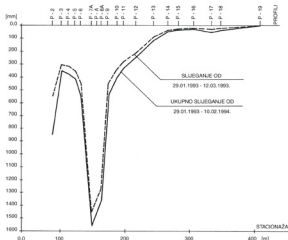
Rezultati mjerenja pokazali su da su se strujanja vode generalno odvijala u smjeru sjeverozapad-jugoistok, odnosno prema lijevom kraju brane. Uočena su i odstupanja od ovog smjera i to na kotama između 330 i 340 m n.m., na kojima su strujanja bila usmjerena okomito na branu. Međutim mjesta koncentriranih uviranja vode u branu nisu na istraživanoj lokaciji registrirana.

Mjerenja protoka i mutnoće vode koja je istjecala iz pristupnog tunela galerije. Ova mjerenja provodio je **Gravevinski institut** iz Splita.

Mjerenja su pokazala da se je protok od početka mjerenja 30. siječnja 1993. godine do 3. veljače 1993. godine povećavao i to od oko 400 l/s na 570 l/s uz istovremeno smanjivanje vodostaja u jezeru odnosno tlaka procjeđivanja za 3,35 m, i smanjivanje mutnoće vode, sl. 3.



Slika 3. Dijagram protoka i mutnoće vode



Slika 4. Sljevanje brane po mjernim profilima

Nakon toga protok se stalno smanjuje i 12. veljače 1993. godine voda potpuno prestaje istjecati i to kod vodostaja u jezeru na koti 344,41 m n.m., odnosno razlike vodostaja u jezeru i dna pristupnog tunela od 2,31 m. Mutnoća vode se stalno smanjivala, tako da je zadnji dan istjecala potpuno čista voda.

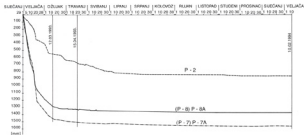
Na osnovi ovih podataka moglo se zaključiti, da nije došlo do intenzivnijeg razvoja procesa unutrašnje erozije u tijelu brane.

Iz volumena istekle vode i koncentracije taloga izračunato je da je ovim putem izneseno iz brane oko 1500 m³ gline.

Opažanje sljevanja brane provodio je **Zavod za izmjeru zemljišta** iz Splita kontinuirano od 29. siječnja 1993 do 10. veljače 1994 godine, dakle u trajanju od 377 dana.

U tu svrhu na krani brane postavljeno je 19 profila na kojima su se slijeganja opažala u tri točke: na uzvodnom rubu, sredini i nizvodnom rubu krune brane. Mjerni profili postavljani su na onom dijelu krune brane, koji miniranjem nije bio potpuno uništen, tako da su mjerenja slijeganja obuhvatila oko 290 m ili oko 70% ukupne dužine krune brane.

Iz podataka o slijeganju brane, sl. 4 proizlazi, da je slijeganje brane bilo najveće u profilima P-7a i P-8a i to u veličini od 1,554 m i 1,367 m odnosno 26,79‰ i 23,57‰ visine brane, te u profilu P-2 u veličini 0,846 m odnosno 24,88‰ visine brane, sl. 5. Ovi podaci ukazali su da je na tim dijelovima došlo i do najvećih oštećenja brane. Ovo se posebno odnosi na profile P-7a i P-8a na kojima je kruna brane prije miniranja bila na koti - 363,80 m n.m., a nakon miniranja na kotama 361,345 m n.m. odnosno 361,407 m n.m. iz čega proizlazi da je inicijalno slijeganje u momentu eksplozije iznosilo najmanje oko 3 m, budući da je nivelman točaka proveden nakon nasipavanja tog dijela krune radi omogućavanja prolaza vozila na lijevi kraj brane u procijenjenoj veličini od 0,5 - 1,0 m.



Slika 5. Slijeganje u osi brane na profilima P-2, P-7A i P-8A

Na svrhom definiranja generalnog vremenskog tijeka, analiza slijeganja brane provedena je na osnovi dijagrama slijeganja na pojedinim profilima transformiranih u koordinatni sustav u kojem ordinata predstavlja relativno slijeganje u odnosu na visinu brane u profila opažanja " s [‰]", a apcisa drugi korijen iz trajanja opažanja u danima " $\sqrt{t}$ ", čime je postignuta koncentracija podataka slijeganja na vremenskoj osi.

Za ilustraciju analize i dobivenih rezultata odabran je kao karakterističan dijagram slijeganja na profilu P-4, na kojem visina brane iznosi 48 m, odnosno oko 83% njezine maksimalne visine. Kota dna uzvodnog pokosa na ovom profilu iznosi - 315 m n.m., što odgovara

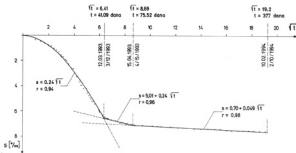
najnižem dostignutom vodostaju u jezeru prilikom njegovog pražnjenja nakon miniranja brane. Na sl. 6 prikazan je dijagram slijeganja u apsolutnim veličinama i kalendarskoj vremenskoj osi, a na sl. 7 transformirani dijagram slijeganja u koordinatnom sustavu: $\sqrt{t}$, s [‰].

Na transformiranom dijagramu slijeganja evidentna su tri vremenska intervala slijeganja brane. Rezultati regresijske analize pokazali su, da se u prvom perioda tijekom relativnih slijeganja može aproksimirati parabolom, a u druga dva pravcima s visokim vrijednostima koeficijenta korelacije, koji se kreću od $r = 0,94$ do $r = 0,98$, sl. 7.

Sjecište parabole i prvog pravca definira kraj prvog perioda, koji se nalazi na $t = 41$ dan, što vrlo dobro odgovara završetku pražnjenja jezera, koje je trajalo 42 dana. Kraj drugog razdoblja definiran je sjecištem pravaca, koje se nalazi na $t = 76$ dana, tako da trajanje drugog razdoblja slijeganja brane iznosi oko 34 dana, a trećeg do kraja opažanja 301 dan.



Slika 6. Slijeganje brane u profilu P-4



Slika 7. Slijeganje brane u profilu P-4

Rezultati analize dijagrama opažanja slijeganja pokazali su, da su generalno za vremenski tijek slijeganja brane karakteristična tri razdoblja i to:

- Od 29. siječnja do 12. ožujka 1993 godine u trajanju od 42 dana, koje odgovara razdoblju pražnjenja jezera do kote 314,80 m n.m., kod koje volumen jezera iznosi oko 10 ml. m³ odnosno oko 2% ukupnog volumena i predstavlja praktično prazno jezero.
- Od 13. ožujka do 15. travnja 1993 godine u trajanju od 34 dana
- Od 16. travnja 1993 do 10. veljače 1994 godine u trajanju od 301 dan, odnosno do kraja opažanja.

Razdoblje pražnjenja jezera može se smatrati razdobljem primarne konsolidacije brane nakon miniranja, koja je ubrzana povećanjem efektivnih vertikalnih naprezanja i smanjenja porednog tlaka u glinenoj jezgri nastalih uslijed snižavanja vodostaja u jezera. U ovom su razdoblju slijeganja brane bila najveća i iznosila su oko 85% od ukupnih na svim mjernim profilima osim profila P-2, P-7a, P-8a, P-17, P-18.

Na profilima P-2, P-17 i P-18 slijeganja u ovom razdoblju iznosila su 65%, 67% odnosno 56% od ukupnih, što upućuje na zaključak, da na tom dijelu u razdoblju pražnjenja jezera nije postignuta primarna konsolidacija brane nakon miniranja.

Nasuprot tome, na profilima P-7a i P-8a slijeganje brane iznosilo je 94% ukupnih slijeganja, iako se na osnovi vidljivih oštećenja moglo zaključiti, da je upravo na tom dijelu u injekcijskoj galeriji aktiviran eksploziv.

Međutim brzina slijeganja na ovim profilima u ovom razdoblju je najveća i iznosi 35 odnosno 31 mm/dan, dok je na susjednim profilima P-6 i P-9 oko tri puta manja i iznosi oko 11 mm/dan. Prema lijevom odnosno desnom kraju brane brzina se slijeganja u pojedinim profilima kontinuirano smanjuje s iznimkom mjernog profila P-2 na kojem iznosi 13 mm/dan.

U razdoblju od 13. ožujka 1993. do 15. travnja 1993. godine slijeganje brane znatno je usporeno u odnosu na razdoblje pražnjenja. U tom razdoblju slijeganje na većini mjernih profila iznosilo je oko 6,5% ukupnih slijeganja, a brzina slijeganja oko 0,6 mm/dan ili oko 23 cm/god.

Iznimke su profili P-2, P-17 i P-18 na kojima slijeganje iznosi 14,7, 19,3 odnosno 16,3% ukupnih slijeganja, te profili P-7a i P-8a s veličinom slijeganja od 2,7 odnosno 2,9% od ukupnih.

Brzine slijeganja na profilima P-2, P-7a, P-8a, P-17 i P-18 su 3,65; 1,24; 1,15; 0,3 i 0,2 mm/dan, odnosno oko 133, 45, 42, 11 i 7 cm/god.

Usporedbom brzine slijeganja brane nakon njezinog dovršenja 1960. godine, koja je iznosila oko 25 cm/god moglo se zaključiti, da je na oko 75% dužine na kojoj su obavljana opažanja slijeganja brana postigla isto stanje konsolidacije kao i nakon dovršenja građenja.

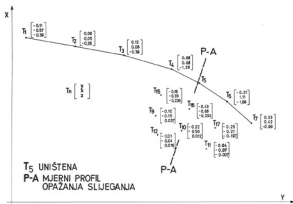
Brzina slijezanja na profilu P-2 od 133 cm/god te na profilima P-7a i P-8a od 45 odnosno 42 cm/god, ukazivala je da je brana na tom dijelu znatnije oštećena.

U razdoblju od 16. travnja 1993 do kraja opažanja 10. veljače 1994 godine slijezanje brane na 75% dužine praćenja iznosilo je oko 8,5% ukupnog slijezanja s brzinom od oko 0,09 mm/dan ili oko 3 cm godišnje.

Na profilima P-7a i P-8a slijezanje brane u ovom razdoblju iznosilo je 3,3 odnosno 3,1% ukupnog slijezanja s brzinom od 0,18 odnosno 0,14 mm/dan ili 7 odnosno 5 cm/god. Na profilu P-2 veličina slijezanja iznosila je 20,3% od ukupnog s brzinom od 0,56 mm/dan odnosno oko 20 cm/god.

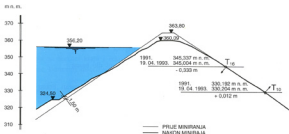
Na osnovi ovih rezultata moglo se zaključiti da je miniranjem znatno poremećena struktura materijala brane tijekom ovog razdoblja postigla stanje sekundarne konsolidacije s prilično ujednaženom brzinom slijezanja, ako se izuzme profil P-2 na kojem je brzina slijezanja približno odgovarala brzini slijezanja brane dvije godine nakon ajezinog dovršenja.

Geodetskom kontrolom oskultacijskih točaka za opažanja pomaka brane, ustanovljene su minimalne deformacije nizvodnog pokosa u odnosu na posljednje mjerenje provedeno 1991 godine. sl. 8 i 9.



Slika 8. Pomaci oskultacijskih točaka na uzvodnom pokosu brane u odnosu na 1991 godinu

Međutim vizuelnim pregledom nakon pražnjenja akumulacijskog jezera uočene su značajne deformacije uzvodnog pokosa brane.



Slika 9. Poprečni presjek brane prije i nakon miniranja u profilu P-A

Zaključci

Prema rezultatima provedenih istraživanja moglo se zaključiti sljedeće:

- (1) Miniranje brane uzrokovalo je najveća oštećenja njezinog gornjeg dijela, visine 5-10 m na cijeloj dužini, lijevog kraja do profila P-3 dužine oko 80 m od preljeva, srednjeg najvišeg dijela brane između profila P-6 i P-9, te desnog kraja brane između profila P-17 i P-19 dužine oko 80 m.
- (2) Prema rezultatima slijezanja, brana, koje je struktura materijala miniranjem bila ozbiljno narušena, generalno je postigla stanje primarne i nalazi se u fazi sekundarne konsolidacije. Nizvodna potporna zona nije ozbiljnije oštećena i može preuzeti funkciju nosivog dijela brane. Oštećenja glinene jezgre su takva, da ona bez sanacijskih radova ne može preuzeti funkciju vododrživog elementa brane.
- (3) Pretpostavlja se da je injekcijska galerija potpuno uništena na lijevom kraju brane na dužini od oko 45 m od preljeva, u središnjem najvišem dijelu brane u dužini od oko 25-30 m, te na desnom kraju brane između profila P-18 i P-19 u dužini od oko 25 m. Na ostalom dijelu galerija je u većoj ili manjoj mjeri oštećena.

- (4) Desni potporni zid, pristupni most i pogonska zgrada preljeva toliko su oštećeni, da je potrebna njihova potpuna rekonstrukcija. Zapornica preljeva i njezin pogonski mehanizam nisu upotrebljivi, te ih je potrebno zamijeniti novima.

POLAZNE POSTAVKE ZA RJEŠENJE SANACIJE BRANE

Na osnovi rezultata promatranja ponašanja brane nakon miniranja, te vizuelnog pregleda postavljena su varijantna rješenja sanacije, koja polaze od slijedećih postavki:

- (1) Na lijevom kraju rekonstruirati centralni, jezgrovni dio brane
- (2) Na desnom kraju, s obzirom na malenu visinu rekonstruirati branu u cijelom poprečnom presjeku
- (3) Rekonstruirati gornji dio brane na cijeloj dužini u visini 5 do 10 m
- (4) Sanirati jezgru brane u središnjem dijelu u smislu postizanja njezine vododrživosti
- (5) Nizvodna potporna zona nije ozbiljnije oštećena i može preuzeti funkciju nesivog dijela brane
- (6) Obnoviti injekcijsku galeriju od pristupnog tunela na lijevom kraju brane do pristupnog tunela na desnom kraju
- (7) Građevinski dio preljeva potrebno je obnoviti prema izvornom projektu, a hidromehaničku opremu u cjelosti zamijeniti novom.
- (8) Voditi računa o promatranju ponašanja brane nakon izvedenih sanacijskih radova.
- (9) Zbog velikog značaja akumulacijskog jezera Peruća u hidroenergetskom sustavu rijeke Cetine, uz garanciju potrebne sigurnosti i kvalitete radova, branu treba sanirati u što kraćem vremenu.
- (10) Za vrijeme radova na sanaciji brane, velike vodne valove treba evakuirati kroz temeljni ispušni i turbine hidroelektrane u cilju barem djelomičnog energetskog iskorištenja, vodeći pri tome računa da se sanacijski radovi provode neometano i sa potrebnom sigurnošću.

Postavljene su četiri osnovne varijante sanacije i to:

1. Rekonstrukcija jezgrovnog dijela brane na cijeloj dužini.

2. Sanacija jezgre brane u središnjem dijelu izvedbom dijafragme od plastičnog betona, te zamjena jezgrovog dijela na lijevom kraju i rekonstrukcija cijelog poprečnog presjeka na desnom kraju brane prema izvornom projektu sa glinenom jezgrom kao vododrživim elementom brane.
3. Sanacija jezgre brane u središnjem dijelu mlaznim i klasičnim injektiranjem, a lijevog i desnog kraja brane kao u varijanti 2.
4. Izvedba uzvodnog ekrana kao vododrživog elementa brane, te zamjena jezgrovog dijela na lijevom kraju i rekonstrukcija cijelog poprečnog presjeka na desnom kraju brane kamenim materijalom.

Za varijante 1 i 4 obrađene su i podvarijante i to u odnosu na materijal vododrživog elementa brane, jezgru odnosno uzvodni ekran, tako da je ukupno obrađeno sedam varijantnih rješenja. Stupanj obrade svih razmatranih rješenja bio je isti, kako bi se što objektivnije moglo izvršiti njihovo kvantitativno i kvalitativno vrednovanje i izbor najpovoljnijeg rješenja.

OPIS VARIJATNIH RJEŠENJA

Varijanta 1

Ovo rješenje predstavlja najradikalniji zahvat i znači građenje nove brane. Pri tome su analizirana dva rješenja u odnosu na nepropusni element brane i to:

- a) glinena jezgra kao u izvornom projektu
- b) jezgra od asfalt-betona, sl. 10.

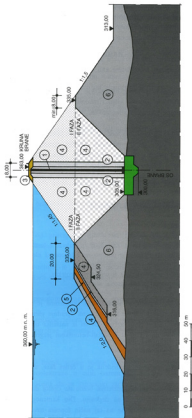
Varijanta sa jezgrom od asfalt-betona razmatrana je radi toga, što su klimatske prilike za njezinu izvedbu povoljnije u odnosu na ugradnju gline i zbog toga što se pretpostavilo, da će se dio količine gline trebati dovesti iz nalazišta udaljenog oko 10 km. Ovi razlozi mogli su rezultirati da varijanta sa asfalt-betonskom jezgrom bude ekonomičnija od varijante sa glinenom jezgrom.

Izvedba ove varijante predviđena je u četiri faze, sl. 10.

U **prvoj se fazi** uklanja materijal brane na cijeloj dužini i visini do kote 335 m n.m., uz selektiranje i odvoženje na deponiju. Dio kamenog i glinenog materijala odvozi se na uzvodni pokos brane te se na taj način formira uzvodni zagat, koji omogućava korištenje akumulacijskog jezera do vodostaja 330 m n.m. u sušnom, odnosno do vodostaja 320 m n.m. u vlažnom dijelu godine uz obranu gradilišta od velikih voda Češine 100 god. povratnog razdoblja. Osim toga sprečava se i procjeđivanje vode u jezgrovni dio brane.

LEGENDA

1. ASFALT-BETONSKA JEZGORA
2. FILTARSKI SLOJEVI
3. ZAGIJENI KAMENI MATERIJAL
4. KAMENI NASIP
5. GILJENNA JEZGORA
6. POSTOJEĆI KAMENI NASIP



Slika 1b. Varijanta 1b. Rekonstrukcija brane s asfalt-betonskom jezgrom - poprečni presjek

U ovoj fazi radova predviđeno je i podgrađivanje oštećene injekcijske galerije, kako ne bi došlo do urušavanja dijelova brane pod opterećenjem građevinskih strojeva.

U drugoj se fazi iskapa jezgrovni dio brane do dna injekcijske galerije odnosno do temeljnog tla. Osim toga u ovoj fazi je predviđeno rušenje oštećene galerije.

U trećoj fazi u podvarijanti sa glinenom jezgrom izvodi se injekcijska galerija, a u podvarijanti sa asfalt-betonskom jezgrom betonska podloga jezgre. Nadalje, provodi se kontaktno injektiranje dna injekcijske galerije odnosno betonske podloge u podvarijanti sa asfalt-betonskom jezgrom, i injektiranje zavjese na dijelovima, gdje se provjerom vododrživosti ustanovi da je to potrebno.

Četvrti faza obuhvaća obnovu jezgrovnog dijela brane do kote 335 m n.m. a nakon toga nasipavanje cijelog poprečnog presjeka do krune brane.

U podvarijanti sa glinenom jezgrom brana se obnavlja prema originalnom projektu, što predstavlja izvedbu gline jezgre, uzvodnih i nizvodnih filtrarskih slojeva te uzvodne i nizvodne potpome zone od uvaljanog kamenog materijala. Kod toga bi se najvećim dijelom koristio materijal koji je iskopan iz brane.

Kod rješenja sa asfalt-betonskom jezgrom predviđena je jezgra širine 1,0 m, uzvodni i nizvodni filtrarski slojevi promjera zrna 0-6 cm i širine 1,5 m, prijelazni filtrarski slojevi promjera zrna 0-20 cm i širine 3,0 m, te uzvodna i nizvodna potporna zona brane od uvaljanog kamenog materijala.

Varijanta 2

Osnovna koncepcija sanacije brane po ovoj varijanti jest da se u središnjem dijelu kao vododrživi element brane izvede dijafragma od plastičnog betona, na lijevom kraju brane u dužini od oko 100 m zamijeni njezin jezgrovni dio, a na desnom kraju na dužini također od oko 100 m zamijeni materijal cijelog poprečnog presjeka brane, sa glinenom jezgrom kao njezinim vododrživim elementom. Na središnjem dijelu brane na kojem se izvede dijafragma rekonstruirala se gornji dio brane u visini 5-10 m s glinenom jezgrom kao njezinim vododrživim elementom. Injekcijsku galeriju predviđeno je obnoviti od pristupnog tunela br. 3 na lijevom kraju do pristupnog tunela br. 1 na desnom kraju brane, sl. 11 i 12.

Dijafragma je predviđeno izvesti od plastičnog betona sa slijedećim osnovnim mehaničkim karakteristikama: tlačna čvrstoća $> 1 \text{ MN/m}^2$, a modul elastičnosti $< 400 \text{ MN/m}^2$.

Dijafragma se izvodi u jezgri brane uzvodno od injekcijske galerije na osnovu razmaku od 4 m. Debljina dijafragme je 1 m, a njezina dubina varira između 13 i 52 m ovisno o dubini temeljnog tla. Dijafragma se temelji u stijeni odnosno betonskom bloku na

središnjem dijelu brane, a dubina temeljenja iznosi oko 2 m. Otjeđnjenje spoja dijafragme i temelja izvodi se injektiranjem iz galerije.

Izgradnja dijafragme predviđena je hidrauličkim rezačem sa platom na brani, kojeg je širina dovoljna za izvedbu dijafragme i komunikaciju uzduž brane, čime se u isto vrijeme omogućavaju i radovi na rekonstrukciji njezinog lijevog i desnog kraja.

Po trasi dijafragme predviđeno je provesti injektiranje jezgre cementno-bentonitnom suspenzijom. Svrha injektiranja je zapunjavanje pukotina u glini nastalih kao posljedica miniranja, i na taj način smanjivanje opasnosti od gubitka isplake kojom se osigurava stabilnost iskopa rova za dijafragmu.

Na lijevom kraju predviđen je iskop brane u cijelom poprečnom presjeku do kote 345 m n.m. odnosno dna spoja pristupnog tunela i injekcijske galerije, a ispod ove kote do kote 330 m n.m. samo njezinog jezgrovog dijela. Na dijelu gdje se ne predviđa obnova galerije izvodi se temeljna betonska ploča za glinenu jezgu, kontaktno injektiranje i injektiranje zavjese na dijelovima, gdje se provjerom vodonepropusnosti ustanovi da je to potrebno. Sljedeća faza je nasipavanje brane do kote 353 m n.m.

Na desnom kraju sanacija brane je u koncepciji ista kao i na lijevom osim što se brana rekonstruira u cijelom poprečnom presjeku i to do kote 358 m n.m.

Nakon izvedbe dijafragme i rekonstrukcije lijevog i desnog kraja brane do kote 353 odnosno 358 m n.m. rekonstruira se gornji dio brane visine 5 - 10 m.

Uslijed miniranja deformiran je uzvodni pokos brane. Njegova sanacija predviđena je stabiliziranjem nestabilnih kamenih blokova obloge, popunjavanjem neravnina te na taj način poravnanje na projektirani nagib pokosa 1:1,45.

Obnova injekcijske galerije predviđena je iz nekoliko razloga. Jedan od najvažnijih je da njezina obnova predstavlja istražni rad, koji će dati vrlo dobar uvid u oštećenja glinene jezgre u području najvećih hidrostatskih pritisaka na cijeloj dužini brane uključivo i mjesta, gdje je brana minirana.

Iz obnovljene galerije može će se vrlo kvalitetno obaviti kontaktno injektiranje dijafragme i njezinog temelja, kontrolirati vododrživost injekcijske zavjese i intervenirati na mjestima, gdje to bude potrebno.

Tijekom eksploatacije galerija će vrlo dobar poslužiti za kontrolu vododrživosti dijafragme, a u slučaju potrebe i za dodatne intervencije u smislu sprečavanja prociđivanja.

Prema raspoloživim podacima smatra se da je beton injekcijske galerije na najvećem dijelu ispucao, ali je galerija generalno zadržala svoj oblik, dok je na mjestima miniranja potpuno uništena.

Obnova galerije predviđena je na dva načina. Na dijelovima na kojima galerija nije urušena, predviđeno je podgrađivanje čeličnim lukovima, izvedba betonske obloge mlaznim

betonom debljine 15 cm armirane dvostrukom čeličnom mrežom, te injektiranje kontaktae obloge i glinene jezgre odnosno temeljne stijene.

Na dijelovima gdje je galerija uništena, predviđen je iskop pod zaštitom čeličnih lukova i platforma, te izvedba betonske obloge debljine 80 cm.

Obnova galerije predstavlja prioritetni rad na sanaciji brane, koji je potrebno izvesti u sušnom dijelu godine, kako bi se vodostaj u akumulacijskom jezeru mogao održavati na što nižoj razini. Na taj bi se način po mogućnosti spriječilo procjeđivanje vode u oštećenu galeriju ili barem smanjilo količinu procjeđane vode na minimum. Procjeđivanje vode znatno bi otežalo radove, posebno u najdonjem dijelu na kojem se pretpostavlja da je galerija u dužini od oko 25 do 30 m potpuno razorena.

U ovoj varijanti sanacije brane, korištenjem akumulacijskog jezera do vodostaja 330 m n.m., a to je najniža kota dna iskopa na lijevom kraju brane, uz pretpostavku da je galerija obnovljena, mogu se kroz temeljni ispušni i turbinske dovode evakuirati vodni valovi 100 god. povratnog razdoblja.

Varijanta 3

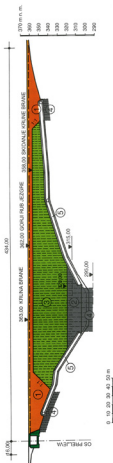
Osnovna koncepcija sanacije brane u ovoj varijanti jest da se glinena jezgra u središnjem dijelu sanira mlaznim i klasičnim injektiranjem, a lijevi i desni kraj brane na isti način kao u varijanti 2. Iz razloga smanjenja troškova sanacije injekcijska se galerija ne obnavlja u središnjem najvišem dijelu brane, dok se na ostalom dijelu brane obnavlja kao u varijanti 2, sl. 13.

Mlaznim injektiranjem konsolidira se glinena jezgra brane od dna galerije do kote 320 m n.m. Predviđeno je da se u poprečnom presjeku izvedu četiri reda valjaka promjera 1,5 - 2,0 m, koji bi formirali vododrživi element brane širine oko 6,5 m.

Iznad kote 320 m n.m. sanira se glinena jezgra brane injektiranjem sa krune cementno-benzonitnom smjesom s dodatkom pijeska i to uzlaznim smjerom u etažama od 3 - 5 m gravitacijski ili pod malim pritiscima.

Predviđena su tri reda bušotina na razmaku od 2,25 m, a u smjeru osi brane na razmaku od 3 m, s time da je srednji red bušotina izmaknut za 1,5 m u odnosu na varjske redove. Na taj se način formira sanirani pojas glinene jezgre širine oko 6,5 m.

Povezivanje dijela jezgre brane sanirane injektiranjem i dijela saniranog mlaznim injektiranjem predviđeno je produžavanjem injekcijskih bušotina za 5 m i injektiranje kontaktnog pojasa.



LEGENDA

1. REKONSTRUKCIJA BRANE PREMA ORIGINALNOM PROJEKTU
2. JETGROUTING
3. INJEKCIJSKE JEZGORE
4. INJEKCIJSKE GALERIJE
5. REKONSTRUKCIJA INJEKCIJSKE GALERIJE

Slika 1.3. Varijanta 3. Rekonstrukcija brane injektiranjem jezgre - uzdužni presjek

Kontrola vododrživosti zavjese i kontaktno injektiranje na središnjem dijelu brane na kojem se ne obnavlja galerija predviđeno je kroz vanjske radove injekcijskih bušotina.

Gornji dio brane na ovom dijelu obnavlja se u visini od 5 m prema izvornom projektu.

I u ovoj se varijanti sanacije brane, korištenjem akumulacijskog jezera do vodostaja 330 m n.m, a to je kota dna iskopa na lijevom kraju brane, uz pretpostavku da je galerija obnovljena, mogu kroz temeljni ispušni i turbinske dovode evakuirati vodni valovi 100 god. povratnog razdoblja.

Varijanta 4

Koncepcija sanacije brane osniva se na izvedbi ekrana položenog na uzvodni pokos brane kao njezinog vododrživog elementa umjesto glinene jezgre, dok je na lijevom i desnom kraju brane predviđena rekonstrukcija brane, ali bez glinene jezgre. Injekcijska se galerija obnavlja kao u varijanti 2.

U odnosu na materijal uzvodnog ekrana razmatrane su tri alternativne mogućnosti izvedbe i to: **armirano betonske ploče, glina, PEHD folija.**

Ekrani se na najnižem dijelu brane temelje na kruni bivšeg uzvodnog zagata, koja je na koti 315 m n.m.

Vododrživost dijela brane do dna korita Cetine, kao i spoj ekrana na postojeću injekcijsku zavjesu predviđeno je izvesti novom kosom injekcijskom zavjesom sa krune uzvodnog zagata pod kutem od 45°, i to po cijelom uzvodnom obodu brane. Dužina zavjese na najdubljem mjestu iznosi oko 125 m.

Zavjesa je troredna s razmakom bušotina 4,0 m i razmakom redova od 2,5 m. Dio zavjese koji prolazi kroz materijal uzvodnog zagata izveo bi se gustom injekcijskom smjesom prepaet postupkom, a ostali dio uzlaznim injektiranjem u dionicama od 5 m.

Za potrebe nakaadnog injektiranja tijekom eksploatacije predviđena je injekcijska galerija po cijelom uzvodnom obodu brane.

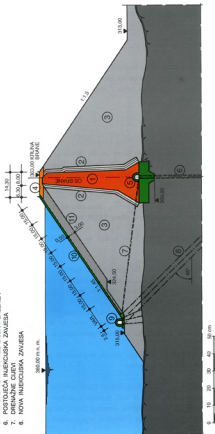
S obzirom da je zaštita uzvodnog pokosa brane izvedena od krupnog kamena, te da je pokos brane na koti - 324,5 m n.m. prekinut bankinom širine oko 5 m, predviđeno je njegovo izravnavanje slojem zbijenog kamenog materijala prosječne debljine 3 m, kako bi se dobila ravna, nedeformabilna i dovoljno vodopropusna podloga ekrana.

Armirano-betonski ekran postavlja se na drenažni sloj debljine 50 cm, a izvodi se od dvostruko armiranih ploča debljine 50 cm, dimenzija 10 x 15 m spojenih betovima i trajno

LEGENDA

1. GLINENA JEZGRA
2. FILTARSKI SLOJEVI
3. KAMENI NASIP
4. ZAGLJENI KAMENI MATERIAL
5. REKONSTRUIRANA INJEKCIJSKA GALERIJA
6. POSTOJEĆA INJEKCIJSKA ZAVJESA
7. DRENAGNE CIJEVI
8. NOVA INJEKCIJSKA ZAVJESA

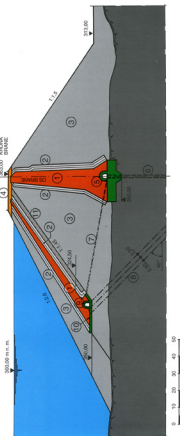
9. NOVA INJEKCIJSKA GALERIJA
10. UZVOJNI ARM. BETONSKI EKRAN (PLOŠĆE 10x15 m)
11. IZRAVNAVAJUĆI SLOJ KAMENOG MATERIJALA



Slika 14. Varijanta 4a Rekonstrukcija brane s uzvodnim ekranom od armirano-betonskih ploča
- karakteristični poprečni presjek

LEGENDA

- | | |
|--|---|
| 1. GLINENA JEZGRA | 9. NOVA INJEKCIJSKA GALERIJA |
| 2. FILTARSKI SLOJEVI | 10. BETONSKA PLOČA |
| 3. KAMENI NASIP | 11. IZRAVNAVAJUĆI SLOJ KAMENOG MATERIJALA |
| 4. ZAGLUNJENI KAMENI MATERIJAL | |
| 5. REKONSTRUIRANA INJEKCIJSKA GALERIJA | |
| 6. POSTOJEĆA INJEKCIJSKA ZAVJESA | |
| 7. DRENAŽNE ČEVI | |
| 8. NOVA INJEKCIJSKA ZAVJESA | |



Slika 1.5. Varijanta 4b. Rekonstrukcija brane s uzvodnim ekranom od gline
- karakteristični poprečni presjek

elastičnim kitom. Ploče se betoniraju na licu mjesta u kliznoj oplati, sl. 14. Ekran se po obodu brane oslanja na betonsku ploču dna injekcijske galerije debljine 1 m.

Glineni ekran, sl. 15 postavlja se na trodijelni filtrat od pjeskovite gline, pijeska i šljunka sitne granulacije, ukupne debljine 4 m. Glineni ekran je pri dnu, okomito na njegovu ravninu debljine 4,5 m, a pri vrhu 1 m. S gornje strane zaštićen je dvoslojnim filtrom od pijeska i šljunka debljine 2 m te kamenim nasipom.

Izvedba glinenog ekrana zahtijeva najopsežnije radove. Zbog stabilnosti ekrana potrebno je smanjiti nagib uzvodnog pokosa brane proširenjem uzvodnog zagata na koji se ekran oslanja.

PERD folija, sl. 16 postavlja se na drenažni sloj debljine 50 cm. Trake folije spajaju se varenjem. Folija na donjoj površini ima šiljke koji sprečavaju njezino klizanje po pokosu. Folija je s gornje strane zaštićena betonskim pločama izvedenim od mlaznog betona s plastičnim vlaknima, debljine 15 cm dimenzija 10 x 10 m. Ploče su od folije odvojene geotekstilom, a radne reške zatvorene plastičnim kitom. Na donjem dijelu folija je ugrađena u betonsku ploču injekcijske galerije, a na kruni brane u betonski prag.

Ekran se u svim alternativnim rješenjima dreniraju drenažnim cijevima ubušnim od obnovljene injekcijske galerije do drenažnog sloja ispod ekrana. Cijevi su promjera 10 cm, dužine 10 - 80 m. Procjedna voda skuplja se u sabirni kanal u injekcijskoj galeriji, te kroz obnovljeni drenažni kanal ispod nizvodne potporne zone brane uvodi u postojeći drenažni sustav.

Lijevi i desni kraj brane saniraju se u istom opsegu kao u varijantama 2 i 3 s razlikom, da se ne izvodi glinena jezgra nego samo nasip od kamenog materijala.

Injekcijska se galerija obnavlja u opsegu i na način kao u varijanti 2.

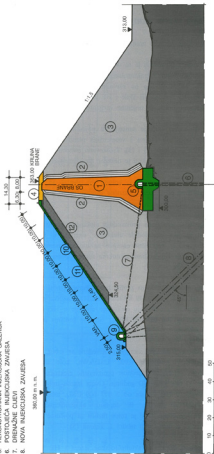
Gornji dio brane na središnjem dijelu obnavlja se u visini od 5 m, kao nasip od kamenog materijala.

Korištenjem akumulacijskog jezera do kote 315 m n.m., kroz temeljni se ispušt mogu evakuirati vodni valovi Cetine u mjesecima srpnju i kolovoza 25 god. povratnog razdoblja. To znači, da se radovi na kruni uzvodnog zagata, uz navedena sigurnost, mogu obavljati samo u dva mjeseca u godini.

LEGENDA

1. GLINENA JEZGRA
2. FILTARSKI SLOJEVI
3. KAMENI NASIP
4. ZAGLINJENI KAMENI MATERIAL
5. REKONSTRUIRANA INJEKCIJSKA GALERIJA
6. POSTOJEĆA INJEKCIJSKA ZAVJESA
7. Drenažne cijevi
8. NOVA INJEKCIJSKA ZAVJESA

9. NOVA INJEKCIJSKA GALERIJA
10. UZVOJNE EKRAN OD PEHD FOLIJE
11. ARM. BETONSKE PLOČE (10 x 10 m) ZA ZAŠTITU FOLIJE
12. ZRAVNAVAJUĆI SLOJ KAMENOG MATERIJALA



Slika 16. Varijanta 4c. Rekonstrukcija brane s uzvodnim ekranom od PEHD folije
- karakteristični poprečni presjek

USPOREDBA I IZBOR VARIJANTE SANACIJE BRANE

Usporedba varijante sanacije brane provedena je kvantitativnom i kvalitativnom analizom.

Kvantitativna analiza provedena je na osnovi ekonomskog vrednovanja varijanti određivanjem sadašnje vrijednosti doprinosa akumulacijskog jezera Peruća proizvodnji električne energije kroz razdoblje od 50 godina na navednim hidroelektranama hidroenergetskog sustava Cetine, a to su HE Peruća, HE Đale i HE Zakućac. Od tako dobivene vrijednosti oduzeti su troškovi sanacije brane za pojedine varijante.

Građevinski troškovi i trajanje sanacije za pojedina varijantna rješenja određeni su na osnovi opsega pojedinih radova i vremenskih planova, kojima su obuhvaćene sve faze izvođenja, tablica 1, kolone (2) i (3). Troškovima izvedbe pojedinih varijanti sanacije dodan je iznos interkalarnih kamata, koji je određen uz kamatnjak od 10%, tablica 1, kolona (4).

Troškovi sanacije brane, tablica 1, kolona (6), sastoje se od građevinskih troškova, te vrijednosti izgubljene proizvodnje električne energije za vrijeme sanacije za svaku razmatranu varijantu.

Godišnja vrijednost izgubljene proizvodnje električne energije za vrijeme sanacije brane sastoji se od gubitka proizvodnje električne energije u HE Peruća te od smanjene vrijednosti proizvedene električne energije na hidroelektranama Đale i Zakućac, koje za vrijeme sanacije rade s prirodnim protokom rijeke Cetine budući je akumulacijsko jezero Peruća izvan funkcije.

Srednji godišnji protok Cetine na profilu brane Peruća iznosi oko 42 m³/s, pa uz energetski ekvivalent za HE Đale od 0,049 kWh/m³, a za HE Zakućac od 0,579 kWh/m³, ovaj protok daje srednju godišnju proizvodnju električne energije u HE Đale od 64 900 000 kWh, a u HE Zakućac od 766 835 000 kWh. Srednja godišnja proizvodnje HE Peruća iznosi 121 175 000 kWh.

Uz jediničnu cijenu električne energije proizvedene sa i bez akumulacijskog jezera Peruća od 0,046 USD/kWh odnosno 0,032 USD/kWh, koje su usaglašene sa Hrvatskom elektroprivredom, izgubljena vrijednost proizvedene električne energije u HE Đale i HE Zakućac iznosi 11 644 290 USD godišnje. Ovom iznosu treba dodati vrijednost proizvodnje električne energije u HE Peruća od 3 877 600 USD, tako da izgubljena vrijednost od proizvodnje električne energije, ili doprinos akumulacijskog jezera i HE Peruća iznosi 15 521 890 USD godišnje. Ovaj je iznos različit za pojedine varijante, jer ovisi o trajanju njihove realizacije, a naveden u tablici 1, kolona (5).

Sadašnja vrijednost doprinosa akumulacijskog jezera i HE Peruća proizvodnji električne energije za razdoblje od 50 godina iznosi 153 896 660 USD. Oduzimanje od ovog iznosa

Varijanta	Građevinski troškovi (USD)	Trajanje sanacije (mj)	Interkalarno kamate (USD)	Vrijednost izgubljene energije (USD)	Ukupni troškovi (USD)	Omjer troškova	Doprinos jezera i HE Peruća (USD)	Omjer doprinosa
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
1a	9 303 000	23	1 377 147	29 750 269	40 430 436	2,80	113 456 224	0,81
1b	11 532 000	23	1 707 070	29 750 269	42 909 359	2,98	110 907 301	0,80
2	5 186 000	9	384 252	11 641 418	17 211 670	1,19	136 684 990	0,98
3	4 436 000	7,5	291 028	9 701 181	14 428 209	1,00	159 468 451	1,00
4a	9 609 000	11	884 562	14 228 399	24 428 209	1,72	129 094 699	0,93
4b	14 884 000	18	1 754 817	23 282 835	39 921 652	2,77	113 975 008	0,82
4c	8 467 000	11	773 007	14 228 399	23 403 406	1,63	130 428 254	0,94

NAPOMENA: Varijanta 1a i 1b - rekonstrukcija brane s glinenom odnosno asfalt-betonskom jezgrom
 Varijanta 2 - dijafagma od plastičnog betona
 Varijanta 3 - mlazno i klasično injektiranje
 Varijanta 4a, 4b i 4c - uzvodni ekran od armiranog betona, gline i PEHD folije

Tablica 1 - Sadašnja vrijednost doprinosa akumulacijskog jezera Peruća i HE Peruća proizvedenju električne energije

ukupnih troškova sanacijskih radova, dobije se sadašnja vrijednost doprinosa za pojedinu varijantu sanacije brane, tablica 1, kolona (8).

Prema rezultatima kvantitativne analize najpovoljnija je varijanta 3 prema kojoj se glinena jezgra brane u središnjem dijelu sanira mlaznim i klasičnim injektiranjem, a lijevi i desni kraj brane rekonstruira prema izvornom projektu.

Omjer troškova te doprinosa jezera i HE Peruća na proizvodnju električne energije pojedinih varijantnih rješenja i najpovoljnije varijante 3 naveden je u tablici 1, kolone (7) i (9).

Najskuplja je varijanta rekonstrukcije brane u jezgrovnom dijelu sa asfalt-betonskom jezgrom, kod koje je vrijednost doprinosa akumulacijskog jezera i HE Peruća proizvodnji električne energije za 50 godišnje razdoblje 20% manja u odnosu na najpovoljniju varijantu, a u inicijalnim troškovima ona je tri puta skuplja od varijante 3. Od ove varijante ne odstupaju mnogo niti varijanta rekonstrukcije jezgrovnog dijela brane sa glinenom jezgrom, kao niti varijanta sa uzvodnim glinenim ekranom kao vododrživim elementom brane.

Kod ostalih varijanti i to, varijante 2 sa dijafragmom od plastičnog betona, te varijanti 4c i 4a sa uzvodnim ekranima od PEHD folije i armiranobetonskih ploča, vrijednost doprinosa akumulacijskog jezera i HE Peruća proizvodnji električne energije za 50 godišnje razdoblje manje je od 2 - 7% u odnosu na najpovoljniju varijantu 3, a u inicijalnim troškovima su skuplji od 19% - 72%.

Na osnovu rezultata kvantitativne analize, izuzete su u daljnjim razmatranjima varijante 1a, 1b i 4b.

Izbor varijante sanacije obavljen je kvalitativnom analizom varijanti 2, 3 4a i 4c i to prema sljedećim karakteristikama pojedinih rješenja:

- (1) pouzdanosti,
- (2) složenosti građevinskih radova,
- (3) mogućnosti naknadne intervencije u slučaju potrebe popravaka,
- (4) mogućnosti energetskog korištenja dijela akumulacijskog jezera za vrijeme sanacije.

Karakteristike rješenja sanacije prema **varijanti 2** u potpunosti zadovoljavaju kriterij pouzdanosti, budući se na lijevom i desnom kraju izvodi nova brana, a u središnjem dijelu izvedbom dijafragme od plastičnog betona i konsolidacijskim injektiranjem jezgre sanirat će se sve poprečne i uzdužne pukotine i šupljine u jezgri i formirati zajedno s glinom jezgrom nepropusni element brane.

U odnosu na izvedbu dijafragme tehnologija građenja nije suviše složena, a domaći izvođači imaju u tom pogledu odgovarajuća iskustva.

Naknadne intervencije na najosjetljivijem donjem dijelu dijafragme moguće su iz obnovljene injekcijske galerije.

Korištenje akumulacijskog jezera moguće je do kote 330 m n.m., uz uvjet, da se prethodno obnovi injekcijska galerija.

Pouzdanost rješenja sanacije u **varijanti 3** manja je u odnosu na varijantu 2 s obzirom da bi i opsežnim istražnim radovima bilo teško registrirati sva mjesta i stanja oštećenja jezgre brane. Radi toga ovo rješenje zahtijeva posebno praćenje ponašanja brane nakon njezine sanacije, posebno u odnosu na vododrživost glinene jezgre, a i vjerojatnost potrebe naknadnih intervencija je veća.

Kod ovog rješenja primjenjuju se dvije tehnologije izvođenja radova na sanaciji glinene jezgre, što smanjuje pouzdanost, a može produžiti i vrijeme njihovog izvođenja. Naknadne intervencije moguće su jedino injektiranjem s krune brane. Uvjeti za korištenje dijela akumulacijskog jezera identični su onima u varijanti 2.

Pouzdanost rješenja sanacije uzvodnim ekranima u **varijantama 4a i 4c** je najmanja. Jedan od razloga je nova, kosa injekcijska zavjesa, koja se izvodi injektiranjem u stijeni, a prepac postupkom u zoni bivšeg uzvodnog zagata. Mjesta, koja kod njezinog izvođenja zahtijevaju posebnu pažnju sa spoj sa postojećom zavjesom, injektiranje vrlo propusnog površinskog pojasa stijene kod kojeg se ne mogu primijeniti veći pritisci injektiranja, te ostvarenje dovoljne vododrživosti uzvodnog zagata izvedenog od raznog kamenog materijala uključivo i materijal tuneleskog iskopa.

Osim toga na zavjesu pored horizontalne djeluje i vertikalna komponenta hidrostatskog pritiska, koja povećava mogućnost njezinog oštećenja, odnosno zahtijeva vrlo kvalitetnu izvedbu, koju bi zbog navedenih razloga bilo vrlo teško postići. Prema tome postoji realna opasnost, da dođe do procjeđivanja vode kroz zavjesu, uslijed kojeg bi uzvodni ekran pod djelovanjem hidrostatskog pritiska na njegovu donju plohu mogao biti oštećen.

Radi toga je potrebno izvesti besprijekornu drenažu uzvodnog ekrana, sa što manjim razmacima drenažnih cijevi, kako bi se oštećena mjesta mogla što lakše otkriti i obaviti popravke. Izvedba drenažnih odvoda kroz uzvodnu potpurnu zonu brane, nasutu od raznog kamenog materijala širine u stopi i do 80 m, može naići na niz problema, tako da je i to jedan od nedostataka ovog rješenja sanacije.

Pouzdanost izvedbe vododrživog ekrana od PEHD folije voća je u odnosu na ekran od armiranog betona, budući je zavarene spojeve folije lakše kvalitetno izvesti od spojeva armirano-betonskih ploča.

Naknadne intervencije tijekom eksploatacije na novoj injekcijskog zavjesi moguće su iz nove injekcijske galerije, a na uzvodnom ekranu direktnim pristupom uz prethodno sniženje vodostaja u akumulacijskom jezera, koliko to zahtijevaju lokacija i veličina oštećenja.

Korištenje akumulacijskog jezera tijekom sanacije moguće je do one visinske kote, do koje su završeni nova injekcijska zavjesa i galerija te uzvodni ekran.

ZAKLJUČAK

Na osnovu provedenog kvantitativnog i kvalitativnog vrednovanja, za daljnju razradu projektno dokumentacije kao najpovoljnije rješenje odabrano je rješenje sanacije brane sa dijafragmom od plastičnog betona izvedenoj u središnjem dijelu, te rekonstrukcijom lijevog i desnog kraja brane prema izvornom projektu sa glinenom jezgrom. Ovo rješenje omogućava kvalitetnu izvedbu vododrživog elementa brane, ne zahtijeva opsežne istražne radove za određivanje mjesta i stupnja oštećenja glinene jezgre, a u odnosu na rezultate kvantitativne analize, vrijednost doprinosa akumulacijskog jezera i HE Peruća proizvodnji električne energije u razmatranom 50 godišnjem razdoblju samo je 2% manja, od u tom pogledu najpovoljnije varijante 3.

Jedna od osnovnih karakteristika usvojenog rješenja jest, da su svi predviđeni radovi predstavljali istovremeno i vrlo detaljne istražne radove na osnovi kojih se sada, kada je brana ponovno u svojoj funkciji može ocijeniti njegova ispravnost i opravdanost u svim elementima.

Rekonstrukcija lijevog i desnog kraja brane kao i njezinog gorajeg dijela visine 5 do 10 m nije bila upitna, budući se na osnovi evidentnih oštećenja u obliku kratera i deformacija kruna, uzvodnog i nizvodnog pokosa moglo sa sigurnošću zaključiti, da je struktura materijala brane na ovim dijelovima dezintegrirana pa drugačiji način sanacije nije ni bio moguć.

Međutim dužina dionica rekonstrukcije lijevog i desnog kraja brane procijenjena na osnovi rezultata slijeganja brane pokazala se je ispravnom, jer na krajevima ovih dionica struktura materijala brane nije bila narušena, foto 2.

Nadalje, rekonstrukcija ovih dijelova brane potvrdila je pretpostavku u varijanti sanacije brane ponovnom izgradnjom njezinog jezgrovog dijela, da količina gline irvađene iz postojeće brane ne bi bila dovoljna za izgradnju nove jezgre, budući je za izgradnju brane na ovim dijelovima bilo moguće upotrijebiti oko 63% gline, dok je ostatak



Foto 1. Završni radovi na obnovi brane

dopremljen iz nalazišta udaljenog oko 10 km od brane, koje je pronađeno nakon dugotrajnog rekognosciranja i istraživanja terena.

S obzirom da je jezgra u donjim dijelovima brane šira ovaj bi omjer bio sigurno veći, međutim to ne opovrgava navedenu pretpostavku, jer treba imati na umu i apsolutnu količinu gline, koja bi u tom slučaju bila znatno veća, a time i poteškoće pronalaženja novog nalazišta.

Rekonstrukcija injekcijske galerije predstavljala je izuzetno težak i složen građevinski zahvat. Predviđeni tipovi obnove temeljeni na pretpostavljenoj klasifikaciji oštećenja pokazali su se ispravnim, no procjena opsega rekonstrukcije u odnosu na stupanj oštećenja bila je optimistična.

Pretpostavljeno je da je galerija potpuno uništena na oko 100 m ili oko 27% ukupne dužine, dok je na preostalih 265 m ili 73% dužine beton raspucan, ali je galerija generalno zadržala svoj unutrašnji oblik.

Međutim pokazalo se da je na oko 186 m ili 51% dužine galerija potpuno uništena, dok je na preostalih 179 m ili 49% dužine moguće galeriju rekonstruirati čeličnim lukovima, slojem dvostruko armiranog mlaznog betona i injektiranjem iz raspucane betonske obloge.

Značajno povećani opseg i praktično isključivo manualni rad zbog veoma ograničene mogućnosti primjene mehanizacije uzrokovali su produženje obnove galerije sa predviđenih 6 na 16 mjeseci.

Međutim ustanovljena oštećenja pokazala su da je bilo neophodno taj dio brane sanirati upravo rekonstrukcijom galerije, jer bi u suprotnom ovaj njezin najdelikatniji dio u odnosu na vododrživost kontaktnih ploha različitih materijala izloženih djelovanju najvećih hidrostatskih pritisaka uvijek predstavljao u velikoj mjeri nepoznanicu s aspekta uspješnosti sanacije čitavog objekta.

S tim u vezi bilo je potpuno opravdano razmatrati i podvarijantu s izvedbom jezgre od asfaltbetona.

Nužnost izvedbe vododrživih kontaktnih ploha došla je do izražaja već prilikom izvedbe dijafragme, kada je uslijed narušenog spoja glinene jezgre i temeljne stijene i neinjektiranog spoja galerije po vanjskom opsegu došlo do prodiranja isplake iz rova za dijafragmu u galeriju.

Nadalje, injekcijska je galerija obnovljena na 79% dužine brane u području najvećih hidrostatskih pritisaka. Nakon završene rekonstrukcije lijevog i desnog kraja brane te izvedene dijafragme, kod vodostaja u jezeru na koti 353,00 m n.m. pri kojem hidrostatski pritisak na najvišem dijelu brane iznosi 85% maksimalnog, procjedne količine vode u galeriji procijenjene su na oko 0,3 l/s. Na osnovi ovog pokazatelja može se sa dovoljnom sigurnošću zaključiti, da je obnova galerije provedena kvalitetno.

Osim toga ovime je potvrđena jedna od osnovnih postavki i elemenata rješenja, da taj dio brane treba biti uspješno saniran, ali i stalno dostupan kontroli i mogućnosti intervencije.

Jezgra brane je na središnjem najvišem dijelu na oko 59% ukupne dužine sanirana izvedbom dijafragme od plastičnog betona.

Ispravnost ovog elementa rješenja potvrđena je injektiranjem jezgre na dijelu izvedbe dijafragme, koje je provedeno s ciljem zapunjavanja pukotina i šupljina u glini nastalih kao posljedica miniranja, a u svrhu sprečavanja naglog gubitka isplake i povećanja otpornosti na smicanje stranica rova dijafragme.

Na osnovi rezultata injektiranja može se zaključiti, da su oštećenja jezgre vrlo neujednačena i disperzirana kako po dužini tako i po visini brane. Odstupanja prosječnih utrošaka suspenzije u dvije susjedne bušotine kojih je razmak 1,4 m iznose i do 427 l injekcijske suspenzije ili oko 150 kg suhe tvari po metru bušotine, a po dionicima injektiranja u istoj bušotini i do 2.300 l suspenzije ili 811 kg suhe tvari po metru injektirane dionice.

Ovi podaci nedvojbeno pokazuju da je jedino kontinuiranim vododrživim elementom, kakav je dijafragma bilo moguće pouzdano i s potrebnom sigurnošću sanirati jezgru brane. Ovaj zaključak potvrđuje i naprijed naveden podatak o procjednoj količini vode u galeriji od 0,3 l/s.

S obzirom da je injektiranje predstavljalo u određenom obliku i opsega i istražne radove o oštećenjima jezgre, na osnovi dobivenih rezultata može se potvrditi i zaključak naveden u kvalitativnoj usporedbi varijanti, da bi sanacija jezgre na ovom dijelu brane samo injektiranjem bila manje pouzdana sa potrebom stalnog praćenja ponašanja brane posebno u odnosu na vododrživost, te da bi vjerojatnost naknadnih intervencija bila veća.

Tijekom izvođenja sanacijskih radova vodni valovi Cetine s najvećim protokom od oko 270 m³/s uspješno su akumulirani u jezeru i evakuirani kroz turbine hidroelektrane pri čemu se vodostaj u jezeru nije značajno povisio iznad kote 330,00 m n.m., koja je određena na osnovi najniže kote iskopa brane, sigurnosti rada u galeriji u odnosu na količine procjeđivanja, te mogućnosti rada proizvodnih grupa hidroelektrane. Vodu koja je dotjecala u galeriju, a najveća količina kod vodostaja oko 330,00 m n.m. iznosila je približno 130 l/min, bilo je moguće crpkama evakuirati iz galerije, te su se radovi u tom pogledu mogli odvijati bez poteškoća.



Foto 2. Iskop lijevog kraja brane

Dovršanjem dijafragme maksimalni vodostaji punjenja jezera su korigirani u smislu povišenja. Pri tom se vodilo računa o mogućnosti evakuacije vodnih valova Cetine kroz turbine hidroelektrane i na taj način njihovog energetskog iskorištenja, zaštiti od poplave nizvodnog Hrvatačkog i Sinjskog polja, te neometanog odvijanja radova na brani.

U skladu s tim određen je maksimalni vodostaj punjenja jezera u srpnju i kolovozu 1995 godine do koje 353,00 m n.m., pri kojoj volumen jezera iznosi oko 410 mil. m³ ili oko 73% korisnog volumena.

Na taj je način omogućeno da 2 mjeseca prije završetka sanacijskih radova na brani jezero Peruća u velikoj mjeri ponovno počne obavljati svoju osnovnu funkciju, regulaciju protoka rijeke Cetine u ovom izuzetno značajnom hidroenergetskom sustavu.

LITERATURA

- [1] Dadić, V; Grbec B; Measurements of the water flow and temperature in the Peruća Dam reservoir; International Workshop on Dam safety Evaluation, Gründelwald, 1993
- [2] Salković A; Dujmić D; Geophysical Investigation at the Peruća Dam; International Workshop on Dam Safety Evaluation, Gründelwald 1993
- [3] Nonveiller E; The Peruća Dam after the explosion, International Workshop on Dam Safety Evaluation, Gründelwald 1993
- [4] Lombardi G; Deere D; Grouting design and control using the GIN principle; Water Power and Dam Construction, June 1993
- [5] Vaughan P.R.; Kluth D.J.; Leonard M.W.; Pradoura H.H.M.; Cracking and erosion of the rolled clay core of Balderhead Dam and the remedial works adopted for its repair, X Congress ICOLD, Q 36, Montreal 1970
- [6] Chen Y.J.; Grouting for sealing the cohesive fills of embankment dams, XIV Congress ICOLD, Q 55, Rio de Janeiro 1982
- [7] Strobl T; Schmid R.; The behaviour of dams with asphaltic concrete cores during impounding; Water Power and Dam Construction, March 1993
- [8] Valstad T; Selnes P.B; Nadim F; Aspen B; Seismic response of a rockfill dam with an asphaltic concrete core, Water Power and Dam construction, April 1991

- [9] Hoeg K.; An evaluation of asphaltic concrete cores for embankment dams, Water Power and Dam Construction, July 1992
- [10] Fenoux G.Y.: Ecrans en paroi realises apres edification des remblais. Nouveaux outillages, nouvelles methodes pour travaux neufs ou travaux de reparation, XVI congres CIGB, Q 61, San Francisco 1988
- [11] Graybill K., Levallois J.: Construction of a cutoff wall with the hydrofraise through the core of Mud Mountain Dam (USA); XVII congress ICOLD; Q 66, R 49; Vienna 1991
- [12] Filling materials for watertight cut off walls - Bulletin 51 ICOLD 1985
- [13] Rockfill dams with concrete facing - State of the art, Bulletin 70, ICOLD 1989
- [14] Sanacija brane Peruća - Program istražnih radova, Elektroprojekt d.d. Zagreb, ožujak 1993
- [15] Sanacija brane Peruća - Varijanta rješenja sanacije, Elektroprojekt d.d. Zagreb, lipanj 1993

PROJEKT SANACIJE BRANE PERUĆA

ZVONIMIR SEVER, dipl.ing.građ.

Projektant

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d.

ZAGREB

SAŽETAK

Rad na projektu sanacije u ratu oštećene brane Peruća predstavljao je za sve sudionike veliki izazov budući da do tada u svijetu nisu postojala iskustva u pogledu sanacije takvih u ratu oštećenih objekata.

Projekt sanacije je izrađen u skladu s najsuvremenijom inženjerskom praksom i važećim propisima. To se prije svega odnosi na provjeru seizmičke stabilnosti brane i mogućnost evakuacije vodnog vala 10.000 godišnjeg povratnog razdoblja. Zbog toga je, nakon provedenih analiza, brana povišena za 1,5 m u odnosu na originalnu branu. Istovremeno je i maksimalni radni vodostaj u akumulacijskom jezeru povišen za 1,5 m i na taj način se dobilo dodatnih $24 \times 10^6 \text{ m}^3$ vode što predstavlja povećanje oko 4%.

Osnovna koncepcija sanacije brane je da se uklone i u potpunosti obnove krajevi i gornji dio brane i kruna u visini 5-10 m, a da se u središnji dio brane ugradi vodonepropusna dijafragma koja treba preuzeti funkciju oštećene glinene jezgre.

U ovom članku je dat sažeti prikaz realizacije projekta i primjenjenih tehničkih rješenja.

UVOD

Izrada glavnog projekta sanacije u ratu oštećene brane Peruća počela je u lipnju 1993. godine, odmah nakon usvajanja tehničkog rješenja sanacije brane. Usvojeno tehničko rješenje sanacije predviđalo je da se uklone krajevi i gornji dio brane u visini 5-10 m i u potpunosti obnove, a da se u središnji dio brane ugradi vodonepropusna dijafragma od plastičnog betona koja treba preuzeti funkciju oštećene glinene jezgre. Također je bilo predviđeno da se obnovi injekcijska galerija brane koja je bila teško oštećena i djelomično zatrpana te stavi ponovo u funkciju.

Samo projektiranje predstavljalo je veliki izazov za sve sudionike, budući da do tada u svijetu nisu postajala, a ne postoje ni danas, iskustva u pogledu sanacije u ratu oštećenih takvih ili sličnih objekata.

Poteškoću u početku rada na glavnom projektu predstavljao je nedostatak odgovarajućih podataka o obimu i naravi oštećenja u tijelu brane. Istražni radovi koji su trebali dati podatke o oštećenjima, bili su planirani za travanj 1993, ali zbog neposredne ratne opasnosti nisu mogli biti izvedeni. Izvedeni su, ali u suženom obimu, tek tijekom svibnja i lipnja 1994. godine kada je rad na glavnom projektu bio u punom zamahu. Treba napomenuti da su ipak određeni podaci o stanju glinene jezgre dobiveni nešto prije, tijekom sanacije injekcijske galerije koja je počela u kolovozu 1993. godine.

Tijekom projektiranja nedostajao je, osim podataka o obimu i naravi oštećenja, veći dio projektne dokumentacije originalne brane, dok projekt izvedenog stanja za originalnu branu nije nikad bio izrađen. Da bi dobio potpuniji uvid u konstrukciju originalne brane, naročito u pogledu onoga kako je i uz koje tehničke uvjete originalna brana sagrađena, koristile su se informacije dobivene od sudionika na projektiranju i gradnji originalne brane.

Spomenuti nedostatak podataka uvjetovao je da je kod projektiranja trebalo procijeniti stupanj i narav oštećenja te ukupno stanje, posebno glinene jezgre, i na temelju takve procjene donositi pojedina tehnička rješenja. Treba naglasiti da su nakon uklanjanja krajeva i gornjeg dijela brane te provedenih istražnih radova u 1994. godini, u najvećoj mjeri potvrđene pretpostavke o obimu i vrsti oštećenja na temelju kojih su donošena tehnička rješenja.

Budući da se nastojalo branu i akumulacijsko jezero Peruća što prije dovesti u funkciju, prvenstveno zbog njezinog ključnog značaja u hidroenergetskom sustavu rijeke Cetine, paralelno s projektiranjem tekli su i radovi na sanaciji. Zbog toga je i proces projektiranja bio organiziran tako, da gradilište može normalno raditi bez zastoja, a projektna dokumentacija podijeljena prema dijelovima objekta koji predstavljaju zasebnu cjelinu i koji su se mogli zasebno graditi.

Takoder se zbog vrlo loših energetskih prilika u to vrijeme u Dalmaciji, za cijelo vrijeme radova na sanaciji, nastojalo održavati u jezeru vodu na nivou oko 325 m n.m., što je omogućavalo rad hidroelektrane Peruća.

Osnovni pristup kod projektiranja bio je, da se bez obzira što je brana prije oštećenja vrlo uspješno funkcionirala preko 30 godina, projekt nove sanirane brane izradi prema najsuvremenijoj inženjerskoj praksi i u skladu s važećim propisima. To se prvenstveno odnosi na provjeru scizmičke stabilnosti brane, mogućnost evakuacije vodnog vala 10.000 povratnog perioda i ugradnju najsuvremenijeg sustava za tehnička promatranja brane.

ISTRAŽNI RADOVI

Za potrebe dobivanja podataka za projektiranje sanacije brane Peruća izvedeni su istražni radovi koji su trebali dati odgovor na sljedeća pitanja:

- kakvo je stanje oštećene brane Peruća uključujući, temeljno tlo i injekcijsku zavjesu;
- kakve su seizmološke i seizmotektonske značajke lokacije brane;
- kolike su velike vode na profilu brane.

Za ispitivanje stanja brane, temeljnog tla i injekcijske zavjese provedeni su sljedeći istražni radovi:

- Kontinuirano mjerenje slijezanja tijela brane
- Geofizička cross-hole ispitivanja između bušotina kroz jezgru i dio temeljnog tla te karotazna mjerenja prirodne gama radioaktivnosti
- Geofizička ispitivanja polarnom metodom uzduž brane i na jednom poprečnom profilu
- Geotehnička bušenja kroz jezgru i dio temeljnog tla, s kontinuiranim jezgrovanjem i vađenjem neporemećenih uzoraka, foto 1 i 2
- Pokusi statičkom penetracijskom sondom
- Laboratorijsko utvrđivanje osnovnih parametara materijala jezgre
- Mjerenje gubitaka vode u bušotinama u temeljnoj stijeni i glinenoj jezgri
- Probno injektiranje glinene jezgre i temeljne stijene
- Kontinuirana kontrola gubitaka vode kroz injekcijsku zavjesu

Za utvrđivanje seizmoloških i seizmotektonskih značajki lokacije izrađena je posebna studija u kojoj su dati osnovni projektni seizmički parametri: maksimalni intenzitet potresa i maksimalna akceleracija.

Za potrebe utvrđivanja velikih voda rijeke Cetine na profilu brane također je izrađena posebna hidrološka studija.

Treba napomenuti da je u studiji bilo moguće, u odnosu na originalni projekt kada nije bilo dovoljno kvalitetnih mjernih podataka, izvršiti kvalitetniju hidrološku obradu jer se raspolagalo s kvalitetnim mjernim podacima sakupljenim u periodu od završetka gradnje originalne brane do danas.

Navedeni istražni radovi obrađeni su u posebnim člancima u ovoj knjizi, pa se na njih ovdje nećemo posebno osvrnuti.



Foto 1. Geotehnički istražni radovi - bušenje jezgre i temeljne stijene



Foto 2. Izbušena jezgra

Osim spomenutih istraţnih radova provedeni su istraţni radovi na potencijalnim nalazištima gline koji su takoder predmet posebnog članka u ovoj knjizi. Nalazište kamena nije posebno ispitano, budući da je kamen vađen iz istog kamenoloma na desnoj strani akumulacijskog jezera oko 200 m uzvodno od brane, iz kojeg je vađen i za originalnu branu.

Također je osim naprijed navedenih istraţnih radova provedeno i niz istraţnih radova za rješavanje nekih manjih problema.

ANALIZA STABILNOSTI BRANE

U okviru provjere stabilnosti sanirane brane provedene su slijedeće analize:

- analiza statičke stabilnosti brane
- analiza seizmičke stabilnosti brane.

Analiza statičke stabilnosti brane

Proračun statičke stabilnosti brane provedena je za fazu neposrednog završetka izgradnje brane i fazu eksploatacije brane. Za fazu neposrednog završetka izgradnje proračun je proveden sa parametrima čvrstoće u totalnim naponima iz kombinirane envelope sloma. Za fazu eksploatacije proračun je proveden sa parametrima čvrstoće u efektivnim naponima za tri slučaja opterećenja hidrostatikim pritiskom:

- vodostaj na koti 362,17 m n.m. - poplavlji
- vodostaj na koti 343,00 m n.m. - težište jezera
- vodostaj na koti 361,50 m n.m. - maksimalni radni

Proračun stabilnosti brane u statičkim uvjetima proveden je kompjutorskim programom SSTAB1 (Wright, 1974.) zasnovanom na Spencerovoj metodi analize stabilnosti kosina metodom granične ravnoteţe (Spencer, 1967).

U proračunu stabilnosti pretpostavljeni su slijedeći parametri čvrstoće za pojedine materijale:

a) glina

- zapreminska težina $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- parametri čvrstoće u efektivnim naponima određeni su prema Bowlesu (1982) i Goodwina (1978) za granicu tečenja 60% i indeks plastičnosti 40%:
 - kohezija $c' = 5 \text{ kN/m}^2$, kut trenja $\varphi' = 20^\circ$
- parametri čvrstoće u totalnim naponima, nedrenirana čvrstoća
 - kohezija $c_u = 40 - 60 \text{ kN/m}^2$, kut trenja $\varphi_u = 0^\circ$

b) kameni nasip

- zapreminska težina $\gamma = 21 \text{ kN/m}^3$
- parametri čvrstoće u efektivnim i totalnim naponima:
 - kohezija $c' = 0 \text{ kN/m}^2$
 - kut trenja $\varphi' = 45^\circ$ za normalne napone 0-200 kN/m^2
 - kut trenja $\varphi' = 41^\circ$ za normalne napone veće od 200 kN/m^2

c) filtri

- zapreminska težina $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- parametri čvrstoće u efektivnim i totalnim naponima:
 - kohezija $c' = 0 \text{ kN/m}^2$
 - kut trenja $\varphi' = 35^\circ$

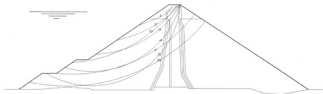
d) zaglinjeni kamen u kruni brane

- zapreminska težina $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$
- parametri čvrstoće:
 - kohezija $c' = 0 \text{ kN/m}^2$
 - kut trenja $\varphi' = 38^\circ$

Proračunom dobiveni faktori sigurnosti za sve klizne plohe su veći od minimalno potrebnih. Faktori sigurnosti za pojedine slučajeve prikazani su na tablicama 1 i 2 dok su potencijalne klizne plohe prikazane na slici 1.

	1	2	3	4	5	6	7	8
Kraj izgradnje								
Slučaj I	1,52	1,62	1,60	1,97	2,30	1,56	1,83	2,12
Slučaj II	1,52	1,62	1,60	1,99	3,32	1,55	1,85	2,14
Faza eksploatacije								
Vodostaj I	1,52	1,62	1,61	1,83	-	1,54	1,92	2,31
Vodostaj II	1,52	1,73	2,33	3,56	4,62	-	3,49	4,25
Vodostaj III	-	-	-	-	16,75	16,27	12,98	13,45

Tablica 1 Faktori sigurnosti - uzvodne klizne plohe



Slika 1. Uzvodne i nizvodne klizne plohe

	1	2	3	4	5	6
Kraj izgradnje						
Slučaj I	1,72	1,67	1,90	1,60	1,77	1,91
Slučaj II	1,72	1,67	1,91	1,59	1,92	1,92
Faza eksploatacije						
Vodostaj I	1,72	1,67	1,90	1,59	1,81	1,96
Vodostaj II	1,72	1,67	1,90	1,59	1,81	1,97
Vodostaj III	1,71	1,64	1,89	1,57	1,77	1,96

Tablica 2 Faktori sigurnosti - nizvodne klizne plohe

Slučaj I Dubina 0,00 - 5,00 m - parametri čvrstoće za dreniranu glinu
Dubina veća od 5,00 m - parametri čvrstoće za nedreniranu glinu

Slučaj II Dubina 0,00 - -7,50 m - parametri čvrstoće za dreniranu glinu
Dubina veća od 7,50 m - parametri čvrstoće za nedreniranu glinu

Vodostaj I Vodostaj na koti 362,20 m n.m.

Vodostaj II Vodostaj na koti 343,00 m n.m.

Vodostaj III Vodostaj na koti 361,50 m n.m.

Analiza seizmičke stabilnosti brane

Za seizmički proračun stabilnosti brane primjenjena je metoda Newmarkove metode ključeg bloka. U okviru seizmičkog proračuna izvršeni su slijedeći proračuni:

- Proračun seizmičkog odziva brane postupkom Ambraseys i Sarma (1967) pomoću programa SHAKE (Schnabel, Lysmer, Seed 1972).
- Proračun kritičnih vodoravnih ubrzanja koja izazivaju jedinične faktore sigurnosti na potencijalnim kliznim plohama u tijelu brane modificiranim programom SSTAB1.
- Proračun trajnih pomaka kliznih tijela Newmarkovom metodom ključeg bloka (Newmark 1965, Seed 1979) na osnovu rezultata proračuna seizmičkog odziva brane i kritičnih vodoravnih ubrzanja kao podloge za procjenu trajnih deformacija brane.

Seizmičko opterećenje za lokaciju brane određeno je studijom Geofizičkog zrova "Andrija Mohorovičić" Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 1994

Maksimalna očekivana ubrzanja osnovne stijene određena su determinističkim postupkom za tri tipa potresa:

- potres neposredno na lokaciji brane, magnituda $M = 5,7$, maksimalno ubrzanje $a_{\max} = 0,160$ g, maks. intenzitet $I_{\max} = 8,0^\circ$ MCS
- bliski potres, epicentralna udaljenost - 7 km, magnituda $M = 6,50$, maksimalno ubrzanje $a_{\max} = 0,286$ g, maks. intenzitet $I_{\max} = 8,6^\circ$ MCS
- udaljeni potres, epicentralna udaljenost - 21 km, magnituda, $M = 6,6$, maksimalno ubrzanje $a_{\max} = 0,197$ g, maks. intenzitet $I_{\max} = 7,80^\circ$ MCS.

Probabilističkim postupkom određena je najveća vrijednost seizmičkog ubrzanja $a_{\max} = 0,22$ g za povratni period $T = 1000$ god. potres, S2, dok za projektni potres, S1, maksimalno ubrzanje iznosi $a_{\max} = 0,17$ g.

Prema mnogim propisima uobičajeno je provjeriti seizmičku stabilnost građevina i za projektni potres. Za nasutu branu koja ima zadovoljavajući stupanj stabilnosti obzirom na maksimalni mogući potres, nije uobičajeno provoditi posebne proračune za projektni potres. Stoga je za daljnje proračune odabrana najveća vrijednost $a_{\max} = 0,29$ g, određena determinističkim postupkom za bliski potres.

Rezultati proračuna pokazali su da su statički faktori sigurnosti veći od 1,5 i kreću se do 2,53 za klizne plohe na uzvodnoj strani i 2,05 za klizne plohe na nizvodnoj strani. Izuzetak je jedna vrlo plitka klizna ploha na nizvodnom dijelu brane, gdje je statički faktor sigurnosti 1,47.

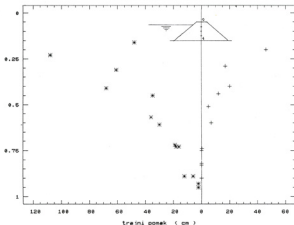
Kritična ubrzanja, kod kojih je faktor sigurnosti 1,0, kreću se od 0,1 g do 0,28 g za klizne plohe na uzvodnoj strani, i 0,22 g do 0,63 g za klizne plohe na nizvodnoj strani brane.

Vrijednosti trajnih pomaka po kliznim ploham kreću se od 0 do 46 cm na nizvodnoj strani te od 2 do 108 cm na uzvodnoj strani brane, sl. 2.

Na osnovu rezultata proračuna izvedeni su slijedeći zaključci o seizmičkoj stabilnosti brane.

- Pri djelovanju najjačeg mogućeg potresa maksimalnog ubrzanja $a_{\max} = 0,29$ g moguća je pojava oštećenja tijela brane uslijed trajnih pomaka potencijalnih kliznih masa.
- Ocjenjuje se da globalna stabilnost brane neće biti narušena uslijed prelijevanja brane jer maksimalno očekivano trajno slijezanje krune brane iznosi oko 60 cm i postoji dovoljna slobodna visina između maksimalnog radnog nivoa jezera i krune. Eventualna oštećenja krune brane ne smatraju se značajnijim za globalnu stabilnost.

Brana Peruca - seizmička analiza
UZVODNA I IZVODNA STRANA



Slika 2. Trajni pomaci po kliznim plohama

- Potencijalni pomaci kliznih masa u gornjoj polovici brane mogu izazvati lokalna oštećenja pokosa i pukotine u tijelu brane, no ocjenjuje se da planirana izvedba filtera s obje strane jezgre, kao i nepropasna dijafragma u središnjem dijelu, u dovoljnoj mjeri sprečavaju eventualne proboje i procjeđivanje vode kroz jezgru.
- Seizmička instrumentacija i praćenje ponašanja brane u skladu s propisima od osobite su važnosti. Ukoliko se tijekom eksploatacije pojave potresi s ubrzanjima većim od $a_{\text{vss}} = 0,2 \text{ g}$ na osnovnoj stijeni, treba sniziti ili ispustiti vodu iz jezera te obaviti odgovarajući pregled brane s naglaskom na osjetljivu uzvodnu kosinu.

EVAKUACIJA VELIKIH VODA

Kod dimenzioniranja preljeva sanirane brane kao mjerođavan uzet je vodni val 10.000 godišnjeg povratnog razdoblja.

Za potrebe ovog projekta proveden je proračun vodnih valova za različita povratna razdoblja. Rezultati proračuna prikazani su u tablici 3. Svi rezultati u tablici su zaokruženi na punu brojku, tako da stvarna vrijednost protoka 10.000 g. V.V. s kojom su provedeni svi proračuni iznosi 509,60 m³/sec.

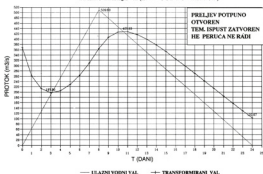
Povratno razdoblje (god.)	Qmax (m3/s)	
	VLAŽNO RAZDOBLJE	SUŠNO RAZDOBLJE
	X - V (mjesec)	VI - IX (mjesec)
2	192	67,0
5	232	98,6
10	259	120
20	285	140
25	294	146
50	319	166
100	344	185
1000	427	249
10000	510	314

Tablica 3 Maksimalni protoci vodnih valova Cetine različitih povratnih razdoblja vlažnog i sušnog dijela godine

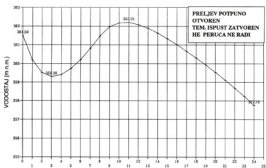
Za potrebe određivanja mjerođavnog protoka na preljevu i dimenzioniranja preljeva provedena je simulacija transformacije vodnog vala 10.000 godišnjeg povratnog razdoblja prilikom nailaska u akumulacijsko jezero na maksimalni radni vodostaj na koti 361,50 m n.m. Maksimalni radni nivo određen je za nova kotu krune brane koja je 1,5 m viša od prijašnje. (Vidi slijedeće poglavlje)

Analiza je pokazala da se vodni val 10.000 godišnjeg povratnog razdoblja može u potpunosti evakuirati preko preljeva. Pri tome se vodostaj u jezeru diže sa kote 361,50 m n.m. na kotu 362,20 m n.m. uz maksimalni protok od 427,93 m³/s na koji je dimenzioniran i brzotok. Trajanje ovako velikog protoka iznosi oko jedan dan. Treba naglasiti da se maksimalni ulazni protok vala od 509,60 m³/s smanji pri izlazu na 427,93 m³/s.

TRANSFORMACIJA VODNOG VALA
PREKO PRELJEVA (10000 GOD.POV.PERIOD)



VODOSTAJI TRANSFORMIRANOG VODNOG VALA
U AKUM. JEZERU (10000 GOD. POV. PERIOD)



Slika 3. Evakuacija vodnog vala 10.000 god. povratnog perioda
kroz akumulacijsko jezero

Pretpostavka da samo preliv sudjeluje u evakuaciji vodnog vala je na strani sigurnosti, a pretpostavlja malo vjerojatnu mogućnost zaglavljenja zapornice temeljnog ispusta, nemogućnost puštanja vode kroz turbine i ujedno nailazak ekstremno velikog vodnog vala.

Na slici 3 prikazani su rezultati analize transformacije vodnog vala 10.000 godišnjeg povratnog perioda i odgovarajući vodostaji u akumulacijskom jezeru.

ODREĐIVANJE KOTE KRUNE BRANE

Originalna brana imala je krunu na koti 363,00 m n.m., uzvodni pokos 1:1,45, nizvodni 1:1,5, radni nivo vode u jezera na koti 360,00 m n.m. i maksimalni nivo vode u akumulacijskom jezeru na koti 361,2 m, sl. 4.

U okviru rada na projektu sanacije oštećene brane Peruća provedeni su između ostalih i proračuni koji se odnose na provjeru stabilnosti brane u uvjetima djelovanja seizmičkih opterećenja na brani i evakuaciju 10.000 god. velikih voda kroz postojeće evakuacijske objekte, a kojih u originalnom projektu brane nije bilo.

Razlog što u originalnom projektu nije proveden proračun stabilnosti brane u uvjetima djelovanja seizmičkih sila leži u činjenici da u to vrijeme to nije bila praksa, a i mogućnost proračuna je bila, zbog toga što tada nisu postojala savremena elektronička računala, prilično ograničena.

S druge strane današnji kriteriji za određivanje kote krune brane promijenili su se u odnosu na tada važeće.

Tri su osnovna elementa koja pri tome imaju presudan utjecaj: evakuacija vodnog vala 10.000 god. povratnog razdoblja, stabilnost brane pri djelovanju seizmičkih sila i visina penjanja valova od vjetra na pokos brane.

Hidrološkom analizom vremenskih serija prirodnih dnevnih protoka dotjecanja u akumulacijsko jezero Peruća za razdoblje od 1951. do 1986. godine definiran je hidrogram 10.000 god. vodnog vala kojeg su osnovne karakteristike: $Q_{max} = 510 \text{ m}^3/\text{s}$ i $T = 24$ dana. Simulacija njegove evakuacije kroz akumulacijsko jezero pokazala je, da se vodostaj u jezeru sa kote maksimalnog radnog vodostaja 360,00 m n.m. podigao na kotu 362,17 m n.m., a protok preko prelijeva iznosi 424,93 m³/s. U usporedbi sa projektiranim stanjem povišenje vodostaja iznosi 0,97 m, a povećanje protoka 84,93 m³/s.

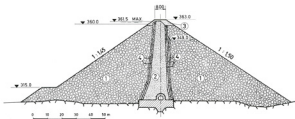
Seizmološkim i neotektonskim istraživanjima definirana je akceleracija maksimalnog mogućeg potresa na lokaciji brane u veličini od $a = 0,29 \text{ g}$. S ovim podatkom provedena je provjera

PODACI IZ ORIGINALNE BRANE

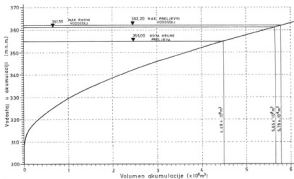
- MAX. VODOSTAJ	361,20 m n.m.
- MAX. RACNI VODOSTAJ	360,00 m n.m.
- VOLUMEN JEZERA ROK	541 mil. m ³
- KOTE 360,00 m n.m.	874.097 m ³
- VOLUMEN BRANE	63 m
- NAJVEĆA VISINA	

LEGENDA

1. KAMENI NASIP
2. GLINENA JEZGRA
3. ZAGLUNJENI KAMENI MATERIJAL
4. FILTARSKI SLOJEVI



Slika 4. Karakteristični poprečni presjek originalne brane



Slika 5. Krivulja volumena akumulacijskog jezera Peruća

stabilnosti brane, koja je pokazala, da djelovanje seizmičkih sila uzrokuje slijezanje krune brane oko 0,6 m.

Analiza brzine, smjera i učestalosti vjetrova pokazala je da najviše valove generira vjetar iz smjera NW-SE kojeg brzina iznosi 135 km/sat, a razmah 1,43 km. Visina vala iznosi 1,40 m, dužina 19 m, a za visinu penjanja na pokos brane 0,80 cm.

Prema važećim kriterijima u seizmičkim aktivnim područjima krunu brane treba projektirati na koti 2,0 - 2,5 m višoj od kote vodostaja poplavnog vala. Prema tome, kruna brane Peruće treba biti između kota 364,17 m n.m. i 364,67 m n.m., što u odnosu na projektiranu i izvedenu kotu krune originalne brane od 363,00 m n.m. predstavlja povišenje od 1,17 do 1,67 m.

Prema drugom kriteriju, kota krune brane definira se tako, da se na vodostaj poplavnog vala 10.000 god. povratnog razdoblja dodaje visina penjanja vala od vjetrova i slobodna visina u veličini od min. 1 m, što za branu Peruću iznosi 363,97 m n.m.

Prema tome za kotu krune brane Peruće mjerodavan je seizmički kriterij prema kojem kruna brane treba biti između kote 364,17 m n.m. i 364,67 m n.m. Slijezanje brane nakon dovršenja procijenjeno je na 50 cm, tako da je preliminarno usvojena izvedba kote krune 365,00 m n.m., odnosno 2 m viša od kote krune u originalnom projektu, s time da se prema krajevima kota krune postepeno smanji na 364,5 m n.m.

Budući da je zbog seizmičkog kriterija bilo potrebno dići krunu brane minimalno za 1,5 m, dodatno je razmatrana mogućnost povišenja normalnog radnog vodostaja u akumulacijskom jezeru, čime bi se dobile i dodatne količine vode. Simulacijom evakuacije 10.000 g. velikog vodnog vala u situaciji kada on nailazi na nivo vode na koti 361,50, pokazalo se da se vodostaj digao na kotu 362,20 m n.m., sl. 3. To u odnosu na max. nivo vode od 362,17 m n.m. u situaciji kada 10.000 g. veliki vodni val nailazi na maksimalni radni vodostaj na koti 360,00 m n.m. predstavlja povećanje od samo 3 cm.

Budući da nivo vode na koti 362,20 m n.m. zadovoljava sve kriterije da kruna brane bude na koti 364,50 m n.m., odlučeno je da se maksimalni radni vodostaj u akumulacijskom jezeru poviši za 1,5 m, od prijašnjih 360 m n.m. na 361,50 m n.m. Na taj se način dobio dodatni akumulacijski prostor za dodatnih $24 \times 10^6 \text{ m}^3$ vode što predstavlja povećanje za cca 4% u odnosu na prijašnje stanje, sl. 5.

ODABIRANJE NAČINA POVIŠENJA BRANE

Nakon što je analizom utvrđeno da je neophodno povisiti krunu brane za 1,5 - 2,0 m prišlo se razmatranju načina kako to ostvariti.

Razmatrane su dvije mogućnosti:

- povišenje nasipavanjem s uzvodne strane postojeće brane
- povišenje nasipavanjem s nizvodne strane postojeće brane

Kod toga treba naglasiti da se povišenjem brane do projektne kote krune 364,50 m n.m. i izvedbene kote 365,00 m n.m. uopće ne mijenja osnovna koncepcija sanacije brane.

Povišenje brane nasipavanjem s uzvodne strane

Za nasipavanje s uzvodne strane postojeće brane potrebna je širina u horizontalnom smislu od 7,5 m. Od toga 6 m je potrebno iz geometrijskih razloga pod uvjetom da se zadrži širina krune brane 8 m. To je ujedno i širina koja osigurava normalan rad i kretanje strojeva za vrijeme izvođenja radova, dok je širina od 1,5 m potrebna za oblogu od krupnog kamena.

Nasipavanje bi se izvodilo valjanjem u slojevima debljine cca 50-100 cm uz izvedbu obloge od kamenog nabačaja. Kod toga je vodu u akumulacijskom jezeru trebalo ispustiti do dna, ispod tada dozvoljene kote 330,00 m n.m., odnosno minimalnog radnog vodostaja HE Peruća od 325,00 m n.m. Navedeni vodostaji mogli bi se ostvariti tek nakon što nasipavanje bude izvedeno 5 m više, što je u pogledu trajanja radova za kotu 335,00 m n.m. iznosilo cca 2,5 mjeseca. Za to vrijeme hidroelektrana ne bi mogla raditi.

Poseban bi problem predstavljalo ispunjavanje rupa između pojedinih blokova postojeće kamene obloge što bi se moralo izvesti utiskivanjem kamenog materijala pod pritiskom vode.

Ukupno je bilo potrebno nasipati cca 130.000 m³ materijala.

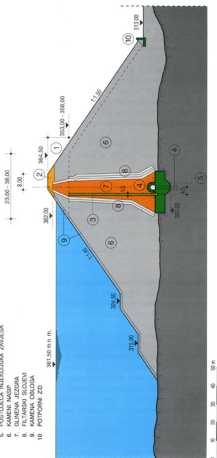
Povišenje brane nasipavanjem s nizvodne strane

Za nasipavanje s nizvodne strane postojeće brane dovoljna je širina 6 m što predstavlja minimalnu širinu u geometrijskom i tehnološkom smislu.

Osnovni problem kod nasipavanja s nizvodne strane predstavljala je blizina rasklopišta HE Peruća, tj. zadiranje nožice brane u samo rasklopište. Zbog toga je predviđena izgradnja potpornog zida visine 5,0 m koji neznatno zadire u rasklopište.

LEGENDA

1. REKONSTRUKCIJA GORNJEG DIJELA BRANE (5-10 m)
2. ZAGLAVLJENI KAMENI MATERIJAL
3. DIAPHRAGMA OD PLASTIČNOG BETONA
4. INJEKCIJE
5. POSTOJEĆA INJEKCIJSKA ZAVJESA
6. KAMENI NAGIP
7. GLINENA JEZORA
8. FILTARSKI SLOJEVI
9. KAMENA OBLIČA
10. POTPORNI ZID



Slika 6. Karakteristični poprečni presjek sanirane brane Peruća

Takvo rješenje zahtijevalo je samo premještanje tri ormarića malog otpora i rekonstrukciju jednog betonskog stupa, tj. njegovo temeljenje na potporanom zidu. Također je bilo potrebno izvesti zaštitu kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta te produživanje pristupnih hodnika u injekcijsku galeriju za 6 m.

U tom slučaju za cijelo vrijeme trajanja radova nivo vode u akumulacijskom jezeru mogao se održavati na nivou 330,00 m n.m. Ocijenjeno je da će rad na potporanom zidu u rasklopištu uz dobru organizaciju trajati oko mjesec dana. Prekid rada hidroelektrane bez mogućnosti ulaska u rad bio bi samo u periodu kada će se raditi na dijelu zida koji direktno zadire u rasklopište, i to ne duže od 15 dana.

Za nasipavanje s nizvodne strane potrebno bi bilo cca 80.000 m³ materijala, volumen zaštitnog zida u rasklopištu iznosi cca 700 m³ betona i zaštitnog zida oko kućice pomoćnog zatvarača 350 m³ betona, sl. 6 i 9.

Odabrano rješenje

Analizom razmatranih varijanti uključujući i proračun troškova došlo se do slijedećih zaključaka.

Prednosti nasipavanja s nizvodne strane u odnosu na nasipavanje s uzvodne strane bile su slijedeće:

- a) Nizvodno potporono tijelo brane se povećava što je povoljnije za stabilnost brane.
- b) Količina materijala koja treba nasuti je cca 55-60% manja.
- c) Nisu potrebni veliki kameni blokovi za oblogu.
- d) Izbjegava se potreba posebnog zapunjavanja šupljina između bokova nizvodne kamene obloge.
- e) Akumulacijsko se jezero ne treba prazniti, što je s gledišta regulacije protoka rijeke Cetine vrlo značajno.
- f) HE Peraća ne može raditi petnaestak dana u odnosu na 2,5 mjeseca u slučaju nasipavanja s uzvodne strane, što je bilo veoma značajno zbog činjenice da se u slučaju nailaska velikih voda dio voda evakuira kroz hidroelektranu.
- g) S radovima se moglo praktično početi odmah, dok se u slučaju nasipavanja s uzvodne strane treba isprazniti akumulacijsko jezero.
- h) Troškovi nasipavanja s nizvodne strane su za oko 34% niži od troškova nasipavanja s uzvodne strane.

Prednosti nasipavanja s uzvodne strane su:

- a) Organiziranje radova je lakše
- b) Ne zadire se u rasklopšte
- c) Nema prometa kroz strojarnicu, što je u fazi izgradnje zida u rasklopištu bilo potrebno.

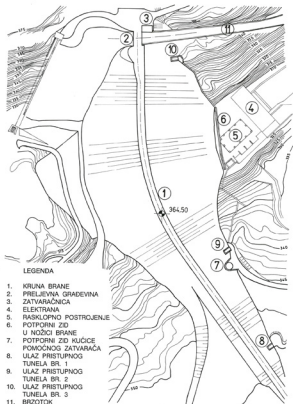
Uspoređujući prednosti jednog i drugog načina nasipavanja došlo se do zaključka da je nasipavanje s nizvodne strane u konstrukcijskom, tehnološkom i financijskom pogledu povoljnije pa je taj način predložen za izvođenje povišenja brane Peruća.

RJEŠENJE SANACIJE

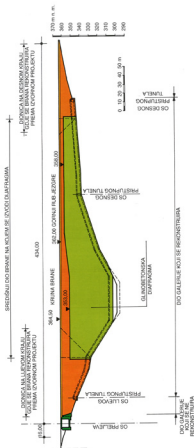
Kao osnova za izradu konačnog tehničkog rješenja sanacije brane Peruća koje je razrađeno u glavnom projektu poslužilo je rješenje sanacije brane Peruća, usvojeno u lipnju 1993. godine. U konačnom tehničkom rješenju sanacije nije se bitno odstupilo od ovog rješenja, a razlike su posljedica novih saznanja nakon provedenih hidroloških, meteoroloških i seizmoloških istraživanja studija i proračuna, te potrebe prilagodbe stvarnom stanju na terenu, sl. 7 i 8.

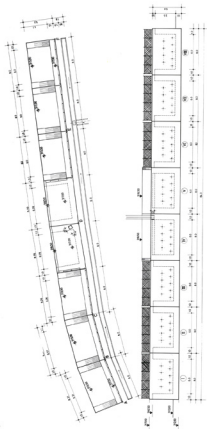
Prema tome konačno rješenje sanacije brane Peruća, koje je dato u glavnom projektu je sljedeće:

- teško oštećeni lijevi i desni kraj brane, te gornji dio brane u visini 5-10 m se uklanjaju i grade iznova
- u središnji dio brane ugrađuje se dijafragma od plastičnog betona koja preuzima funkciju vododrživosti umjesto oštećene glinene jezgre
- prije izgradnje dijafragme izvodi se, radi osiguranja iskopa za dijafragmu, injektiranje jezgre brane po trasi dijafragme
- injekcijska galerija se obnavlja u punoj dužini
- kruna brane se povisuje na projektnu kotu 364,50 m n.m., pri čemu je izvedbena kota u središnjem dijelu 365,00 m n.m., a na bokovima 364,50 m n.m.
- povišenje brane obavlja se nasipavanjem s nizvodne strane, a zbog toga se izvode potporni zidovi za zaštitu rasklopnog postrojenja na nožici brane i oko kućice pomoćnog zatvarača, sl. 9 i 10
- preeljevna građevina uključujući i zatvaračnicu u potpunosti se uklanja i gradi iznova; visina zapornice povećava se za 1,5 m u odnosu na staru, a svijetli otvor preljeva iznosi 10 x 7 m umjesto prijašnjih 10x5 m; ugrađuje se nova hidromehanička oprema.
- djelomično se rekonstruira brzotok zbog povećanja preljevaih protoka kod nailaska 10.000 g. velikog vodnog vala.



Slika 7. Situacija sanirane brane Peruća





Slika 9. Potporni zid u nožici brane



Foto 3. Potporni zid oko kućice pomoćnog zatvarača

- rekonstruirati se dio korita Cetine na mjestu spoja sa brzotokom prelijeva.
- lijevi i desni plato na krajevima brane se povisuje na kotu 364,50 m n.m., a zbog toga se diže i niveleta pristupnih cesta.
- izvodi se konsolidacijsko injektiranje injekcijske zavjese i kontaktno injektiranje spoja između galerije i injekcijske zavjese; radi osiguranja vododrživosti injektira se spoj između injekcijske galerije i temelja dijafragme.
- ugrađuje se oprema za tehnička promatranja.

U daljem tekstu će biti detaljnije opisana pojedina tehnička rješenja

SANACIJA INJEKCIJSKE GALERIJE

Osnovni problem kod postavljanja rješenja sanacije injekcijske galerije bio je nedostatak preciznih podataka o stanju galerije. Stanje galerije i ujedno stupanj njezinog oštećenja nije bilo moguće utvrditi budući da su prilazni hodnici br. 1 i br. 3 bili srušeni i potpuno neprohodni, dok je prilazni hodnik br. 2 bio teško oštećen. Na tom se mjestu ipak moglo ući u galeriju s mogućnošću pregleda njezinog relativno malog dijela dužine oko 50 m.

Zbog toga je odlučeno da se izrade tipska rješenja sanacije galerije za tri pretpostavljena stupnja oštećenja galerije. Na temelju toga određena su četiri tipa sanacije galerije:

a) TIP-1

Pretpostavljeno oštećenje je da je galerija ispucala u svodu i zidovima, ali nije deformirana i svod u statičkom pogledu vrši svoju funkciju.

Sanacija za taj stupanj oštećenja predviđena je izvođenjem obloge od mlaznog betona debljine 10 cm. Obloga je dvostruko armirana čeličnim mrežama Q-131.

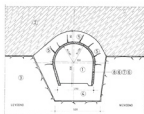
Prije izvođenja obloge predviđeno je da se postojeći, od eksplozije, zažadeni beton galerije očisti i ohrapavi pjeskaranjem sa svrhom ostvarivanja kvalitetnog spoja s mlaznim betonom, sl. 10.

b) TIP-2

Pretpostavljeno je da je galerija jače ispucala i deformirana, ali je generalno zadržala svoj oblik. Dijelovi svoda su odlomljeni. Svod u statičkom pogledu ipak vrši svoju funkciju s prijetnjom da se djelomično ili potpuno uruši.

Za taj stupanj oštećenja predviđena je sanacija izvođenjem obloge od mlaznog betona debljine 15 cm ojačane čeličnim zvonastim lukovima YU-21 s popustljivom spojnicom te dvostrukom čeličnom mrežom Q-131. Predviđa se prosječni osni razmak lukova od 1,0 m. Mjesta gdje se je beton odlomio treba prethodno ispuniti mlaznim betonom, sl. 10.

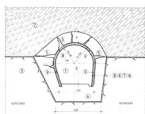
Beton galerije treba prije nanošenja mlaznog betona očistiti od čađe i ohrapaviti pjeskaranjem.



TIP 1

LEGENDA

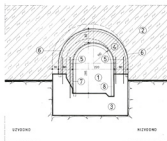
1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. GLINENA JEZGRA
3. TEMELJNA STUJENA
4. POSTOJEĆI BETON
5. PUKOTINE
6. ČELIČNA MREŽA Q-131
7. ČELIČNI LUKOVI
8. MLAŽNI BETON



TIP 2

LEGENDA

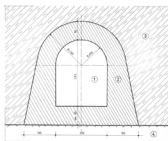
1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. GLINENA JEZGRA
3. TEMELJNA STUJENA
4. POSTOJEĆI BETON
5. PUKOTINE
6. ČELIČNA MREŽA Q-131
7. ČELIČNI LUKOVI
8. MLAŽNI BETON
9. RAZUPORE ϕ 25



TIP 3

LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. GLINENA JEZGRA
3. POSTOJEĆI BETON
4. NOVI BETON
5. ANKERI
6. ČELIČNE PLATICE
7. DRVENA OPLATA
8. ZVONASTI LUKOVI



TIP 4

LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. PRISTUPNI TUNEL
3. NOVI BETON
4. NOVA GLINENA JEZGRA
5. TEMELJNA STUJENA

Slika 10. Tipiska rješenja sanacije injekcijske galerije

c) TIP-3

Pretpostavljeno je da su svod i zidovi galerije potpuno srušeni, a temeljna ploča je oštećena, tako da treba izvesti potpuno nova.

Sanacija se izvodi u dvije faze:

- Najprije se vrši iskop pod zaštitom čeličnih zvonastih lukova YU-21 s pogostljivom spojnicom i čeličnih platika. Platice se pobjaju iznad lukova. Razmak lukova je u prosjeku 65 cm od osi do osi, ali može prema potrebi biti i manji.
- Iskop se obavlja po obođu profila dok se ne smjesti čelični luk, a zatim se kopa unutrašnji dio profila.
- Betonska obloga galerije debljine 80 cm izvodi se u čelično-drvenoj oplati, a ugrađuje se pumpani beton.

Predviđeno je da se novoizvedeni dio galerije ankerima poveže s postojećom temeljnom pločom. Ankere treba zabašiti u temeljnu ploču. Predviđeno je da se galerija izvodi u dionicima od 2,0 m, sl. 10.

Rad racionalizacije iskopa na mjestima, gdje se izvodio ovaj tip sanacije, profil galerije je smanjen u odnosu na originalnu galeriju.

d) TIP-4

Ovaj tip sanacije primjenjuje se za rekonstrukciju dijelova galerije i pristupnih hodnika koji se izvede u otvorenom iskopa nakon uklanjanja krajeva brane. Betonska obloga debljine 80 cm izvodi se u čelično drvenoj oplati, a ugrađuje se pumpani beton. Obloga galerije je nearmirana, osim na mjestima spoja starog i novog betona te na spojevima sa pristupnim hodnicima.

Također je predviđeno da se nakon završene rekonstrukcije galerije na cijeloj dužini kontaktnim injektiranjem iza obloge popune zastale šupljine koje su nastale uslijed pomicanja pojedinih blokova, a koje nisu prilikom sanacije mogle biti pupunjene, sl. 10. To je važno radi osiguranja punog kontakta između obloge galerije i glinene jezgre, prvenstveno zbog toga da se učvrsti nearmirana betonska konstrukcija svoda i osigura njezino jednolično opterećenje.

Projektom su također bila i predviđena tehnička promatranja koja je trebalo obavljati za vrijeme sanacije galerije. Cilj tehničkih promatranja bilo je praćenje ponašanja same

građevine prvenstveno sa stanovišta sigurnosti i konstruktivne stabilnosti. Također budući da je sanacija galerije predstavljala u određenom smislu i istražni rad, nastojalo se dobiti i što je više podataka o stanju jezgre.

Za vrijeme izvođenja radova na sanaciji bila su predviđena slijedeća promatranja, istraživanja i mjerenja:

- geotehnička promatranja
- mjerenje konvergencije
- geodetska mjerenja
- uzimanje neporemećenih uzorka jezgre brane

Geotehnička promatranja podrazumijevaju utvrđivanje karakteristika materijala na čelu iskopa urušenog dijela galerije, snimanje tehnoloških postupaka građenja i dnevni pregled količina ugrađenog osiguranja odnosno podgrade.

Mjerenja konvergencije i geodetska mjerenja bila su predviđena na profilima postavljenim na određenom razmaku te kod svake promjene uvjeta iskopa i na kritičnim mjestima kao što su raspucale zone i sl.

U svakom kontrolnom mjernom profilu bilo je predviđeno da se mjeri:

- dijagonalna konvergencija
- horizontalna konvergencija
- apsolutni pomak svoda, geodetskim mjerenjem.

Za potrebe utvrđivanja stanja jezgre brane trebalo je po cijeloj dužini galerije uzimati neporemećene uzorke glinene jezgre.

KONSOLIDACIJSKO INJEKTIRANJE PO TRASI DIJAFRAGME

Osnovna zadaća konsolidacijskog injektiranja uzduž ruba iskopa za buduću dijafragmu bilo je pronalaženje i zapunjavanje mogućih pukotina i kaverni u jezgri brane i filtrarskim slojevima u koje dijafragma djelomično zadire, sa svrhom da se tijekom izvođenja spriječi nagli gubitak isplake i samim tim i urušavanje iskopa.

Razlog za potrebu konsolidacijskog injektiranja leži u vrsti tehnologije koja se primjenjuje za izgradnju uspravnih dijafragmi. Bez obzira da li se iskop izvodi grablicom ili hidrauličkim rezačem, osiguranje stijenki iskopanog rova vrši se pomoću bentonitne isplake, što je standardna tehnologija koja se u svijetu primjenjuje za takve vrste radova. Kod toga uvijek se kao osnovni problem postavlja mogućnost eventualnog gubitka isplake uslijed nailaska na neku šuplinu u tlu ili materijal krupnije granulacije, što može dovesti do

urušavanja iskopa i zarobljavanja stroja. Takvi slučajevi su, kad se radi o iskopu u prirodnom tlu, relativno rijetki.

Sasvim druga situacija je mogla biti u oštećenoj jezgri brane Peruća. Pretpostavljalo se da je u jezgri brane uslijed djelovanja eksplozije nastao veći broj većih ili manjih pukotina. Također se pretpostavljalo da je zbog značajnog slijeganja, koje je nastalo nakon urušavanja galerije, na pojedinim mjestima došlo do stvaranja odteretnih svodova u jezgri što ima za posljedicu stvaranje kaverni. Spomenuta pretpostavka je potvrđena za vrijeme sanacije injekcijske galerije gdje se u urušenoj jezgri naišlo na kavernu značajnih dimenzija.

Sve naprijed navedeno ukazivalo je na činjenicu da postoji realna opasnost da tijekom iskopa za dijafragmu dođe do naglog gubitka isplake, te kao posljedica toga, do urušavanja stijenki iskopa i zatrpavanja stroja s kojim se obavlja iskop. Tako nešto bi dovelo do daljeg zastoja u radovima te prouzročilo, ili potpuni gubitak stroja ili velike troškove za njegovo izvlačenje. Zbog toga se prišlo razmatranju potrebnih mjera koje bi trebalo poduzeti da se opasnost od naglog gubitka isplake za vrijeme izvođenja dijafragme svede na minimum. Jedna od tih mjera je i konsolidacijsko injektiranje.

Odluka o potrebi provođenja konsolidacijskog injektiranja jezgre i djelomično filtarskih slojeva duž trase dijafragme donesena je, nakon sveobuhvatnog razmatranja, na sastanku Stručnog kolegija za rad na projektu sanacije brane Peruća, održanog 7. prosinca 1993. godine.

Predviđeno je da se injektiranje izvodi u centralnom dijelu brane, koji se ne uklanja, između sta: 0+87,70 i sta: 3+44,00 na dužini 256,30 m.

Injektiranje se izvodi u rubnoj zoni uzduž trase budućeg iskopa za dijafragmu, s radnog platoa na kotama 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m., sa kojeg je ujedno predviđena i izvedba dijafragme.

Predviđeno je da se najprije izvede primarni niz bušotina. Po završetku injektiranja primarnog niza bušotina predviđeno je izvođenje kontrolnih bušotina sa svrhom provjere uspješnosti injektiranja. Kontrolne bušotine izvede se s jezgrovanjem. Ukoliko se ispitivanjem na temelju kontrolnih bušotina tako zaključi, predviđeno je da se izvede i sekundarni niz bušotina i to samo na onim dionicama na kojima se pokaže da je to potrebno.

Predviđen je trokutni raspored primarnih injekcijskih bušotina. Međusobni razmak bušotina, u smjeru osi dijafragme, gledajući tlocrtno, iznosi 1,4 m i 1,4 m po visini trokuta koja je okomita na os dijafragme, sl. 11. Kontrolne bušotine se izvede na mjestima predviđenim za sekundarne bušotine, koje imaju također trokutni raspored i smještene su na polovici razmaka između primarnih bušotina.

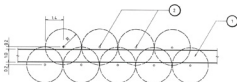
Za konsolidaciju glinene jezgre po trasi dijafragme bile su predviđene dvije metode injektiranja:

- silazno injektiranje usporedo s bušenjem, u daljnjem tekstu SIBUP
- injektiranje gravitacijskim zapunjavanjem, u daljnjem tekstu gravitacijsko injektiranje.

Obje odabrane metode zadovoljavaju specifične uvjete medija u kojemu se injektiranje izvodi i zahtjeve koje trebaju ispuniti.

Medij u kojemu se injektiranje izvodi je glinena jezgra brane a djelomično i filtri, i potpuno je atipičan za takove vrste radova, što između ostalog ima znatan utjecaj na tehnologiju injektiranja. Zbog toga je bilo vrlo teško odrediti koja je metoda injektiranja najpogodnija.

Zato je odlučeno da se odluka o tome koja će se metoda primjeniti donese nakon što bude izvršeno probno injektiranje koje se trebalo izvršiti u okviru geotehničkih i geofizičkih istražnih radova.



LEGENDA

- ① - DIJAFRAGMA OD PLASTIČNOG BETONA
- ② - INJEKCIJSKE BUŠOTINE
- R / m / - POLUMJER DOSEGA INJEKTIRANJA

Slika 11. Raspored bušotina za konsolidacijsko injektiranje po trasi iskopa za dijafragmu

U pogledu recepture injekcijskih smjesa koje je trebalo primijeniti za zapunjavanje pukotina u glini, bilo je predviđeno da se primjene injekcijske suspenzije koje u svom sastavu imaju veći postotak bementa. Za tu svrhu predviđena je suspenzija koja se sastoji od suhe tvari s 80% cementa i 20% bentonita i koja se miješa s vodom u omjeru od 1:3 do 1:0,7. Također ukoliko bi se tijekom injektiranja naišlo na kavernu, predviđeno je da se primjeni suspenzija u koju se dodaje i pijeska. Kod te suspenzije sastav suhe tvari je 30% cementa, 10% bentonita i 60% pijeska.

Što se tlaka injektiranja tiče postojala je, obzirom da se injektiranje vrši uzvodno od galerije u jednoj relativno tankoj zoni oštećene glinene jezgre, realna opasnost da bi kod primjene većih tlakova injektiranja došlo do hidrauličkog sloma materijala. Zbog toga je tlak injektiranja određen u odnosu na efektivna vertikalna naprezanja u glinenoj jezgri i iznosio između 100 kN/m² za najviše do 800 kN/m² za najdublje dionice injekcijskih bušotina.

Detaljniji prikaz tijeka i rezultata konsolidacijskog injektiranja dat je u posebnom članku u ovoj knjizi.

VODODRŽIVA DIJAFRAGMA

Vododrživa dijafragma koja se ugrađuje u tijelo brane, 4 m uzvodno od osi injekcijske galerije, preuzima u središnjem dijelu brane funkciju vododrživosti umjesto oštećene glinene jezgre, sl. 6 i 8.

Na spoju s lijevom i desnom krajem brane dijafragma se zasjecu 2 m u njih. Predviđeno je također da se dijafragma u temelju zasiječe minimalno 2 m u temeljnu stijenu, odnosno u betonski blok koji se nalazi ispod središnjeg dijela brane.

Osnovni problem kod projektiranja dijafragme bilo je određivanje mehaničkih karakteristika materijala dijafragme i njezina debljina. Da bi se spomenute karakteristike mogle odrediti proveden je proračun dijafragme u uvjetima različitih opterećenja. U okviru tog proračuna provedena je analiza stanja naprezanja i deformacije brane u uvjetima različitih opterećenja. Spomenuta analiza je predmet posebnog članka u ovoj knjizi, dok će se ovdje sažeto prikazati samo onaj dio koji se odnosi na dijafragmu.

Proračuni su provedeni metodom konačnih elemenata uvažavajući elastoplastično ponašanje materijala te nelinearne veze naprezanja i krutosti odnosno čvrstoće i efektivnih naprezanja zemljanih materijala u brani. Pri tome je korišten program FLAC za elektroničko računalno koji omogućuje rješenje takvih složenih deformacijskih problema u geotehnici.

Za proračun unutarnjih sila u dijafragmi simulirane su slijedeće faze opterećenja tijela brane:

- 6 faza nasipavanja pri izgradnji brane u slojevima od po 10 m visine
- skidanje najvišeg sloja, rekonstrukcija brane
- ugradnja dijafragme, nasipavanje zadnjeg sloja te povišenje brane s dosipavanjem nizvodnog pokosa.
- seizmičko opterećenje, zadano kao ekvivalentna statička sila od 15% totalne težine

U proračunu su varirane različite mehaničke karakteristike materijala dijafragme, s ciljem pronalaženja optimalnih.

Zaključci proračuna koji se odnose na dijafragmu su slijedeći:

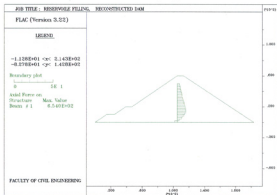
- Za sve varijante krutosti materijala brane te krutosti i čvrstoće materijala dijafragme, u dnu dijafragme se pojavljuje plastični zglob, tj. doseže se veličina njene nosivosti na savijanje. Naime deformacije brane nameću prisilne pomake dijafragme koji izazivaju pojavu plastičnog zgloba na mjestu njene upetosti na razini temelja brane. Na svim ostalim mjestima momenti savijanja u dijafragmi manji su od nosivosti presjeka bez obzira na pretpostavke o parametrima krutosti i čvrstoće,
- Poprečna pukotina u plastičnom zglobu dijafragme, nastala nedostatkom vlačne čvrstoće materijala dijafragme, doseže do 80 cm od uzvodnog prema nizvodnom rubu dijafragme. U najekstremnijem slučaju zijev pukotine je manji od 5 mm,
- Parametarske analize pokazuju da eventualno omekšavanje materijala dijafragme, a time i smanjenje njene čvrstoće, pri čemu su analizirani odnosi Youngovog modula i čvrstoća od 10.000:1 do 300:1, ne eliminira pojavu plastičnog zgloba u njenom dnu. Kako je zbog sigurnosti od moguće progresivne erodibilnosti materijala dijafragme na mjestu pukotine potrebno da materijal dijafragme ima zadovoljavajuću čvrstoću, preporuča se da se materijal dijafragme projektira tako da mu Youngov modul iznosi $E \leq 400 \text{ MN/m}^2$, a tlačna čvrstoća nakon 28 dana $\sigma \geq 1,0 \text{ MN/m}^2$.

Na osnovi rezultata provedenog proračuna određeno je da dijafragma treba imati slijedeće karakteristike.

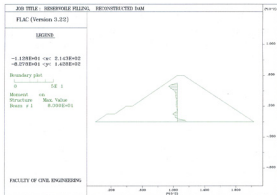
- tlačna čvrstoća dijafragme mora biti veća od $1,0 \text{ MN/m}^2$
- Youngov modul elastičnosti ne smije biti veći od 400 MN/m^2
- Darcyev koeficijent vodopropusnosti mora biti manji od 10^8 m/s .

Također je predviđeno da debljina dijafragme treba biti 1,0 m.

Dodatne uzdužne sile u dijafragmi [kN/m²]

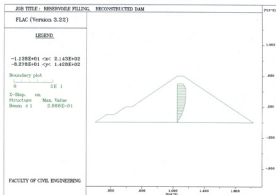


Momenti savijanja u dijafragmi [kNm/m²]

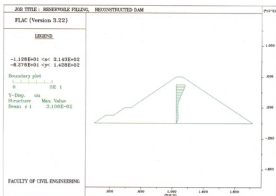


Slika 12. Grafički prikaz rezultata proračuna dijafragme

Horizontalni (x) pomaci dijafragme [m]



Vertikalni (y) pomaci dijafragme [m]



Slika 13 Grafički prikaz rezultata proračuna dijafragme - pomaci

Određeno je također da materijal od kojeg će biti izgrađena dijafragma bude plastični beton (glinobeton) koji treba imati gore navedene karakteristike.

U projektu je također razrađen vrlo opsežan program kontrole kvalitete prije građenja i za vrijeme građenja dijafragme, te program ispitivanja gotove dijafragme.

REKONSTRUIRANI DIJELOVI BRANE

Općenito

Predviđeno je da se u okviru sanacije brane u potpunosti rekonstruiraju lijevi i desni kraj, te gornji dio brane na središnjem dijelu u visini 7-12 m uključujući i povišenje radi čega se brana treba proširiti na nizvodnoj strani za 6 m.

Konstrukcija tijela brane odgovara konstrukciji originalne brane. Razlika je jedino u tome da su predviđeni jednoslojni filtri, u odnosu na troslojne u originalnoj brani.

Tijelo brane građeno je od:

- glinene jezgre
- uzvodnih i nizvodnih filtarskih slojeva
- uzvodne i nizvodne zone od kamenog materijala
- krune brane od zaglinjenog kamenog materijala

Zbog nizvodnog proširenja os brane je postavljena asimetrično u odnosu na os kolnika i predstavlja os originalne brane.

Maksimalna širina jezgre u dnu na najdubljem dijelu na lijevom kraju iznosi oko 12,5 m, a na desnom kraju oko 9,0 m. Na gornjem dijelu jezgra je zakošena prema vrhu, što je posljedica povišenja brane i potrebe odgovarajućeg priključka na vrh dijafragme, sl. 6.

Glinena jezgra je s uzvodne i nizvodne strane zaštićena jednoslojnim uzvodnim i nizvodnim filtarskim slojevima širine 2 m. Uzvodni filter je u gornjem dijelu brane u zonama malih pritisa sužen na 1,5 m.

Predviđeno je da se potporne zone uzvodno i nizvodno izgrade od kamenog materijala. S uzvodne strane predviđen je pojas širine 1,5 m od kamenog materijala krupnije granulacije uključujući i zaštitnu oblogu od krupnih kamenih blokova.

U samoj kruni brane predviđena je ugradnja sloja zaglinjenog kamenog materijala, sl. 14.

Proširenje nivoodne potporne zone brane u širini od 6 m predviđeno je od kamenog materijala s bočnim stepenastim zasijecanjem u postojeće tijelo brane.

Karakteristike materijala

Projektom predviđene karakteristike materijala za ugradnju u tijelo brane su sljedeće:

a) Glina

Materijal za izvođenje glinene jezgre je glina srednje do visoke plastičnosti, CI/CH. Predviđeno je da se glina uzima ili iz postojeće prethodno iskopane te odložene glinene jezgre brane ili iz nalazišta.

Karakteristike ugrađene gline u jezgri brane moraju biti sljedeće:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| - granulometrijski sastav | $35\% < 0,002 \text{ mm}$ $75\% < 0,06 \text{ mm}$ |
| - granica tečenja | $43\% < W_L < 60\%$ |
| - indeks plastičnosti | $20\% < IP < 38\%$ |
| - zbijenost po modificiranom Proctoru | $W_{opt} = 17-24 \text{ (\%)}; \gamma_d = 17,5 - 15,5 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ |
| - zbijenost ugrađene gline | $\gamma_{d \text{ min}} = 0,95 \gamma_d \text{ po modificiranom Proctoru}$ |

b) Filtarski materijal

Materijali za izvođenje filtarskih slojeva su kameni materijali prirodnog porijekla, dobro građirani šljunak i pijesak ili drobljenici od odgovarajućeg kamenog materijala prirodnog porijekla ili od izminirane stijene. Predviđeno je da se uzimaju ako je moguće iz postojećih prethodno iskopanih filtarskih materijala iz tijela brame, zatim iz nalazišta prirodnog materijala iz kamenoloma ili iz odgovarajućih drobilana.

Traženi materijal za filtarske slojeve treba biti tvrd i jedar drobljenac sa specifičnom težinom minimalno 25 kN/m^3 .

Pri izboru filtarskih materijala treba zadovoljiti kriterij Sherarda; promjer 15%-tnog zrna filtra DF 15 = 0,7-1,5 mm. Granulometrijske krivulje materijala za ugradnju u filtarske slojeve brane date su na sl. 15.

Zapreminske težina ugrađenog materijala filtarskih slojeva treba iznositi 0,7 maksimalne zapreminske težine postignute u laboratoriju.

c) **Kameni materijali potpornih zona i zaštite uzvodnog pokosa**

Materijali potpornih zona i zaštite uzvodnog pokosa su kameni materijali odgovarajućeg sadržaja i kvalitete bilo prirodnog porijekla bilo od minirane stijene vapnenca ili svih vrsta eruptivnih stijena. Predviđeno je da se za dobivanje kamenog materijala koristi kamenolom iz kojeg se vadio kamen i za izgradnju originalne brane.

Granulometrijski sastav propisan je za dvije vrste kamenog materijala, materijal koji se ugrađuje u uzvodnu i nizvodnu potpornu zonu koji je na nacrtima označen sa " K_1 " i kameni materijal za zaštitu uzvodnog pokosa označen sa " K_2 "; sl. 16.

Za materijal K_1 je predviđeno da najveći ulomak ne bude veći od 500 mm. Kameni materijali sa više finijih čestica mogu se ugrađivati u unutarnjem dijelu potporne zone, s tim da zrna promjera $d < 2$ mm ne smije biti više od 40%, a zrna promjera $d < 0,06$ mm ne više od 5%.

Zapreminska težina ugrađenog materijala uzvodne i nizvodne potporne zone mora iznositi 20 kN/m³.

Predviđeno je da zaštitu uzvodnog pokosa debljine 1,5 m, odnosno horizontalne širine 2,7 m treba izvesti od materijala koji se sastoji od krupnih ulomaka stijene odnosno kamenih blokova i krupnog šljunka, " K_2 ". Promjer najvećeg zrna u pravilu ne treba prelaziti 1,0 m.

Granulometrijske krivulje za kamene materijale K_1 i K_2 prikazane su na sl. 16.

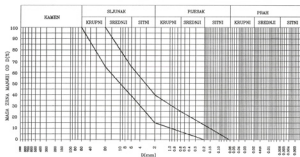
d) **Zaglinjeni šljunak i kameni materijal krune brane**

Predviđeno je da se u samu krunu brane ugradi zaglinjeni kameni materijal. Takvo rješenje bilo je i na originalnoj brani, a odabrano je zbog zaštite glinene jezgre od isušivanja.

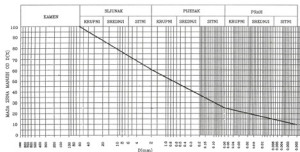
Zapreminska težina spomenutog materijala treba iznositi minimalno 18 kN/m³. Granulometrijska krivulja prikazana je na slici 15.

Ugradnja

U odnosu na način ugradnje kamenog materijala u tijelo originalne brane pomoću hidromonitora, za rekonstruiranu branu je predviđena ugradnja valjanjem i zbijanjem u slojevima. Također je i ugradnja svih ostalih materijala predviđena zbijanjem u slojevima. Projektom su također propisane minimalne debljine slojeva u zbijenom stanju:

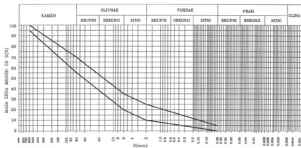


Za filtarske slojeve

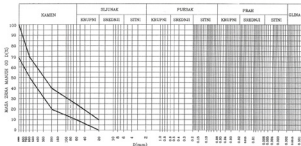


Za zaglinjeni material

Slika 15. Granulometrijske krivulje



Kameni materijal K₁



Kameni materijal K₂

Slika 16. Granulometrijske krivulje kamenog materijala za potporne zone

Miješani kameni materijal	60 cm, u zbijenom stanju
Filtar	do 50 cm, u zbijenom stanju
Glina	25 cm, u zbijenom stanju
Kamena obloga	do 1,0 m

Predviđeno je također da se optimalne debljine slojeva odrede probnim zbijanjem.

U projektu je također razrađen vrlo opsežan program kontrole kvalitete materijala prije ugradnje i nakon ugradnje. Propisan je način uzimanja uzoraka, ispitivanja in-situ i ispitivanja u laboratoriju. Određeno je također da se na gradilištu treba instalirati geomehanički laboratorij u kojim će se ispitivati uzorci materijala.

PRELJEVNA GRADEVINA I BRZOTOK

Uvod

Preljevna građevina originalne brane, uključujući i zatvaračnicu, bila je teško oštećena tako da je nakon detaljnog pregleda zaključeno da ju treba potpuno ukloniti i izgraditi novu.

Nova preljevna građevina dimenzionirana je da propusti protok od 427,93 m³/sec, što je maksimalni protok transformiranog vodnog vala 10.000 povratnog perioda uz maksimalni vodostaj u jezeru na koti 362,20 m n.m. Za propuštanje ovog protoka potreban je svijetli otvor preljeva dimenzija 10 x 7,2 m.

Kruna preljeva zadržana je na koti 355,00 m n.m. kao i kod originalne brane. Budući da je maksimalni radni vodostaj predviđen na koti 361,50 m n.m. određeno je da gornji rub zapornice bude 0,5 m iznad radnog vodostaja, na koti 362,00 m n.m., što znači da zapornica treba zatvarati površinu 10 x 7 m.

Hidromehanička oprema

Kod odabiranja tipa zapornice nastojalo se zadržati isti tip zapornice, klapna, kao i na originalnoj brani. Osim što je klapna po svojim karakteristikama najpogodnija za ovakve objekte, eventualna ugradnja drugog tipa zapornice zahtijevala bi veću preljevnu građevinu, što se svakako htjelo izbjeći.

S druge strane u svijetu nema puno primjera gdje je izgrađena klapna dimenzija 7 x 10 m. Osnovni problem kod klapni takvih dimenzija predstavlja osiguranje njihove krutosti i svodenje deformacija kod punog opterećenja na prihvatljivi minimum. Ključnu ulogu kod toga igra način dizanja klapne.

Zbog toga su analizirana tri načina dizanja, pomoću hidrauličkog cilindra ugrađenog na jednom kraju klapne, pomoću dva hidraulička cilindra ugrađena na oba kraja klapne i dizanje pomoću jednog cilindra ugrađenog ispod klapne.

Kao najpogodnije konačno je odabrano rješenje s jednim cilindrom smještenim u oknu ispod klapne, sl. 17 i 18.

Sama klapna je oslonjena na beton krune preljeva na tri ležaja. U uvjetima maksimalnog opterećenja kada je klapna u najvišem položaju na srednjem ležaju se javlja vlačna sila od 2.980 kN, a na bočnim ležajevima vlačna sila od 1.600 kN.

Za preuzimanje tih sila ugrađeno je u beton ispod srednjeg ležaja 6 ankera ϕ 70 mm, a ispod bočnih ležaja 6 ankera ϕ 50 mm. Zbog sprečavanja koncentracije naprezanja na uskom području betona oko ankera i prenošenja opterećenja na cijelu preljevnu građevinu, u kruni preljeva je konstruirana skrivena armiranobetonska greda upeta u bočne zidove preljevne građevine.

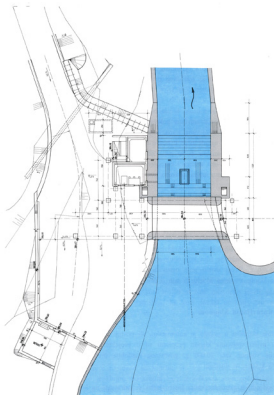
Hidraulički cilindar smješten je u oknu dubine 8 m, sl. 18. Cilindar preuzima silu od 4.030 kN u uvjetima dizanja klapne kod maksimalnog opterećenja.

Radi sprečavanja zamrzavanja bočne gumene brtve na klapni, projektom je predviđeno grijanje bočnih limenih štitova. Za svaki bočni štit su predviđena dva sistema grijanja, od kojih prvi grije područje štita koji obuhvaća klapna kod prvog koraka spuštanja na kotu 359,50 m n.m. Drugi sistem grije ostali dio štita, a uključuje se samo ukoliko je već spuštana klapna do kote 359,50 m n.m. i predviđa se njeno daljnje spuštanje.

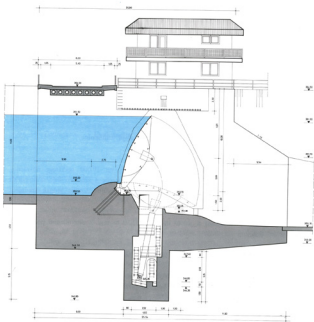
Način upravljanja klapnom

Upravljanje klapnom u pravilu je automatsko, ali postoji mogućnosti i ručnog upravljanja. Način i uvjeti spuštanja klapne propisani su u projektu, a baziraju se na proračunu evakuacije vodnog vala 10.000 g. povratnog razdoblja preko preljeva. Uvjeti i način spuštanja klapne su sljedeći:

- vodostaj u akumulacijskom jezeru treba se održavati na koti 361,50 m n.m.
- ukoliko vodostaj poraste iznad kote 361,52 m n.m, počinje spuštanje klapne
- spuštanje klapne se izvodi u propisanim koracima
- prvi korak spuštanja je da se gornji rub klapne spusti za 2,5 m od kote 362,0 m n.m. na kotu 359,50 m n.m.



Slika 17. Tlocrt predelne gradevine



Slika 18. Uzdužni presjek preljevne građevine

- ukoliko vodostaj i dalje raste iznad 361,52 m n.m. klapnu treba spuštati u slijedećim koracima, tablica 4.

KORACI SPUŠTANJA	SPUŠTANJE KLAPE (cm)	PRELJEVNA VISINA (m)
1	250	2,0
2	60	2,6
3	60	3,2
4	80	4,0
5	80	4,8
6	60	5,4
7	60	6,0
8	klapna je potpuno spuštена	6,5

Tablica 4 Koraci spuštanja zapornice

Proračun za spuštanje klapne proveden je za vodni val 10.000 godišnjeg povratnog razdoblja, za koje je $Q_{max} = 509,60 \text{ m}^3/\text{s}$, vrijeme koncentracije 4 sata, što daje satni porast protoka od $5,31 \text{ m}^3/\text{s}$. Pretpostavljeno je da je hačni protok Cetine jednak srednjem protoku od $42 \text{ m}^3/\text{s}$.

Uz uvjet održavanja vodostaja u jezeru na koti 361,50 m n.m. s dozvoljenim porastom od +2 cm dobiveni su slijedeći rezultati, tablica 5.

Potpuno otvaranje zapornice nastupa 55 sati nakon nailaska vodnog vala.

Ukoliko zakaže kontrolni sustav koji upravlja klapnom, predviđen je sigurnosni ventil kojeg aktivira plovak u mjernom oknu, a koji se aktivira u trenutku kad vodostaj u akumulacijskom jezeru poraste iznad 362,00 m n.m. U tom slučaju klapna se potpuno otvara.

Vodostaj	Spuštanje zapornice	Visina preljevavanja	Protok preljevavanja	Trajanje preljevavanja
(m n.m.)	(cm)	(m)	(m ³ /s)	(sat)
361,52	200+50	2,02	63,59	7,0
361,60-361,52	60	2,61	93,40	5,0
361,50-361,52	60	3,21	127,39	7,0
361,50-361,52	80	4,01	177,86	12,0
361,50-361,52	80	4,81	233,66	9,0
361,50-361,52	60	5,41	278,72	8,0
361,50-361,52	60	6,01	326,35	7,0
361,50-361,52	100	6,51	367,91	55,0

Tablica 5 Evakuacija 10.000 g. vodnog vala preko preljeva

Konstrukcija građevine

Cijela preteivna građevina, uključujući i okno cilindra, temeljena je na čvrstoj stijeni. Kota temeljne plohe preteivne građevine je 348,00 m n.m., a okna cilindra 342,85 m n.m.

Betonski radovi na preteivnoj građevini podjeljeni su zbog potrebe ugradnje hidromehaničke opreme u dvije faze. U pevoj se fazi izvodi armiranobetonska konstrukcija u kojoj se ostavljaju otvori za ugradnju hidromehaničke opreme. U prvu fazu betona ugrađuju se sidrene pločice i ankeri na koje se kasnije pričvršćuje hidromehanička oprema. Druga faza betona slijedi nakon ugradnje hidromehaničke opreme. Za ugradnju je predviđen beton MB-30 i armatura RA 400/500.

Propisane tolerancije za betonske radove iznose $\pm 1,0$ cm, a za ugradnju ankera i sidrenih pločica ± 5 mm.

Na krajevima građevine predviđena su ograđna okna za ograđivanje preteivnog mlaza. Jedan od okana služi ujedno i za pristup u okno hidrauličkog cilindra.

Spoj između betona prelijevne građevine i glinene jezgre u pravilu je najosjetljiviji dio na svakoj nasutoj brani. Projektom je za potrebe ostvarivanja spoja predviđen betonski zub na desnom zidu prelijevne građevine.

Zatvaračnica

Uz lijevi zid prelijevne građevine na lijevom pristupnom platou smještena je zatvaračnica. U prizemlju zatvaračnice nalaze se dvije prostorije. U jednoj se nalaze uređaji za upravljanje klapnom i električni ormar za napajanje zatvaračnice, kućice zatvarača dovodnog tuncla, te rasvjetne brane i pristupnih cesta. U drugoj prostoriji je predviđen smještaj centralnog sustava za upravljanje instrumentima i uređajima za tehnička promatranja brane, te smještaj 5 akceleroografa predviđenih za seizmička mjerenja na brani. U gornjem katu su predviđene prostorije za boravak čuvara.

Brzotok

Kao što je naprijed spomenuto maksimalni protok preko prelijeva za evakuaciju vodnog vala 10.000 godišnjeg povratnog razdoblja iznosi 427,93 m³/sec. Budući da je postojeći brzotok bio dimensioniran za prihvatanje protoka od 340 m³/sec., što je bio i prelijevni kapacitet originalne prelijevne građevine, izvršena je analiza proticanja s protokom od 427,93 m³/s. Analizom je utvrđeno da nivo vode na pojedinim dijelovima brzotoka nadvisuje zidove do najviše 95 cm, te ih je potrebno povisiti. Također je potrebno, da bi se u slapštu dobio potopljeni vodni skok, na tom dijelu povisiti bočne zidove na lijevoj strani za 1 m i na desnoj strani za 2,5 m te prelijevni prag za 1,5 m.

SUSTAV ZA TEHNIČKA PROMATRANJA

Za tehničko promatranje brane Peruća projektiran je vrlo kompleksan sustav mjernih uređaja.

Predviđene su slijedeće vrste tehničkih promatranja

- vizuelna promatranja
- geodetska mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka na površini brane
- mjerenja naginjanja i zakretanja betonskih zidova
- mjerenje pritisa porne vode u glinenoj jezgri
- mjerenje totalnih pritisa u glinenoj jezgri
- mjerenje horizontalnih pomaka točaka u tijelu brane
- mjerenje vertikalnih pomaka točka u tijelu brane, slijezanje

- mjerenje piezometarskih nivoa u nizvodnoj nožici brane
- mjerenje procjeđivanja
- seizmološka promatranja
- mjerenja nivoa vode u akumulacijskom jezeru
- mjerenje deformacije, konvergencije, obloge injekcijske galerije
- mjerenje rastezanja i skupljanja krane brane
- hidrometeorološka mjerenja

Mreža mjernih točaka i uređaja sastoji se od uređaja koji su stalno ugrađeni i kontinuirano vrše mjerenja, te od mjernih točaka i uređaja na kojima se periodički vrše mjerenja.

Mjerna mjesta na tijelu brane grupirana su u 12 oskultacijskih profila koji su iz različitih razloga karakteristični, i na njima se vrše različite vrste mjerenja. Na taj način može se lakše na svakom profilu utvrditi međusobna uzročno-posljedična veza različitih pojava na brani.

Osim na spomenutim profilima mjerna mjesta su postavljena na potpornom zidu u nožici brane, na potpornom zidu oko kućice zatvarača temeljnog ispusta, na brani uz preljevnu građevinu, te u akumulacijskom jezeru.

Uređaji koji su stalno ugrađeni u tijelo brane kabelima su spojeni s centrom za tehnička promatranja iz kojeg se upravlja mjerenjima i prikupljaju podaci.

Centar za tehnička promatranja smješten je u posebnoj prostoriji u zatvaračnici na lijevom kraju brane. U njemu je smješten sustav za mjerenje i prikupljanje podataka mjerenja (DATA ACQUISITION SYSTEM) kojim upravlja kompjuter pomoću za tu svrhu specijalističkog programa. Programski se može odrediti u kojim vremenskim intervalima se vrše mjerenja te istodobno vršiti odgovarajuće analize.

U Centru je smješteno također svih 5 akceleroografa, koji su kabelima vezani sa senzorima smještenim u galeriji, krani brane i nizvodno u temeljnoj stijeni. Sistem za seizmološka mjerenja je nezavisan u odnosu na sistem koji upravlja ostalim mjerenjima.

Mjerenja na ostalim mjernim mjestima koja nisu povezana u centralni sustav obavlja se govedskim instrumentima i ostalim prenosivim mjernim uređajima, te predstavljaju korisnu nadopunu i kontrolu naprijed spomenutih mjerenja.

Sustav za tehnička promatranja na brani Peruća opširnije je obrađen u posebnom članku u ovoj knjizi.

ZAKLJUČAK

Projekt sanacije brane Peruća unatoč mnogim poteškoćama koje su ga pratile uspješno je priveden kraju.

Rad na projektu za sve sudionike predstavlja dragocjeno iskustvo prvenstveno u pogledu originalnih tehničkih rješenja, koja su primjenjena, ali i zbog okolnosti u kojima je realiziran.

Projekt sanacije brane Peruća izazvao je također pažnju međunarodne stručne javnosti, a našim stručnjacima izrečena su mnoga priznanja u pogledu uspješne realizacije projekta.

Bez obzira na sva dragocijena stručna iskustva koja smo stekli i sva priznanja koja smo dobili, željeli bi da teroristički akt miniranja brane Peruća ostane prvi i zadnji slučaj te vrste u svijetu i samim time da nestane potreba za ovakvim projektima.

ORGANIZACIJA GRAĐENJA I IZVOĐENJE RADOVA NA SANACIJI

MIJO ZEC, dipl.ing.građ.

Glavni nadzorni inženjer

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.

SPLIT

SAŽETAK

Sanacija brane Peruća interesantna je sa stanovišta građevinarstva, jer su problemi koje je trebalo rješavati specifični u tehničkom i organizacijskom pogledu. Specifičnosti koje ovaj projekt čine posebnim sastojale su se u sljedećem:

- imperativni rokovi završetka sanacije zbog potreba za električnom energijom kao osnovnog preduvjeta života, rada i razvoja
- nemogućnost logičnog razvijanja faza projekta sanacije brane, a to su:
 - istraživanje
 - projektiranje
 - gradnja
- organizacijsko povezivanje velikog broja raznovrsnih aktivnosti u vremenu i skučenom prostoru
- usklađivanje kvalitete izvođenja s obzirom na razvoj aktivnosti na gradnji, količina ugrađenog materijala i vremenskih (ne)prilika
- neophodnost istovremenog rada na sanaciji brane i korištenju akumulacijskog jezera
- stalna opasnost od ratnog djelovanja po gradilištu

Sve ovo zahtijevalo je potpunu predanost i angažiranost svih sudionika na sanaciji. Može se reći da je odluke trebalo donositi svakodnevno, a tu treba istaknuti dobru suradnju između projektanta, nadzorne službe i svih izvođača radova bez kojih se ovaj zahvat ne bi mogao uspješno izvršiti.

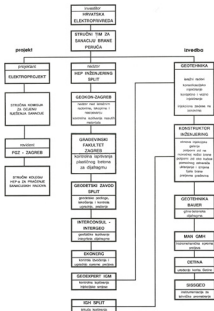
Količine radova koje su izvedene nisu velike po opsegu, ali ako se uzme u obzir složenost zahvata, koja se očituje u specifičnosti pojedinih radova, koji su uz to i međusobno povezani te zahtijevaju kontinuirano praćenje njihovog odvijanja, uočavanje i rješavanje novonastalih situacija, nemogućnost normalnog odvijanja radova zbog neprijateljskog djelovanja, može se zaključiti, da je sanacija izvedena uspješno i u kratkom vremenu.

UVOD

Da bi se stekao potpun uvid u organizaciju radova pri sanaciji brane Peruća, obrađene su osim organizacije pojedinih radova i teme koje su u ovom specifičnom građevinskom poduhvatu imale naglađeni značaj i utjecaj na organizaciju radova, a to su:

- kronologija događanja od aktiviranja eksploziva do završetka sanacijskih radova
- organizacija radova obzirom na blizinu neprijateljskog topništva
- korištenje akumulacijskog jezera za vrijeme sanacije brane.

ORGANIZACIJSKA SCHEMA SANACIJE BRANE PERUĆA



[illegible]

DOGAĐAJI I AKTIVNOSTI NA SANAČLIJ BRANJE PERUČA

KRONOLOGIJA DOGAĐANJA NA BRANI PERUČA

Eksploziv u kontrolnoj galeriji brane kojeg su nekoliko mjeseci prije postavile srpske paravojsne snage i bivša JNA aktiviran je 28. siječnja 1993. godine u 10^h 48^{min} i 55^{sek}. Namjera je bila da se sruši brana, onemogućiti njena ponovna izgradnja i izazove katastrofa nizvodno od brane. Kako je u vrijeme miniranja brane vodostaj u jezeru bio na koti 356,20 m n.m., što je za oko 5 m niže od vodostaja kojim je neprijatelj računao prilikom planiranja rušenja, izbjegnuta je katastrofa, ali je brana znatno oštećena.

Pristup na branu omogućen je 29. siječnja 1993. godine u 8^h sati kada su počeli radovi na zatvaranju kratera na desnom kraju nasipavanjem ulegnuća na središnjem dijelu te zatvaranja kratera na lijevom kraju brane. Za nasipavanje upotrebljen je materijal iz kamenoloma udaljenog oko 25 km od brane, a djelomično i materijal iz brane.

Vodostaj u akumulacijskom jezeru bio je 1,20 m iznad kote krane preljeva preko kojeg je voda istjecala nizvodno u korito Cetine.

Kako je nizvodni rub kratera na lijevom kraju brane bio samo 30-50 cm iznad vodostaja u jezeru prijetila je opasnost od prelijevanja vode preko krune niz nizvodni pokos brane što bi dovelo do erodiranja i odnošenja većeg dijela brane.

Miniranjem je oštećena injekcijska galerija i glinena jezgra uslijed čega je došlo do prodora vode u galeriju. Voda je iz galerije istjecala kroz drenažnu cijev koja se nalazi ispod tijela brane i na rasklopnom postrojenju hidroelektrane Peruća izlazila kroz vertikalno okno, sl. 1.

Kroz ovu je cijev voda odnosila komade gline, kamena i betona promjera i do 50 cm, foto 1.

Nakon zatvaranja kratera oko 11^h i 10^{min} prestalo je istjecanje vode kroz drenažnu cijev, a pojavilo se istjecanje vode iz pristupnog tunela br. 2 na desnom kraju brane.

Zatim se pristupilo otvaranju zatvarača temeljnog ispusta što je i učinjeno 29. siječnja 1993. u 14^h i 15^{min} pa je počelo pražnjenje jezera protokom od oko 220 m³/s. Pražnjenje jezera uz potpuno otvoren zatvarač temeljnog ispusta trajalo je do 12. ožujka 1993. godine, kada je dostignut vodostaj u jezeru na koti 314,80 m n.m., što predstavlja praktično prazno jezero.

Paralelno sa radovima na spašavanju brane počeli su i radovi na prematranju ponašanja brane nakon miniranja, a to su:

- geofizička ispitivanja
- mjerenje brzina strujanja vode u akumulacijskom jezeru na uzvodnom pokosu brane
- mjerenje protoke i mutnoće vode iz pristupnog tunela br. 2



Foto 1. 29. siječnja 1993. godine - Pogled na drenažni bunar u rasklopnom postrojenju

- opažanja slijevanja brane
- opažanja pukotina
- vizuelna promatranja.

Nakon poduzetih interventnih mjera na spašavanja brane od rušenja, a time i zaštite nizvodnog područja sve aktivnosti bile su usmjerene na to da se brana što prije sanira, budući akumulacijsko jezero Peruća ima značajni utjecaj kako na proizvodnju električne energije na nizvodnim hidroelektranama Peruća, Dale i Zakućac, tako i na zaštitu od poplava Hrvatačkog i Sinjskog polja.

Realizacija sanacije brane Peruća nije predstavljala značajniji problem, jer u Hrvatskoj postoje renomirane tvrtke koje posjeduju veliko znanje i iskustvo u izgradnji hidroenergetskih i drugih objekata. To su "Elektroprojekt" Zagreb, koji je projektirao sve

hidroenergetske objekte u Hrvatskoj, "Konstruktor" Split, koji je izradio niz hidrotehničkih objekata, među njima i branu Peruća, te "Geotehnika" Zagreb, tvrtka specijalizirana za temeljenje objekata i injekcijske radove, koja je sudjelovala u izgradnji mnogih objekata kako u Hrvatskoj tako i u inozemstvu. Sa navedenim tvrtkama ugovoreni su radovi za sanaciju brane.

Hrvatska elektroprivreda kao Investitor ima veliko iskustvo u nadzoru na izgradnji hidroenergetskih objekata, tako da s aspekta organizacije rukovođenja i nadzora na radovima sanacije brane nije bilo nikakvih poteškoća.

Jedinu ozbiljnu poteškoću predstavljala je blizina neprijatelja, od kojeg je prijetila stalna opasnost po živote ljudi i uništenje strojeva.

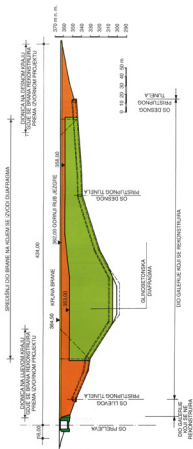
U travnju 1993. godine sačinjen je Program istražnih radova za utvrđivanje mjesta i stupnja oštećenja brane. Rezultati istražnih radova trebali su poslužiti za izradu tehničkog rješenja njezine sanacije. Međutim, zbog stalnog neprijateljskog djelovanja, predviđeni istražni radovi, osim geodetskog mjerenja slijeganja i pomaka, nisu se mogli izvesti.

Na osnovi vidljivih oštećenja, prikupljenih podataka o ponašanju brane nakon miniranja obrađena su varijantna rješenja sanacije brane, od kojih je prema kriteriju najmanjih troškova, a najveće pouzdanosti odabrano najpovoljnije.

Na Stručnom savjetu Hidro-građevinskog biroa Elektroprojekta održanom 14. lipnja 1993. godine prihvaćen je prijedlog sanacije brane, koji se sastoji u slijedećem, sl. 2 i 3:

- obnoviti injekcijsku galeriju, što predstavlja istražni rad koji će dati podatke o stanju glinene jezgre u područja najvećih opterećenja
- u središnjem dijelu brane izraditi vododrživu dijafragmu od plastičnog betona
- lijevi i desni kraj brane rekonstruirati prema izvornom projektu sa glinenom jezgrom
- tijelo brane u središnjem dijelu rekonstruirati od kote 353,00 m n.m., odnosno 358,00 m n.m. tako da se ukloni miniranjem oštećeni materijal brane i formira dovoljno široki prostor za izvedbu dijafragme od plastičnog betona
- uzvodni pokos poravnavanjem dovesti u projektirani nagib
- obnoviti preliv i pogonsku kadicu zatvarača.

Ovo rješenje usvojeno je 25. lipnja 1993. godine u Splitu od strane "Komisije za stručnu ocjenu elaborata varijante sanacije brane Peruća", koju je imenovala Hrvatska elektroprivreda.



Slika 3 Uvojeno rješenje - uzdužni presjek

Od tada teku sve pripreme za obnovu injekcijske galerije, koja je počela 1. kolovoza 1993. godine ulaskom u pristupni tunel br. 2, sta: 2+73,25. Do 1. srpnja 1994. godine završena je sanacija galerije do sta: 1+33,47, što uključuje i središnji najniži dio galerije s kotom dna 305,00 m n.m. Obnova galerije prema lijevom kraju brane do sta: 0+90,58 nije nastavljena jer je ocijenjeno, da bi na tom dijelu moglo doći do pomaka i odrona materijala što bi ugrozilo živote radnika. Planirano je da se obnova galerije s desnog kraja brane nastavi nakon što se obnovi galerija na lijevom kraju brane u otvorenom iskopu.

Radovi na uklanjanju materijala gornjeg dijela brane do kote 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m. te u nastavku iskop na lijevom i desnom kraju trebali su početi u veljači 1994. godine, no zbog stalnih neprijateljskih napada počeli su tek 6. travnja 1994. godine. Ovi su radovi završeni na lijevom kraju brane 1. srpnja 1994. godine, a na desnom 15. rujna 1994. godine.

Nakon završenog iskopa lijevog kraja brane, foto 2, počela je na tom dijelu rekonstrukcija injekcijske galerije i to od sta: 0+34,55 do sta: 0+90,58.

Iskop lijevog kraja brane omogućio je nastavak radova na iskopu i rekonstrukciji injekcijske galerije od sta: 0+90,58 do sta: 1+30,00, koju je trebalo izvesti tunelskom metodom.

Radovi na rekonstrukciji injekcijske galerije bili su prioritetni. Trebalo je što prije početi s nasipavanjem lijevog kraja brane, budući je bilo predviđeno da pripremni radovi za izvedbu dijafragme počnu početkom rujna 1994. godine.

Prema tome, trebalo je uskladiti i osigurati neometano odvijanje radova na izvedbi injekcijske galerije na otvorenom dijelu lijevog kraja brane, sta: 0+34,55 do sta: 0+90,58; nastaviti tunelskom metodom rekonstrukciju injekcijske galerije od otvorenog dijela prema središnjem dijelu brane, sta: 0+90,58 do sta: 1+30,00, te početi s ugradnjom materijala na lijevom kraju, od sta: 0+90,58 do preljevna građevine i to od kote 328,56 m n.m. do kote 353,00 m n.m.

Da bi se mogao odvijati paralelni rad na rekonstrukciji vanjskog i tunelskog dijela injekcijske galerije i izbjeći utjecaj rada vibrovaljaka kod ugradnje materijala na rekonstrukciju dijela galerije koja se izvodi tunelskom metodom, najniži dio vanjskog dijela galerije od sta: 0+80,50 do sta: 0+85,80 izveden je posljednji. Kroz taj dio obavljao se je odvoz materijala iskopa iz galerije od sta: 0+90,58 do sta: 0+93,00 koja se rekonstruirala tunelskom metodom, foto 4.

Radovi na ovom kritičnom dijelu rekonstrukcije galerije završeni su 21. srpnja 1994. godine, pa je ugradnja materijala na lijevom kraju počela 28. srpnja 1994. godine.

Nakon završenog iskopa na kruni brane do kote 353,00 m n.m. provedeni su istražni radovi I faze u vremenu od 12. svibnja 1994. do 28. lipnja 1994. godine.



Foto 2. 2. srpnja 1994 godine - Lijevi kraj brane - potpuno završen iskop



Foto 3. 15. rujna 1994 godine - Desni kraj brane
- potpuno završen iskop



Foto 4. Iskop injekcijske galerije od sta: 0+90,58 do sta: 0+93,00 u vremenu od 12. srpnja 1994 do 28. srpnja 1994 kroz nebetonirani dio galerije

Nakon provedenih istraţnih radova I faze počeli su radovi na konsolidacijskom injektiranju jezgre po trasi dijafragme. Ovi su radovi počeli 1. srpnja 1994 god. a završeni 7. listopada 1994 godine. Izvođenje ovih radova odvijalo se prema programu i nisu ometali odvijanje ostalih radova na sanaciji.

Istražne radove i konsolidacijsko injektiranje jezgre po trasi dijafragme izvela je tvrtka "Geotehnika" Zagreb.

Za izvođenje radova na izgradnji vodo r ive dijafragme od plastičnog betona Hrvatska elektroprivreda sklopila je ugovor sa tvrtkom "Geotehnika" Zagreb i "Bauer" Schrob nhausen dana 8. kolovoza 1994 godine, koji su se obvezali da će radove izvesti za 6 mjeseci.

Pripremni radovi su počeli 19. rujna 1994 godine, a u međuvremenu je instalirana trafostanica 10/04 kW 630 kVA.

Radovi na iskopu za vododrživu dijafragmu počeli su 13. listopada 1994 godine od panela P1, sta: 3+03,77 do sta: 3+10,77.

S izvedbom dijafragme započelo se je na ovom panelu radi toga, jer nije bila završena ugradnja materijala na desnom kraju do kote 358,00 m n.m., a na lijevom do kote 353,00 m n.m., na kojem nije bila niti obnovljena injekcijska galerija.

Dana 17. listopada 1994 godine prilikom iskopa panela P7, od sta: 2+47,97 do sta: 2+54,97 došlo je do prodora isplake u injekcijsku galeriju.

Iako je provedeno konsolidacijsko injektiranje jezgre po trasi dijafragme sve šupljine nisa bile zapunjene, te je došlo do gubitka isplake i njezinog procjeđivanja u galeriju.

Odmah se pristupilo betoniranju iskopanog panela. Gusta smjesa plastičnog betona zapunila je sve šupljine, pa nije došlo do ponovnog procjeđivanja cemento-bentonitne suspenzije u galeriju.

Da bi se spriječio ponovno prodiranje isplake u galeriju provedeno je kontaktno injektiranje spoja betonske obloge galerije i glinene jezgre od sta: 1+82,00 do sta: 2+77,00. Injekcijski profili postavljeni su na razmaku od 10 m, a naknadno progušćeni na 2 m.



Foto 5. 29. studenog 1994 godine - Izvođenje glinobetonske dijafragme sta: 1+55,00 i izvođenje tijela brane na lijevom kraju; kota 347,00 m n.m.

Ove mjere poduzete su i radi toga, što se je istovremeno radilo na obnovi injekcijske galerije na središnjem dijelu brane od sta: 1+33,47 prema lijevom kraju brane pa je svako veće prodiranje isplake moglo dovesti u opasnost živote radnika, koji su radili u najnižem dijelu galerije.

Poduzete su dodatne mjere opreza, pa je radi toga svaki iskop za dijafragmu morao biti praćen od stručne osobe "Geotehika-Bauer" da ne dođe do proboja isplake u galeriju.

Nakon provedenog kontaktnog injektiranja nije bilo prodora bentonitine isplake u injekcijsku galeriju.

Kako su se radovi na izgradnji vododržive dijafragme odvijali brže nego što je bilo planirano, došlo je do vremenskih neusklađenosti pojedinih radova, a to su:

- brana nije bila izvedena do kota sa kojih se izvodi dijafragma, a to su na lijevom kraju 353,00 m n.m, a na desnom 358,00 m n.m.
- injekcijska galerija nije bila obnovljena od sta: 1+22,00 do sta: 1+33,47
- iskop panela dijafragme P16 od sta: 1+64,27 do sta: 1+71,27 odvijao se je u isto vrijeme kad i radovi na obnovi galerije od sta: 1+26,00 do sta: 1+32,47.



Foto 6. 16. studenog 1994 godine - Spojena je injekcijska galerija sa desnog i lijevog kraja brane na sta: 1+28,00

Udaljenost između iskopa za dijafragmu i iskopa za rekonstrukcija galerije iznosila je svega 32 m, pa je postojala opasnost da isplaka kroz nezapunjene pukotine jezgre brane proдре u galeriju.

Pri tome je očeљavajuća okolnost bila ta, što drenažni odvod iz injekcijske galerije na stac 1+42,00 nije bio očišćen, tako da su se voda i isplaka morale crpkama evakuirati kroz galeriju i pristupni hodnik br. 2.

Zahvaljujući dobroj organizaciji i povoljnom vremenu za ugradnju gline uspјelo se je završiti na vrijeme sve radove koji su bili vezani za neometan i pravovremeni završetak radova na izvedbi dijafragme a to su:

- ugradnja materijala desnog kraja brane na kotu 358,00 m n.m. od stac 3+13,00 do stac 3+47,97 koje je završeno 27. listopada 1994 godine,
- ugradnja materijala lijevog kraja brane na kotu 353,00 m n.m. koje je završeno 19. prosinca 1994 godine
- iskopom injekcijske galerije s lijevog kraja brane na sta: 1+28, dana 16. studenog 1994. godine ostvaren je spoj s rekonstruiranim dijelom galerije, foto 6, a betoniranje obloga galerije na tom dijelu završeno 24. studenog 1994 godine.



Foto 7. Radovi na izgradnji tijela brane iznad kota 353,00 m n.m. i 358,00 m n.m.

Dana 10. siječnja 1995. godine završeni su radovi na izgradnji dijafragme, što se može smatrati završetkom sanacije brane Peruća do kote 353,00 m n.m. na lijevom, odnosno do kote 358,00 m n.m. na desnom kraju brane.

Tijekom izvedbe dijafragme kontrolu kvalitete ugrađenog plastičnog betona provodili su Izvoditelj "Geotehnika-Bauer" i Zavod za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu.

Ispitivanja integriteta dijafragme proveo je "Intergeo"- "Interconsul" Salzburg od 22. travnja do 1. svibnja 1995. godine.

Radovi na rekonstrukciji preljevne građevine do završetka dijafragme odvijali su se otežano, jer bi oni ometali radove na izgradnji tijela brane i izvedbi dijafragme, koji su bili prioritetni. Radi toga su radovi na uklanjanju dijelova preljevne građevine, koja je razrušena prilikom miniranja brane, počeli nakon završetka izvedbe dijafragme. Betoniranje nove preljevne građevine počelo je 13. travnja 1995. godine.

Početkom svibnja 1995. kada su to dozvolile vremenske prilike u odnosu na ugradnju gline, počeli su radovi na ugradnji materijala u tijelo brane od kote 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m. do krune na koti 364,50 m n.m. Ugradnja materijala u tijelo brane završeno je u rujnu 1995. godine.



Foto 8. 21. lipnja 1995. godine - Radovi na preljevnoj građevini



Foto 2. 1. srpnja 1995. - Radovi na preljevnoj građevini i ugradnji materijala u tijelo brane.
Kota u akumulacijskom jezeru 352,76 m n.m.

ORGANIZACIJA IZVOĐENJA RADOVA OBZIROM NA BLIZINU NEPRIJATELJSKOG TOPNIŠTVA

Nakon miniranja brane bilo je potrebno provesti istražne radove da bi se mogao izraditi projekt sanacije. Istražni radovi koji su bili predviđeni da se izveđa sa krune brane nisu se mogli izvoditi zbog blizine neprijateljskog topništva. Sa svih uporišta često su se čule minobacačke i tenkovske granate u Hrvacama i Sinju, tako da su se do početka kolovoza izvodili samo radovi na geodetskom snimanju i vizuelnom pregledu brane.

Uočena je pojava kaverni i to:

- između sta: 1+52,16 i sta: 1+62,21; 16. veljače 1993 god.
- između sta: 0+82,00 i sta: 0+89,00; 4. ožujka 1993 god., foto 23
- na sta: 3+62,00; 2. svibnja 1993 god., foto 24
- i na sta: 3+42,00; 3. lipnja 1993 god., foto 24

Kaverne su imale oblik lijevka, a dubina im je sezala od krune brane do injekcijske galerije. Pretpostavke da se protežu do galerije potvrđene su i u toku obnove galerije.

Od 1. kolovoza 1993 godine organizirano je gradilište za rad na obnovi injekcijske galerije. Organizacija je postavljena tako da gradilište bude koliko je god moguće manje izloženo neprijateljskom uočavanju, jer postoji dobra vidljivost od njihovih položaja do brane. Iako je bilo svakodnevnog djelovanja minobacačima i tenkovima po širem području Peruća, 2. listopada 1993 godine jedna granata eksplodirala je blizu autobusa sa radnicima "Konstruktor-Inženjeringa" koji su radili na sanaciji injekcijske galerije, a druga na strojnici HE Peruća, foto 10.



Foto 10. 2. rujna 1993 godine 7¹⁸ Direktna pogodak neprijateljskog topništva na strojnicu HE Peruća

Na kruni brane nije se mogao organizirati rad zbog neprijateljskog uočavanja i mogućeg djelovanja. Da se moglo raditi na iskopu lijevog kraja brane utvrdilo bi se stanje injekcijske galerije od sta: 0+45,00 do sta: 1+30,00. Time bi se ubrzali radovi na iskopu oštećenih dijelova brane, što bi ukupno skratilo vrijeme sanacije.

Tokom mjeseca listopada i studenog 1993 godine dobivena su jamstva od UNPROFOR-a da se može pristupiti izvođenju radova sa krune brane.

U siječnju 1994. godine izgrađena su skloništa za radnike, foto 11.



**Foto 11. Siječanj 1994 godine
Jedno od skloništa za radnike**

15. veljače 1994 godine počeo je iskop sa krune brane koji se odvijao do 19. veljače 1994 godine u 11³⁰ sati, kada je neprijateljsko topništvo sa 5 projektila pogodilo uže područje brane Peruća, foto 12, na sreću bez većih posljedica. Usljedilo je neprijateljsko djelovanje dana 21. veljače 1994 god. kao i 10. ožujka 1994 god. pa je prekinut rad na iskopu tijela brane, jer su granate eksplodirale u neposrednoj blizini radnika i strojeva.

Nakon što je potpisan sporazum o prekidu vatre između hrvatskih vlasti i pobunjenih Srba 5. travnja 1994 godine Srbi su povukli svoje topništvo na 10 odnosno 20 km. Tako je 6. travnja 1994 godine počelo uklanjanje oštećenih dijelova brane od kada se radovi odvijaju neometano uz maksimalni oprez.

Važno je napomenuti da od 28. siječnja 1993 godine kada je aktiviran eksploziv u brani Peruća do kraja radova na njezinoj sanaciji ni jedan radnik bilo koje tvrtke, koje su sudjelovale na sanaciji nije odbio doći izvršavati svoj zadatak kako bi se sanacija što prije i što uspješnije realizirala.



1	02.09.93 7 ^h
①	7 ^h
②	7 ^h
2	19.02.94. 11 ^h
③	③
④	④
⑤	⑤
3	21.02.94. 15 ^h
⑥	⑥
⑦	⑦
⑧	⑧
⑨	⑨
4	10.03.94. 12 ^h
⑩	⑩
⑪	⑪
⑫	⑫
⑬	⑬
⑭	⑭

4 5

Foto 12. Mjesta gdje su eksplodirale granate neprijateljskog topništva

ISTRAŽNI RADOVI

U travnju 1993. godine sačinjen je Program istražnih radova I faze u kojem su obuhvaćeni geotehnički i geofizički istražni radovi potrebni da se ustanovi stanje brane Peruća nakon njenog oštećenja, koje je nastalo kao posljedica miniranja. Rezultati istražnih radova trebali su biti podloga za izradu tehničkog rješenja sanacije brane.

Kako zbog ratnih prilika njihovo izvođenje nije bilo moguće, na sjednici Stručnog kolegija za sanaciju brane Peruća održanog 7. prosinca 1993. godine odlučeno je da se istražni radovi izvedu s kote 353,00 kada se ukloni gornji dio brane.

Cilj istražnih radova bio je da se utvrdi opseg i stupanj oštećenja tijela brane, temeljne stijene, injekcijske galerije i injekcijske zavjese i korigiraju pretpostavke na osnovi kojih je izrađeno tehničko rješenje sanacije brane.

Ove radove izvelo je poduzeće "Geotehnika" Zagreb i "MOHO" Zagreb u vremenu od 5. travnja 1994 godine kada su počeli pripremni radovi, odnosno 12. svibnja 1994 godine kada su počeli radovi na bušenju istražnih bušotina, do 28. lipnja 1994 godine.

OBNOVA INJEKCIJSKE GALERIJE

Nakon što je prihvaćeno rješenje sanacije brane Peruća pristupilo se pripremama za obnovu injekcijske galerije. Njena obnova predviđena je iz nekoliko razloga, a glavni je što njezina obnova predstavlja istražni rad koji će dati uvid u oštećenje glinene jezgre u područja najvećih hidrostatskih pritisaka na cijeloj dužini brane uključujući i mjesta gdje je brana minirana.

Iz obnovljene galerije moći će se izvesti kontaktno injektiranje glinobetonске dijafragme i temeljnog tla, te konsolidacijsko injektiranje . U toku eksploatacije objekta iz galerije će se intervenirati u slučaju pojave procjeđivanja vode u galeriju.

Kako je detaljan prikaz oštećenja u injekcijskoj galeriji i izvođenje sanacije dato u posebnom članku ovdje će se dati samo kratak osvrt koji je vezan uz ostale radove na sanaciji brane.



Foto 13. Početak radova na obnovi injekcijske galerije



Foto 14,
2. srpnja 1994. godine
Lijevi kraj brane i
injekcijska galerija

Foto 15,
10. srpnja 1994. godine
- Injekcijska galerija
nakon završenog iskopa
na sta: 3+42,00
- desni kraj brane





Foto 16. Pogled na gradilišne objekte za rekonstrukciju injekcijske galerije



Foto 17. Pogled na ulaz pristupnog hodnika br. 2

Radovi na obnovi injekcijske galerije počeli su 1. kolovoza 1993. godine ulaskom kroz pristupni hodnik br. 2. Iako je bilo predviđeno da će galerija biti sanirana za 5-6 mjeseci oštećenja su bila daleko veća od očekivanih. Veći opseg radova i nemogućnost ulaska u galeriju kroz pristupni hodnik br. 3 na lijevom kraju brane produžili su ove radove, a time i ukupnu sanaciju na 16 mjeseci rada u tri smjene.

Obnova injekcijske galerije predstavljala je najteži tunelski rad i jedan je od najtežih građevinskih radova na sanaciji brane.

Nepoznanice koje su svakodnevno pratile sve sudionike na sanaciji injekcijske galerije bile su:

- da li još ima neeksplodiranih zaostalih minsko-eksplozivnih naprava
- da li ima kaverni u glinenoj jezgri
- kolika će biti procjeđivanja u galeriju
- nemogućnost upotrebe strojeva za iskop
- česta označavanja opće opasnosti i granatiranja
- povezanost ovih radova sa ostalim radovima

Organizacija gradilišta

Organizacija gradilišta za obnovu injekcijske galerije prilagođena je uvjetima na gradilištu. Posebnu pozornost trebalo je dati što je manje moguće odvijanju saobraćaja i kretanju ljudi izvan galerije, jer je vidljivost sa neprijateljskih uporišta bila dobra.

Ispred pristupnog hodnika br. 2 na desnom kraju ureden je plato za pogonske i radne objekte, betonaru, aparat za mlazni beton, ventilatorsku i kompresorsku stanicu.

Organizacija gradilišta za injekcijske galerije data je u članku "Prikaz oštećenja i izvođenje sanacije injekcijske galerije".

Sam ulaz u pristupni hodnik br. 2 i obnova do spoja s galerijom nije predstavljala poteškoće. Na samom spoju bilo je dosta problema zbog urušenosti. Obnova od spoja odvijala se prema najdubljem dijelu galerije tj. prema ravnom dijelu na koti 305.000 m n.m.

Optimizam da se galerija može sanirati za 5-6 mjeseci davao je pogled sa spoja prema dijelu galerije na desnom kraju brane.

Za obnovu galerije do sta: 2+00,00 nije bilo većih poteškoća. Ulaskom u potpuno urušeni dio galerije otežalo je rad pa je i napredovanje bilo 40 cm na dan.

Dodatnu poteškoću predstavljala je voda koja je dotjecala. Maksimalni dotok iznosio je 130 l/min pri koti akumulacijskog jezera 330,00 m n.m. Daljnje napredovanje bilo je otežano i nailaskom na kavernu u tjemenu galerije na sta: 1+90,35.

Na srednjem dijelu galerije od sta: 1+52,00 do sta: 1+62,00 naišlo se na velika oštećenja galerije uključivo njezinog dna.



Foto 18.

1. svibnja 1994 godine
sta: 1+58,00 - ispitivanje pomoću
bušotine dužine 11,0 m da se vidi
da li ima zarobljene vode i kakav
je sastav materijala.

Do 1. srpnja 1994 godine završena je sanacija injekcijske galerije na ravnom dijelu, kota dna 305,00 m n.m, do sta: 1+33,47. Daljnja obnova sa ovog dijela prema lijevom kraju do sta: 0+90,58 obustavljena je radi opasnosti od odrona i pomaka materijala.

Na sta: 1+42,00 ostavljen je otvor u betonu 2,0 x 1,0 m na mjestu odakle ide drenažna cijev do rasklopišta HE Peruća.

Ulaz je bio potpuno zarušten. Daljna obnova drenažnog odvoda počela je u rujnu 1994 godine, foto 19.



Foto 19. 21. rujna 1994 godine - Iskop drenažnog odvoda iz galerije
na sta: 1+42,00

Iskop i obnova galerije sa lijevog kraja od sta: 0+90,58 počela je 12. srpnja 1994 godine. Od sta: 1+16,30 prema desnom kraju brane galerija je bila potpuno urušena.

Iskop i obnova do sta: 1+24,00 završena je 26. listopada 1994 godine pa je počela i obnova od sta: 1+33,47 s desnog kraja brane. Napredovanje sa obje strane bilo je do sta: 1+28,00 gdje je izvršen proboj 6. studenog 1994 godine, foto 6. Betoniranje ovog zadnjeg dijela od sta: 1+26,00 do sta: 1+35,00 završeno je 24. studenog 1994 godine pa je tako završena obnova injekcijske galerije.



Foto 20. 19. listopada 1994 godine - Priprema oplata za betoniranje dionice od sta: I+17,53 do sta: I+22,78

Ukupno je obnovljeno 462,57 m galerije, a od toga:

- | | | | |
|-----|---|--|----------|
| (1) | - | potpuno novim betonom nakon iskopa lijevog i desnog kraja brane | 130,60 m |
| (2) | - | potpuno novim betonom uz tunelski iskop | 87,47 m |
| (3) | - | obnovljen svod galerije novim betonom nakon iskopa na desnom kraju brane | 42,00 m |
| (4) | - | obnovljeno mlaznim betonom | 202,50 m |



Foto 21. 11. listopada 1994 godine - Pogled na pristupni hodnik do injekcijske galerije br. 3 na lijevom kraju brane



Foto 22. 21. srpnja 1994 godine - Izvedba injekcijske galerije na desnom kraju brane

REKONSTRUKCIJA KRAJEVA I GORNJE DIJELA BRANE

Opis rekonstrukcije

Lijevi i desni kraj kao i gornji dio na središnjem dijelu brane u visini 5-10 m miniranjem su bili toliko oštećeni, da je na ovim dijelovima trebalo provesti rekonstrukciju brane, koja se sastojala od uklanjanja i ponovne ugradnje materijala.

Lijevi kraj brane rekonstruiran je od sta: 0+25,00 do sta: 0+90,58. Kota dna iskopa na sta: 0+90,58 uzvodno od galerije bila je 328,56 m n.m., a nizvodno 330,25 m n.m. Na ovom dijelu uklonjen je beton galerije koja je bila potpuno uništena. Nakon završenog iskopa, injekcijska galerija je na tom dijelu ponovno izgrađena.

Desni kraj brane rekonstruiran je od sta: 3+42,00 do sta: 4+50,00 pri čemu najniža kota iskopa na sta: 3+42,00 iznosi 347,50 m n.m. I na ovom je dijelu obnovljena injekcijska galerija od sta: 3+42,00 do sta: 3+87,00 kao i pristup do galerije.

Gornji dio na središnjem dijelu brane od sta: 1+13,00 do sta: 1+83,00 uklonjen je do kote 353,00 m n.m, a od sta: 2+38,00 do sta: 3+64,00 uklonjen je do kote 358,00 m n.m. Ova dva dijela povezana su prijelaznom rampom.



Foto 23. Krater od sta: 0+82,00 do sta: 0+89,00



Foto 24. Pogled od desnog kraja brane prema kraterima
 sta: 3+62,00 - otvorio se dana 2. svibnja 1993 godine
 sta: 3+42,00 - otvorio se dana 3. lipnja 1993 godine

Na dijelu od sta: 1+13,00 do sta: 1+83,00 nakon uklanjanja materijala brane formiran je plato širine 23 m, a od sta: 2+38,00 do sta: 3+29,00 plato širine 38 m s kojeg se izvodila dijafragma. Od sta: 1+83,00 do sta: 2+38,00 plato je promjenljive širine od 23 do 38 metara.

Paralelno sa uklanjanjem krajeva i sredšnjeg dijela brane uklanjali su se i dijelovi prečevne građevine i to: most, desni upornjak, dio desnog zida brzotoka, oštećena hidromehanička oprema i pogonska kućica prečjeva.

Iskopani materijal prvih 5 m tijela brane ugrađen je u radni plato na desnom kraju do kote 358,00 m n.m. na kojem su locirani pogoni za izvedbu dijafragme. Iskopani materijal od kote 358,00 m n.m. do kote 353,00 m.n.m, separiran je i odvezen na posebne deponije. Položaj deponija, uključivo i smještaj gradilišnih pogona prikazan je na sl. 4.

Organizacija gradilišta

Iako se počelo sa uklanjanjem središnjeg dijela i krajeva brane 15. veljače 1994. godine zbog neprijateljskog djelovanja po brani radovi na uklanjanju morali su biti prekinuti. Radovi su nastavljani tek 6. travnja 1994. godine, odnosno nakon potpisivanja sporazuma o prekidu neprijateljstava između hrvatskih vlasti i pobunjenih Srba 5. travnja 1994. godine. Od tada se radovi na sanaciji brane odvijaju neometano.

Organizacija gradilišta postavljena je tako da se cijeli proces odvija osim na brani i na desnoj obali akumulacijskog jezera uzvodno od brane. Na ovom području obnovljene su pristupne ceste koje su služile kod izgradnje brane. Uzvodno od brane na desnom boku akumulacijskog jezera nalazi se i kamenolom koji je korišten i kod izgradnje brane.

Iskopani materijal deponiran je na prostoru kamenoloma na koti 343,00 m n.m.
Glina je deponirana na desnom boku na koti 353,00 m n.m.

Radovi na iskupu lijevog i desnog kraja te središnjeg dijela brane obuhvatili su:

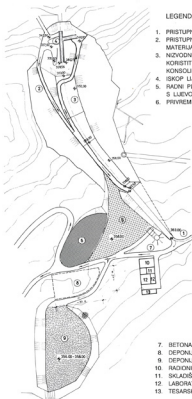
- Iskop zaglinjenog kamenog i sličnog miješanog materijala s krune gornjeg dijela brane i odvoz na stalnu ili privremenu deponiju.
- Iskop gline iz jezgre i odvoz na privremenu deponiju radi ponovne ugradnje.
- Iskop filtarskog materijala i odvoz na stalnu deponiju; radi izmiješanosti nije bilo moguće izvršiti selektiranje ovog materijala, pa radi toga niti koristiti za ponovnu ugradnju.
- Iskop kamenog materijala iz uzvodne i nizvodne potporne zone, te odvoz na privremenu deponiju radi ponovne ugradnje.

Važno je napomenuti da su sve pretpostavke iz projekta o oštećenom dijelu galerije na lijevom i desnom kraju brane osvarene u potpunosti.

Uklanjanje krajeva i gornjeg dijela brane

Izvođenje radova na uklanjanju materijala brane može se podijeliti u tri faze i to:

I faza - uklanjanje materijala sa središnjeg dijela brane do kote 358,00 m n.m. odnosno 353,00 m n.m.



LEGENDA

1. PRISTUPNA CESTA NA KRUNU BRANE
2. PRISTUPNA RAMPA ZA IZVLAČENJE MATERIJALA S LJEVOG BOKA BRANE
3. NIZVODNI PROSTOR NA KRUNI BRANE KORISTIT ĆE SE KAD RADNI PLATO KOD IZVOĐENJA KONSOLIDACIJSKOG INJEKTIRANJA JEZGRE
4. ISKOP LJEVOG BOKA BRANE
5. RADNI PLATO FORMIRAN OD MATERIJALA S LJEVOG BOKA BRANE
6. PRIVREMENA DEPONJA GLINE

7. BETONARNA
8. DEPONJA FILTERA
9. DEPONJA KAMENOG MATERIJALA
10. RADIONICA
11. SKLADIŠTE
12. LABORATORIJ
13. TESARSKI POGON

Slika 4. Organizacija gradilišta za uklanjanje i izgradnju tijela brane

Iskopani materijal do ovih kota korišten je za formiranje radnog platoa za potrebe pristupa na centralni dio brane kako bi se nesmetano mogli odvijati radovi na desnom i lijevom kraju te radovi na središnjem dijelu brane.

Ovaj plato i pristupna cesta na desnom kraju je na koti 358,00 m n.m. Od početka kolovoza služio je za potrebe izvođenja dijafragme.

Ukupno je uklonjeno:

- postojećeg asfaltnog sloja sa kruna brane koji je deponiran
nizvodno od brane 1.800 m²
- zaglinjenog i sličnog materijala 25.730 m³
- iz glinene jezgre od kote 362,00 m n.m. do kote 358,00 m n.m. . . . 3.410 m³
- kamenog i filterarskog materijala iz tijela brane
od kote 358,00 m n.m. do kote 353,00 m n.m. 24.885 m³
- materijala iz glinene jezgre od 358,00 m n.m. do kote 353,00 m n.m. . 4.900 m³

II faza - uklanjanje materijala sa lijevog kraja brane do postojećeg terena i to na sta: 0+90,58 do kote 328,56 m n.m. uzvodno od injekcijske galerije odnosno 330,25 m n.m. nizvodno od galerije.

Prilaz u građevinsku jamu s platoa na koti 353,00 m n.m. do konačne kote iskopa na koti 328,56 m n.m. uzvodno od galerije odnosno 330,25 m n.m. nizvodno od galerije ostvaren je pomoću prilaznih rampi, koje su izrađene na uzvodnom i nizvodnom potpornom tijelu brane, foto 25 i 26.

Pokos prema centralnom dijelu brane i potpornim zonama izveden je u nagibu 1:1, a širina iskopa u dnu je oko 14 metara.

Nizvodni pokos zbog nešto strmijeg nagiba zaštićen je mrežom da ne bi došlo do odrona materijala prema injekcijskoj galeriji.

Ukupno je iskopano i odvezeno sa ovog dijela brane od kote 353,00 m n.m. do kote 328,56 m n.m. uzvodno od galerije odnosno 330,25 m n.m. nizvodno od galerije:

- kamenog i filterarskog materijala 42.602 m³
- gline iz jezgre 6.526 m³



Foto 25. Iskop na lijevom kraju brane -
Transport se odvija preko rampe na uzvodnoj strani



Foto 26. Prilazna rampa prema lijevom kraju brane

III faza - uklanjanje materijala sa desnog kraja brane od kote 358,00 m n.m. do prirodnog terena.

Budući da je brana na ovom dijelu niska, na najvišem dijelu visina iznosi 15,5 m, materijal brane iskopan je u cijelom poprečnom presjeku.

Odvodnje iskopanog materijala obavljeno je preko rampe na prilaznu cestu prema brani.

Ukupno je iskopano i odveženo od kote 358,00 m n.m. do kote 347,50 m n.m.:

- kamenog i filterškog materijala 10.577 m³
- materijala iz glinene jezgre 4.468 m³
- iskop temeljnog tla na kontaktu glinene jezgre i filtera sa sraslim tlom 1.272 m³



Foto 27. 2. srpnja 1994 Desni kraj brane - oštećenja tjemena injeckijske galerije od sta: 3+42,00

Nakon uklanjanja lijevog i desnog kraja brane moglo se vidjeti da su sve pretpostavke o oštećenosti injeckijske galerije do ovih stacionaža bile potvrđene.

Također je vidljivo da stanje iskopa u ova dva poprečna presjeka na lijevom i desnom kraju brane ne ostavljaju dojam da je tijelo brane koje se ne uklanja doživjelo znatnija oštećenja.



Foto 28. 2. srpnja 1994 - Završen iskop lijevog kraja brane



Foto 29. 2. srpnja 1994 Desni kraj brane - uklanjanje oštećenih dijelova galerije

Ono što nije vidljivo iz ovih presjeka, to je tijelo brane od sta: 1+52,00 do sta: 1+62,00 gdje je u injekcijskoj galeriji bio postavljen i aktiviran eksploziv.

Ukupao je iz tijela brane iskopano i odvezeno 124.672 m³ gline, filternog i kamenog materijala, što predstavlja oko 14% njezinog ukupnog volumena.

Radovi na iskopu i odvozu materijala iz tijela brane do kota 358,00 m n.m. odnosno 353,00 m n.m. kao i iskop i odvoz na lijevom kraju brane do kote 328,56 odvijali su se od 6. srpnja 1994 do 1. srpnja 1994 godine, dok su radovi na iskopu i odvozu materijala sa desnog kraja brane do kote 347,50 m n.m. završeni do 15. srpnja 1994 godine, foto 30 i 31.

Ove radove izvelo je poduzeće "Konstruktor-Inženjering" iz Splita.

Ugradnja materijala u tijelo brane

Kako je već opisano brana Peruća rekonstruirana je na dijelovima sa najvećim ošteđenjima i to:

- lijevi kraj brane od sta: 0+25,00 do sta: 0+90,58 u punoj visini
- desni kraj brane od sta: 3+42,00 do kraja brane, sta: 4+50 u punoj visini



Foto 30. 15. srpnja 1994 godine Desni kraj brane - potpuno završen iskop



Foto 31. 1. srpnja 1994 godine - Lijevi kraj brane
- potpuno završen iskop

- gornji dio brane do kote 353,00 m n.m. od sta: 1+13,00 do sta: 1+83,00 odnosno do kote 358,00 m n.m. od sta: 2+38,00 do sta: 3+29,00.
- između sta: 1+38,00 i sta. 2+38,00 iskop je obavljen stepenasto, a samim time i ugradnja materijala u tijelo brane.

Ostali dio brane u središnjem dijelu od sta: 0+87,32 do sta: 3+47,97 nije rekonstruiran već je u njemu izvedena vododrživa dijafragma od plastičnog betona.

Tijelo brane građeno je od:

- glinene jezgre
- uzvodnih i nizvodnih filtarskih slojeva
- uzvodne i nizvodne potporne zone od kamenog materijala
- krune brane od zaglinjenog kamenog materijala.

Uzvodni pokos brane izveden je od krupnih kamenih blokova u debljini od 1,5 m odnosno horizontalnoj širini 2,7 m u nagibu 1:1,45. Nagib nizvodnog pokosa brane iznosi 1:1,5. Širina izvedene krune brane na koti 364,50 m n.m. iznosi 8,0 m.

Glinena jezgra izgrađena je asimetrično u odnosu na krunu brane. U dna jezgre nalazi se rekonstruirana injekcijska galerija.

Gornja kota glinene jezgre je 363,00 m n.m.

Od kote 363,00 m n.m. kao zaštita glinenoj jezgri od isušivanja do kote 364,50 m n.m. ugrađen je zaglinjeni šljunak.

Na najdubljem dijelu na lijevom kraju temelj glinene jezgre nalazi se na koti 328,56 m n.m. na uzvodnoj, odnosno 330,25 m n.m. na nizvodnoj strani injekcijske galerije.

Ovdje je glinena jezgra široka oko 12,5 metara. Kraj iskopa koji je ujedno i početak ugradnje materijala u tijelo brane je na stacionaži 0+90,58, foto 31.

Na najdubljem dijelu na desnom kraju na stacionaži 3+42,00 dna glinene jezgre je na koti 347,50 m n.m. a glinena jezgra široka je oko 9,0 m, foto 30.

Glinena jezgra sa uzvodne i nizvodne strane zaštićena je filtarskim slojevima širine 2,0 m. Uzvodni filtar je u kruni brane u zonama malih hidrostatskih pritisaka sužen na 1,5 m.

Uzvodna i nizvodna potporna zona izvedene su od kamenog materijala djelomično iz tijela brane koji je deponiran prilikom iskopa, a ostali dio iz kamenoloma udaljenog oko 700 m od sredine brane.



Foto 32.

2. kolovoza 1994. godine
 - Pogled na lijevi kraj brane
 - početak nasipavanja
 nizvodno od injekcijske
 galerije

Foto 33.

12. kolovoza 1994. godine
 - Početak nasipavanja gline
 na desnom kraju brane
 kota 347,50 m n.m.





Foto 34. 7. rujna 1994 godine - Ugradnja materijala u lijevi kraj brane, kota 338,50 m n.m.



Foto 35. 12. kolovoza 1994 godine - Početak ugradnje gline na desnom kraju brane

Proširenje nizvodne potporne zone u širini od 5,0 m izvedeno je od kamenog materijala s bočnim stepenastim zasjecanjem u postojeće tijelo brane.

Ugrađeni materijali u tijelo brane

Materijali korišteni za izvedbu tijela brane su:

- glina za jezgru brane
- kameni materijal za filtre
- kameni materijal za potporne zone
- zaglinjeni materijal za izvedbu krune brane.

Kadu je izvršen iskop središnjeg dijela brane od 5,0 do 10,0 m te i lijevi kraj brane do kote 328,56 m n.m., a desni kraj do kote 347,50 m n.m. materijal se odvajao u posebne deponije i ponovno ugrađivao.

U tijelo brane ugrađeni su instrumenti za tehnička promatranja što je dato u posebnom članku.

Na nizvodnoj kosini brane i kruni brane ugrađeni su repéri kojim će se pratiti deformacije brane.

Program kontrole i osiguranja kvalitete obrađen je u članku "Istražni radovi na nalazištima materijala i kontrola ugradnje u nasuti dio brane".

Glina

Materijal za izvođenje jezgre koja predstavlja vododrživi dio brane je glina srednje do visoke plastičnosti CUCH uzimana sa deponija u koju je odložena iz prethodno iskopane jezgre u količini od 10.000 m³ dok je preostali dio od 21.277 m³ dopremljen iz nalazišta Zorice.

Nabijena je ječevima u slojevima po 30 cm uz stalnu kontrolu vlažnosti i zbijenosti.

Ugrađene količine su:

- | | |
|--|-----------------------|
| - lijevi kraj brane od 328,50 m n.m. do 353,00 m n.m. | 6.344 m ³ |
| - desni kraj brane od 347,50 m n.m. do 358,00 m n.m. | 4.375 m ³ |
| - srednji dio brane od 357,00 m n.m. | |
| odnosno 358,00 m n.m. do kote 363,00 m n.m. | 20.558 m ³ |

Ukupno ugrađene količine gline su	31.277 m ³
-----------------------------------	-----------------------



Foto 36. 19. kolovoza 1994 godine - Nasipavanje na lijevom kraju brane, kota 334,10 m n.m.



Foto 37. 10. ožujka 1995 godine - Ugradnja materijala u nizvodnu potpornu zonu - proširenje brane za 5,0 m; kota 345,00 m n.m.



Foto 38. 1. rujna 1994. godine - Ugradnja gline na desnom kraju brane; kota 348,50 m n.m.

Filtarski materijal

Filtarski materijal služi da spriječi unutrašnju eroziju glinene jezgre. Filtarski materijal dovažen je iz kamenoloma Srinjine. Slojevi su nabijeni pomoću malog vibracionog valjka.

Ugrađene količine su:

-	lijevi kraj brane od kote 328,50 m n.m. do kote 353,00 m n.m.	4.820 m ³
-	desni kraj brane od kote 347,50 m n.m. do kote 358,00 m n.m.	2.150 m ³
-	srednji dio brane od kote 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m. do kote 363,00 m n.m.	9.016 m ³
Ukupno ugrađene količine filtarskog materijala		15.986 m ³



Foto 39. 23. rujna 1994. godine - Ugradnja filtera na desnom kraju brane; kota 353,20 m n.m.

Kameni materijal za uzvodnu i nizvodnu potpornu zonu

Kameni materijal različitog granulometrijskog sastava ugrađen je u potporne zone i zaštitu uzvodnog pokosa.

Materijal je dovažen iz deponije od iskopa tijela brane koji se obnavlja, a preostali dio iz kamenoloma na desnoj obali akumulacijskog jezera uzvodno od brane. U kamenolomu materijal je dobiven sistemom dubinskog miniranja. Kapacitet kamenoloma zadovoljio je potrebe ugradnje.

Ugrađene količine su:

- lijevi kraj brane od kote 330,00 m n.m. do kote 353,00 m n.m. 35.420 m³
- proširenje nizvodne potporne zone na lijevom kraju brane od kote 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m. na desnom kraju brane 36.775 m³
- lijevi kraj brane od kote 347,50 m n.m. do kote 358,00 m n.m. 7.740 m³
- srednji dio brane od kote 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m. do kote 364,50 odnosno 365,00 m n.m. 47.893 m³

Ukupno ugrađeni kameni materijal u obnovljeno tijelo brane	127.828 m ³
--	------------------------



Foto. 40. 27. veljače 1995. godine - Ugradnja kamenog materijala u nizvodnu potpornu zonu; kota 339,50 m n.m.

Zaglinjeni kameni materijal

Zaglinjeni kameni materijal služi za zaštitu vrha glinene jezgre brane od isušivanja. Ugrađen je u tijelo brane od kote 363,00 m n.m. do kote 364,50 m n.m., odnosno 365,00 m n.m. Sa uzvodne i nizvodne strane ovaj materijal zaštićen je slojem kamenog materijala. Ugrađen je u količini od 7.500 m³.

Uzvodni pokos brane

Na uzvodnom pokosu, gdje je brana rekonstruirana ugrađena je zaštita debljine 1,5 m od krupnih kamenih blokova koji su slagani bagerom. Kameni blokovi slagani su tako da budu stabilni pod djelovanjem valova od vjetra.

Uzvodnu zaštitnu oblogu na dijelu brane koji nije rekonstruiran treba osmatrati. Vremenom valovi mogu erodirati sitniji kameni materijal između blokova, pa može doći do njihovog pomicanja, a time i do pomicanja blokova iznad. Takva mjesta ukoliko dođe do oštećenja naknadno će se sanirati. Ovaj pokos izveden je u nagibu 1:1,45.

Nizvodni pokos brane

Nakon što je dobro uvaljana nizvodna potporna zona svakih 2,0 m izvršeno je dotjerivanje pokosa u projektirani nagib 1:1,5.

Na ovaj pokos zasadene su sadnice brniste (*sportium junceum*) koja je prevladavala na nizvodnom pokosu i prije miniranja brane. Ove sadnice će spriječiti kotrljanje kamena niz kosinu do rasklopnog postrojenja.

Ukupno uklonjene i ugrađene količine materijala

Ukupno ugrađene količine raznog materijala u tijelo brane iznose **175.891 m³**.

Ukupno iskopane i odvežene količine iznose **124.672 m³**. Prema tome ugrađeno je **50.419 m³** više materijala i to zbog proširenja nizvodne potporne zone.

Radovi na ugradnji materijala u tijelo brane počeli su 28. srpnja 1994. godine, a u potpunosti su završeni u rujnu 1995. godine.

PROŠIRENJE TIJELA BRANE SA NIZVODNE STRANE

Potporni zid na nizvodnoj nožici brane

Nakon provedenih proračuna brane obzirom na stabilnost u uvjetima djelovanja seizmičkih opterećenja, te evakuacije 10.000 god. velikih voda preko preljeva došlo se do zaključka, da je potrebno povisiti branu sa kote 363,00 m n.m. na kotu 364,50 m n.m. Razlozi i način kako se došlo do ovog povećanja dati su u posebnom članku.

Također je dato i obrazloženje zbog čega se prišlo povišenju brane nasipavanjem sa nizvodne strane.

Kako ovo proširenje svojom nožicom zadire u rasklopno postrojenje izrađen je potporni zid visine oko 3,5 m, foto 41 i 42.

Također je zaštićena kućica pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta, a pristupni hodnici br. 2 i br. 3 produženi su za 6,0 m. Izgrađene su i stepenice uz pokos na lijevoj i desnoj kraju brane, kao i kanali za kabele prema preljevnoj građevini i pomoćnom zatvaraču.



Foto 41. 2. kolovoza 1994 godine - na nizvodnoj nožici brane u fazi izgradnje



Foto 42. 7. rujna 1994 godine - Izgrađeni potporni zid na nizvodnoj nožici brane

Za vrijeme radova na iskopa i betoniranju potpornog zida od 8-19 sati rasklopno postrojenje je bilo bez napona tako, da su se radovi odvijali bez zastoja.

Iskop za potporni zid na nizvodnoj nožici brane počeo je 2. srpnja 1994. godine. Ukupno je iskopano 1.165 m³ materijala, ugrađeno 775 m³ betona, te oko 46.178 kg betonskog čelika 400/500.

Zid je betoniran u osam dijelova od 8. srpnja 1994. godine do 1. rujna 1994. godine.

Da bi se mogao ugrađivati materijal iza potpornog zida izvedena je privremena rampa iz rasklopnog postrojenja do 7. rujna 1994. godine pa je do vrha zida tj. kote 317,00 m n.m. završena ugrađnja kamenog materijala do 30. rujna 1994. godine.

Nastavak ugrađnje materijala odvijao se prema slobodnim kapacitetima strojeva na gradilištu uz uvjet, da se ugrađnja završi do kote 353,00 m n.m. odnosno 358,00 m n.m., do planiranog početka ugrađnje sa ovih kota na cijeloj širini brane, a to je početak svibnja 1995. godine.

Za ovu ugrađnju korišten je materijal iz kamenoloma i deponije materijala iz tijela brane prilikom iskopa.

Korišteni su strojevi:	-	buldozer D-6
	-	bager za utovar materijala
	-	valjak
	-	4-5 kamiona.

Dana 27. veljače 1995. godine nasip je bio na koti 339,50, a dana 15. travnja 1995. godine na koti 353,00 odnosno 358,00 m n.m.

Zaštitni zid oko kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta

Neposredno uz nožicu brane na desnom kraju nalazi se kućica pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta. Ova kućica djelomično zadire u nizvodnu potpornu zonu. U kućici je smještena oprema za podizanje i spuštanje pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta.

Budući da se brana povisuje na konačnu kotu 364,50 m n.m., a radi slijevanja na 365,00 m n.m. nasipavanje na nizvodnoj potpornoj zoni se proširuje za 5,0 m pa bi pokos nove potporne zone prekrrio krov kućice. Zbog ovih razloga izveden je zaštitni zid oko kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta dužine 28,0 m maksimalne visine 9,6 m, širine u stopi 4,65 m, sl. 5 i foto 43.



Foto 43. Pogled na kućicu pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta i zaštitni zid

Zaštitni zid oblikovan je tako da s uzvodne strane slijedi kružni oblik kućice, dok se na nizvodnoj strani odvaja od zidova kućice i produžuje do nožice brane.

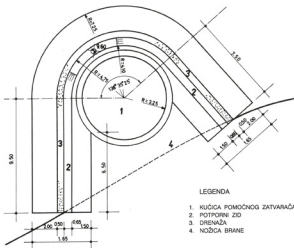
Visina zida na najvišem dijelu iznosi 9,6 m, a na najnižem u nožici 1,55 m. Debljina zida osim na dijelu gdje naliježe na kućicu iznosi 65 cm, dok je debljina temeljne stope 1,0 m. Onaj dio zida koji naliježe na kućicu zatvarača temeljnog ispusta debljine je 1,0 m. Iza zida je izveden drenažni sloj debljine 50 cm.

Radovi su izvedeni u periodu od 14. studenog 1994 godine do 21. ožujka 1995 godine.

Ukupne količine radova su:

- iskop u nirovdnom pokosu brane s odvozom na deponiju	m ³	538,00
- priprema, doprema i ugradnja betona M-30	m ³	176,00
- priprema, doprema i ugradnja podlošnog betona M-20	m ³	61,00
- dobava, savijanje i ugradnja rebraste armature 400/500	t	10,50
- dovoz i ugradnja filtarskog materijala za drenažu iza zida	m ³	74,00

Izvođenje ovih radova nije utjecalo na rokove izvođenja ostalih radova na sanaciji brane.



Slika 5. Zaštitni zid oko kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta

KONSOLIDACIJSKO INJEKTIRANJE GLINENE JEZGRE PO TRASI DIJAFRAGME

U centralnom dijelu brane od sta: 0+87,32 do sta: 3+44,00 predviđena je izvedba vododržive dijafragme od plastičnog betona koja treba preuzeti funkciju koja je do oštećenja brane imala glinena jezgra.

Prilikom iskopa za dijafragmu moglo je doći do gubitka bentonitne isplake koja služi za osiguranje stijenci iskopa. Gubitak isplake može se dogoditi ako u glinenoj jezgri postoje šupljine, koje su nastale kao posljedica miniranja. Gubitak isplake izazvao bi urušavanje iskopa, a time i zarobljavanje dijela stroja koji obavlja iskop.

Prilikom sanacije injekcijske galerije na sta: 1+90,35 naišlo se na kavernu u tjemenu galerije, pa se je moglo pretpostaviti da u glinenoj jezgri postoji još šupljina i pukotina koje su nastale kao posljedica djelovanja eksplozije.

Gubitak isplake ili zatrpavanje stroja kojim se obavljala iskop dovelo bi do gubitka dijela stroja ili do velikih troškova za izvlačenje kao i zastoja u radovima.

Da bi se gubitak isplake smanjio na najmanju moguću mjeru na Stručnom kolegiju za rad na sanaciji brane Peruća 7. prosinca 1993 godine je donijeta odluka o provođenju konsolidacijskog injektiranja jezgre po trasi dijafragme.

Osnovni zadatak konsolidacijskog injektiranja uzduž ruba iskopa za buduću dijafragmu je prenalazanje i zapunjavanje mogućih pukotina i kaverni u jezgri brane i filtarskim slojevima u koje dijafragma djelimično zadire, sa svrhom da se tijekom izvođenja sprejiči nagli gubitak isplake.

Predviđeno je da se konsolidacijsko injektiranje izvodi od sta: 0+87,70 do sta: 3+44,00 iz bušotina postavljenih na međusobnom razmaku 1,4 m, sa uzvodne i nizvodne strane dijafragme.

Detaljan opis o konsolidacijskom injektiranju dat je u članku "Injektiranje jezgre brane".

Konsolidacijsko injektiranje izvedeno je od sta: 1+14,60 do sta: 3+19,00. Injektiranje na lijevom kraju od sta: 0+87,70 do sta: 1+14,60, i na desnom kraju od sta: 3+19,00 do sta: 3+44,00 nije izvedeno u prvom redu zbog rokova izvedbe. Naime brana je na lijevom kraju na kotu 353,00 m n.m. te na desnom kraju na kotu 358,00 m n.m. izvedena neposredno pred početak iskopa za dijafragmu. Da se je tada počelo sa konsolidacijskim injektiranjem to bi dovelo do zastoja u izvedbi dijafragme.

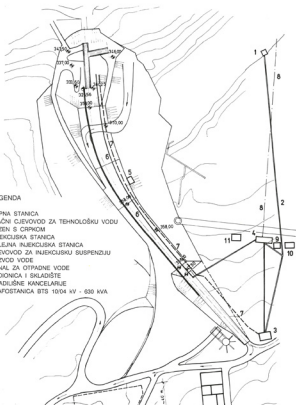
Drugi je razlog u tome što prilikom iskopa kosina na lijevom i desnom kraju nisu uočena mjesta koja bi ukazivala na veća oštećenja gline jezgre i filtarskih slojeva.

Ova pretpostavka se pokazala točnom jer prilikom izvedbe dijafragme nije bilo gubitaka isplake na mjestima gdje nije izvedeno konsolidacijsko injektiranje.

Radove na konsolidacijskom injektiranju izvelo je poduzeće "Geotehnika" Zagreb sa početkom 1.srpnja 1994. godine, a završeno je 7. listopada 1994 godine.

LEGENDA

1. CRPNA STANICA
2. TLAČNI CJEVOVOD ZA TEHNOLOŠKU VODU
3. BAZEN S CRPKOM
4. INJEKCIJSKA STANICA
5. RELEJNA INJEKCIJSKA STANICA
6. CJEVOVOD ZA INJEKCIJSKU SUSPENZIJU
7. RAZVOD VODE
8. KANAL ZA OTPADNE VODE
9. RADIONICA I SKLADIŠTE
10. GRADILIŠNE KANCELARIJE
11. TRAFOSTANICA BTS 10/04 kV - 630 kVA



Slika 6. Organizacija gradilišta za injektiranje jezgre po trasi dijafragme

Organizacija gradilišta

Organizacija gradilišta za izvođenje konsolidacijskog injektiranja jezgre po trasi dijafragme postavljena je tako da ne ometa ostale radove na sanaciji brane.

Kako je upravo bio završen iskop srednjeg dijela i krajeva brane, od početka sепnja 1994 godine, kada je počelo konsolidacijsko injektiranje preostali su radovi na:

- betoniranje injekcijske galerije od sta: 0+34,45 do sta: 0+90,58
- iskop i obnova injekcijske galerije od sta: 0+90,58 do sta. 1+30,00 sa lijevog kraja brane
- betoniranje pristupnog tunela br. 3 na lijevom kraju brane
- naspavanje lijevog kraja brane od kote 328,56 m n.m. do kote 353,00 m n.m.

Sve ovo ukazuje da je trebalo osigurati stalnu komunikaciju za lijevi kraj brane.

Cijeli transport odvijao se uzvodno od trase dijafragme po uzvodnoj potpornoj zoni, a od sta: 1+18,00 do sta: 1+13,00 osiguran je transport prema pristupnom tunelu br. 3 preko nizvodne potporne zone.

Raspored pojedinih objekata i radnih prostora za konsolidacijsko injektiranje dat je na situaciji, sl. 6.

Količine radova

Na trasi injektiranja izvedena je 171 bušotina ukupne dužine 5.788 m. Ukupni utrošak injekcijske suspenzije iznosi 591.156 l, a prosječni 102.13 l/m bušotine. Budući da 1 l suspenzije sadrži 0,35 kg suhe tvari, za injektiranje je utrošeno ukupno oko 207 t cementa i bentonita.

GLINOBETONSKA DIJAFRAGMA

U okviru sanacije brane predviđena je izgradnja glinobetonske dijafragme sa svrhom preuzimanja vododrživosti brane umjesto oštećene glinene jezgre. Za izvođenje radova na izgradnji glinobetonske vododržive dijafragme Hrvatska elektroprivreda sklopila je ugovor sa tvrtkom "Geotehnika" - Zagreb i "Bauer" - Schrobenuhausen dana 8. kolovoza 1994 godine koji su se obavezali da će radove izvesti za 6 mjeseci.

Pripremni radovi počeli su 19. rujna 1994 godine

Radovi na iskopu za glinobetonsku dijafragmu počeli su 13. listopada 1994 godine.

Svi radovi na izvođenju glinobetonske dijafragme završeni su 10. siječnja 1995. godine. Dijafragma je izvedena od sta: 0+87,70 do sta: 3+44,00 mjereno po osi brane. Od stacionaže 0+87,70 do sta: 1+82,87 dijafragma je izvedena sa kote 353,40 m n.m. a od sta: 2+38,67 do sta: 3+44,00 sa kote 358,40 m n.m.

Između sta: 1+82,87 i sta: 2+38,67 dijafragma je izvedena u četiri stepenice visine 1,0 m.

Na spoju sa lijevom i desnom krajem dijafragme je izvedena tako da je zasječena minimum 2,0 m u rekonstruirane krajeve brane mjereno od najniže točke pokosa iskopa. U poprečnom smjeru na os brane, os dijafragme smještena je 4,0 m uzvodno od osi injekcijske galerije. Maksimalna dubina dijafragme iznosi 51,50 m, a minimalna 12,90 m. Dijafragma je u temeljnu stijenu, odnosno betonski blok na središnjem dijelu brane zasječena minimalno 2,0 m.

Debljina dijafragme iznosi 1,0 m, a ukupna dužina 261,15 m.

Detaljan opis vododržive glinobetonske dijafragme dat je u posebnom članku.

Radi osiguranja kontakta dijafragme i temeljne stijene, odnosno betona u središnjem dijelu brane izvedeno je injektiranje spoja dijafragme s temeljnom stijenom odnosno betonom kao i povezivanje s postojećom injekcijskom zavjesom. Injektiranje je izvedeno iz obnovljene injekcijske galerije.

Organizacija gradilišta

Pogoni za proizvodnju isplake bili su locirani na platou na koti 358,00 m n.m. na desnom kraju uzvodno od brane.

Ovdje je bio smješten sustav za izradu i pročišćavanje isplake i to:

- postrojenje za proizvodnju isplake
- skladište bentonita
- postrojenje za pročišćavanje isplake sa bazenima za svjež, radnu i otpadnu isplaku
- pumpa za transport isplake do mjesta iskopa

Uzvodno od brane smještena je i betonara kapaciteta 60 m³/sat.

Postrojenje za proizvodnju i pročišćavanje isplake povezani su cjevovodima za transport isplake do mjesta iskopa odnosno betoniranja dijafragme.

Na mjestu iskopa radili su hidraulički rezač, grabilica i dizalica.

Materijal iskopa grablicom je transportiran kamionima na privremenu deponiju na desnoj obali akumulacijskog jezera.

LEGENDA

1. CRPNA STANICA
2. TLAČNI CJEVOD ZA TEHNOLOŠKU VODU
3. BAZEN S CRPKOM
4. INJEKCIJSKA STANICA
5. RAZVOD VODE
6. KANAL ZA OTPADNE VODE

7. RADIONICA I SKLADIŠTE
8. GRADILIŠNE KANCELARIJE
9. RESTORAN S SANITARNIM ČVOROM
10. SUSTAV IZRADA I PROČIŠĆAVANJA ISPLAKE
11. SUSTAV CJEVOVODA ZA PROČIŠĆAVANJE ISPLAKE
12. TLAČNA CRPKA
13. BETONARA ZA IZRADU ISPUNE SC-90
14. CJEVOD ZA TEHNOLOŠKU VODU

Slika 7. Organizacija gradilišta za izvođenje glinobetonске dijafragme



Foto 44. 16. prosinca 1994 godine - Završetak izrade uvodnica i iskop panela hidrauličkim rezačem - lijevi kraj brane

Napredovanje radova na dijafragmi bilo je sa desnog prema lijevom kraju brane. Voda za proizvodnju isplake i glinobetona zahvaćena je pumpom u koritu Cetine nizvodno od strojarnice odakle se tlačila do rezervoara, a odatle do proizvodnih pogona.

Opskrba električnom energijom omogućena je za ovaj rad instaliranjem trafostanice BTS 10/04 kW, snage 630 kVA i postojeće zidane trafostanice 400 kVA.

Organizacija gradilišta data je na sl. 7.



Foto 45. 2. studenog 1994 godine - Izvođenje glino-betonske dijafragme i ugradnja materijala na lijevom kraju brane

INJEKCIJSKI RADOVI

Prema usvojenoj koncepciji sanacije brane predviđeni su i injekcijski radovi.

Iz injekcijske galerije, a nakon što je obnovljena, izvedeni su slijedeći radovi:

1. Vezno injektiranje, u profilima na razmaku od 2 m s pet odnosno 6 bušotina na dijelu brane na kojem je izvedena glinobetonska dijafragma odnosno od 0+87,70 do sta: 3+44,00.
Ovo injektiranje izvedeno je u vremenu od 21. listopada 1994 do 2. veljače 1995 godine
2. Konsolidacijsko injektiranje s vertikalnim bušotinama u dnu cijele galerije u dva reda, uzvodni i nizvodni, s razmakom bušotina od 4,0 m u uzvodnom i nizvodnom redu. Ovo injektiranje izvedeno je u vremenu od 14. studenog 1994 godine do 21. ožujka 1995 godine
3. Vezno injektiranje spoja sa glinobetonskom dijafragmom u profilima s dvije bušotine na razmaku od 2,0 m. Ovo injektiranje izvedeno je u vremenu od 20. prosinca 1994 godine do 15. ožujka 1995 godine

Nakon višemjesečnog opažanja u galeriji na mjestima gdje je opaženo vlaženje i procjeđivanje vode izvedeni su dodatni radovi veznog i konsolidacijskog injektiranja.



Foto 46. Vezno injektiranje u injekcijskoj galeriji



Foto 47. 19. lipnja 1995 godine - Injekcijski radovi na lijevom kraju brane



Foto 48. Glavna injekcijska stanica



Foto 49. Injektiranje sa kote 353,00 m n.m.

Osim navedenih injekcijskih radova izvedeni su injekcijski radovi nadvišenja injekcijske zavjese i to:

- a) na desnom kraju brane u dužini od 53 m s razmakom bušotina od 2,0 odnosno 3,0 m, u vremenu od 25. travnja 1995 godine do 15. svibnja 1995 godine
- b) na lijevom kraju brane u dužini od 267,0 m s razmakom od 3,0 m u vremenu od 18. svibnja 1995 godine do 26. lipnja 1995 godine

Također su izvedeni radovi na konsolidacijskom injektiranju ispod preljevne građevine. Injektiranje iz galerije kao i na desnom kraju izvedeno je iz glavne injekcijske stanice koja je korištena i za konsolidacijsko injektiranje glinene jezgre po trasi dijafragme, foto 48. Organizacija gradilišta za injekcijske radove bila je ista kao i kod konsolidacijskog injektiranja jezgre. Injektiranje na lijevom kraju izvedeno je iz manje injekcijske stanice postavljene na lijevom kraju brane.

KORIŠTENJE AKUMULACIJSKOG JEZERA PERUĆA ZA VRIJEME SANACIJE BRANE

U trenutku kada je aktiviran eksploziv u injekcijskoj galeriji brane vodostaj u akumulacijskom jezeru bio je na koti 356,20 m n.m. Donesena je odluka da se akumulacijsko jezero potpuno isprazni, što je i učinjeno do 12. ožujka 1993 godine kada je vodostaj u jezeru bio na koti 314,80 m n.m.

Pregledom uzvodnog pokosa i ulazne građevine za dovodni tunel nije bilo vidljivo da postoje oštećenja niti da su postavljena minsko-eksplozivna sredstva tako, da je za ponovno punjenje akumulacijskog jezera do određene kote bila mjerodorna procjena o štetanju brane odnosno njene glinene jezgre.

Korištenje akumulacijskog jezera važno je iz nekoliko razloga:

- da se ne ugrozi stabilnost brane
- da se planski koristi akumulirana voda
- da ne dođe do plavljenja Hrvatačkog i Sinjskog polja.

U toku pražnjenja akumulacijskog jezera između sta: 0+82,00 i sta: 0+89,00 došlo je do pojave kratera na lijevom kraju brane dubine 10 m i promjera oko 7 metara, koji je zahvatio i dio jezgre. Kako je dno injekcijske galerije na ovoj stacionaži na koti 333,00 m n.m. određena je sigurnosna kota do koje se može akumulirati voda od 330,00 m n.m.

Objek proizvodne grupe HE Peruća nisu bile osposobljene nakon plavljenja strojarne, pa se ispuštanje vode moglo obavljati samo kroz temeljni ispuš. Jedna proizvodna grupa osposobljena je u srpnju 1993. godine, a druga u studenom 1993. godine, što je omogućavalo dodatno evakuiranje vode.

Akumuliranje i ispuštanje vode iz akumulacijskog jezera regulirano je "Pravilnikom o privremenom korištenju akumulacijskog jezera Peruća za vrijeme sanacije brane Peruća", koji je sačinjen sa svrhom održavanja sigurnosnog vodostaja u akumulacijskom jezeru.

Ovim Pravilnikom posebno je regulirano.

- da se ne ugrozi sigurnost brane
- omogućiti sigurna evakuacija velikih voda
- ne ugrozi sistem obrane od poplava u Sinjskom polju
- koliko je god moguće osigura što veća količina akumulirane vode za proizvodnju električne energije u nizvodnim elektranama.

Važno je napomenuti da su se radovi u injekcijskoj galeriji odvijali na koti 305,00 m n.m. što je bilo 25,00 m ispod nivoa vode u akumulacijskom jezeru.

Dotok vode u injekcijsku galeriju varirao je u odnosu na vodostaj u jezera, a maksimalno je iznosio 130 l/min što je evakuirano crpkama kroz injekcijsku galeriju i pristupni hodnik broj 2.

Može se reći da se za vrijeme sanacije brane uspjelo nalaziti rješenja koja su maksimalno iskoristavala dotok vode u jezero za proizvodnju električne energije u nizvodnim elektranama HE Peruća, HE Đule, i HE Zakućac. Veliki doprinos ovakvom radu da se maksimalno iskoristi dotok u akumulacijsko jezero i proizvede električna energija u nizvodnim elektranama dali su inženjeri dispečerske službe u Splitu.

Jesen 1994. godine bila je izuzetno vlažna sa 4-5 velikih vodnih valova što se produžilo i na proljeće 1995. godine čime je još jednom potvrđeno, da se najviše oborina pojavi upravo u trenutku kada se gradi pojedina brana odnosno hidroelektrana.

Zbog ispitivanja brane i za energetske potrebe akumulacijsko Peruća napunjeno je do kote 353,00 m n.m.

ZAKLJUČAK

Od miniranja 28. siječnja 1993. godine radovi na brani mogu se podijeliti u tri razdoblja:

- spašavanje brane nakon miniranja
- sanacija brane
- održavanje i praćenje ponašanja brane nakon sanacije

Radovi u prva dva razdoblja uspješno su obavljeni, a praćenje ponašanja brane treba posvetiti posebnu pažnju, da se u slučaju pojave bilo kakvih nedostataka oni na vrijeme uoče, uklone i tako ne dovedu u pitanje sigurnost brane.

SEIZMOLOŠKA I SEIZMOTEKTONSKA ISTRAŽIVANJA LOKACIJE BRANE PERUĆA

Mr.sc. VLADO KUK, dipl.ing.

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREB

Prof.dr.sc. EDUARD PRELOGOVIĆ, dipl.ing.

RUDARSKO-GEOLOŠKO-NAFTNI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

SAŽETAK

Brana Peruća nalazi se u rubnom dijelu regionalne strukturne jedinice Dinarika i to u zoni rasjeda koji dijele dvije glavne navlačne i seizmogene strukture: Svilažu i Dinaru-Kamešnicu. To je područje izrazito seizmički aktivno. Od potresa koji su se dogodili, najznačajniji su potresi iz 1898, $I_a=IX^{\circ}$ MCS, $M=6.5$, $D=23$ km) i 1990, $I_a=8.1^{\circ}$ MCS, $M=5.6$, $D=5$ km, koji su se na lokaciji brane manifestirali horizontalnim akceleracijama 0.16 g, odnosno 0.15 g. Determinističkim pristupom, na osnovi seizmoloških i seizmotektonskih istraživanja, izračunate su moguće maksimalne vrijednosti horizontalne akceleracije $a_{max}=0.29$ g i makroseizmičkoga intenziteta $I_{max}=8.6^{\circ}$ MCS. Za maksimalne vrijednosti koje odgovaraju povratnom periodu 200 godina, potres S_p , dobiveno je $a_{max}=0.17$ g i $I_{max}=7.7^{\circ}$ MCS, a povratnom periodu 1000 godina, potres S_p , $a_{max}=0.22$ g i $I_{max}=8.2^{\circ}$ MCS.

UVOD

U okviru raznovrsnih istražnih radova u svezi sa sanacijom brane Peruća, provedena su i kompleksna seizmološka i seizmotektonska istraživanja. Krajnji cilj tih istraživanja bio je definiranje projektnih seizmičkih parametara, a rezultati analize, opis primjenjenih metoda i korištenih podataka prikazani su u ovome radu.

Istraživanja koja su provedena mogu se razdijeliti u tri skupine: seizmološka, seizmotektonska i inženjersko-seizmološka.

U okviru seizmoloških istraživanja detaljno su analizirane prostorne, vremenske i energetske značajke seizmičke aktivnosti lokalnog i regionalnog prostora oko istraživane lokacije.

Korišteni su mikroseizmički i makroseizmički podaci iz arhiva Geofizičkog zavoda "Andrija Mohorovičić", a pritom su od posebnog značaja bili rezultati instrumentalnog praćenja seizmičke aktivnosti koje se sustavno provodi za Hrvatsku elektroprivredu.

U seizmotektonskim istraživanjima korišteni su pevenstveno podaci o neotektonskoj i seizmičkoj aktivnosti, a posebice je analizirana recentna neotektonska aktivnost. Izdvojene su seizmogene strukture i definiran seizmotektonski model za uže regionalno područje koje je od značaja za lokaciju brane Peruća. Položaj lokacije definiran je u seizmotektonskom sklopu i definirane su značajke potresnih izvora.

U okviru inženjersko-seizmoloških istraživanja proveden je proračun očekivanih maksimalnih vrijednosti horizontalne akceleracije i makroseizmičkog intenziteta. Proračun je proveden uz dva pristupa: deterministički, u okviru kojega su na osnovi rezultata seizmotektonskih istraživanja definirane vrijednosti akceleracije i intenziteta koje predstavljaju apsolutne maksimume, te vjerojatnosni, kod kojega su akceleracije i intenziteti računati kao funkcije povratnog perioda i nivoa rizika. Proračun kod vjerojatnosnog pristupa proveden je primjenom McGuireove metode i teorije ekstrema, pri čemu je pretpostavljena i lateralna anizotropnost širenja seizmičke energije.

ZNAČAJKE SEIZMIČNOSTI

Brana Peruća nalazi se u području pojačane seizmičke aktivnosti. U neposrednoj okolici brane nalazi se nekoliko recentno aktivnih epicentralnih područja: Sinjsko i Livanjsko polje, područje oko Knina, te uz planine Dinaru, Kamešnicu i Svilaju. Od navedenih područja, seizmički je najaktivnije Sinjsko polje, i to predio između Trilja i Sinja, te područje planine Dinare. Od 1769. godine, od kada postoji prvi zapis o tamošnjim potresima do danas, u tim se područjima dogodilo 20 potresa s intenzitetom u epicentru $I_0 > VII^+$ MCS ljestvice, odnosno s magnitudom $M > 4.8$, što zorno svjedoči o izrazitoj seizmičkoj aktivnosti. Da je tome tako potvrđuje i karta epicentara potresa, prikazana na slici 3. Epicentri potresa prikazani su kružnicama kojih su radijusi proporcionalni magnitudama.

Na osnovi specifičnosti u prostornim, vremenskim i energetskim značajkama pojave potresa, te rezultata neotektonskih istraživanja, na regionalnom području koje je uzeto u obzir definirana su četiri značajna seizmička izvora, Sl. 1:

1. Sinjsko polje
2. Svilaja
3. Mosor-Biokovo
4. Dinara-Južni Velebit

Seizmički izvor Sinjsko polje

Seizmički izvor Sinjsko polje je površinom usko područje, značajno po seizmičkoj aktivnosti, u kojemu se 2. srpnja 1898. godine u 05^h 20^m (GMT) dogodio i najjači potres u cijeloj regiji. Epicentar toga potresa bio je u okolini Trilja (43.6° N i 16.7° E), a osjetio se epicentralnom jakosti $I_0=IX^o$ MSK ljestvice. Procjenjuje se da je bio magnitude $M=6.6$. Istom epicentru pripisuje se još pet potresa magnitude $M>4.8$.

Na drugom rubu Sinjskoga polja, u epicentru nedaleko Sinja (43.7° N, 16.7°E) dogodio se 18. svibnja 1907. godine u 00^h 59^m (GMT) drugi po jakosti potres iz toga izvora, magnitude $M=5.2$ i epicentralne jakosti $I_0=VII-VIII^o$ MSK. Osim navedenih, u istom području zabilježena su još tri potresa magnitude $M>4.1$.

Seizmički izvor Svilaža

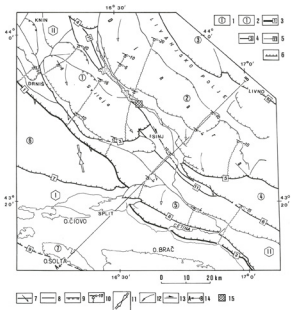
U seizmičkom izvoru Svilaža ističu se dva epicentralna područja: prvo kod Uzdoља, između planine Premine i Kozjaka, i drugo, mnogo aktivnije u planini Dinari, istočno od Peručkog jezera. Najjači potres magnitude $M=5.6$ dogodio se 27. studenog 1990. godine u 04^h 37^m (GMT) na dubini od 8 km. Epicentar potresa bio je u Dinari (43.84° N, 16.63° E), na udaljenosti oko 5 km od lokacije brane Peruća. Potres se osjetio intenzitetom VII-VIII^o MSK u epicentru. Istoga dana, oko 14 minuta kasnije na istome području dogodio se još jedan jači potres, magnitude $M=5.5$.

Seizmički izvor Mosor-Biočovo

Unutar toga područja može se izdvojiti nekoliko lokaliteta u kojima su se događali vrlo jaki potresi. Najjači potres po magnitudi, $M=6.2$ dogodio se na području Hercegovine 15. ožujka 1923 godine u 05^h 40^m (GMT), zapadno od Mostara (43.25° N, 17.30° E), na dubini 16 km, epicentralne jakosti $I_0=VIII-IX^o$ MCS.

Po magnitudi najjači potres koji se u tom seizmičkom izvoru dogodio na području Hrvatske, $M=6.1$, zbio se 11. siječnja 1962. u 05^h 05^m (GMT) u planini Biočovo (43.38° N, 17.02° E), na dubini od 10 km, a osjetio se epicentralnim intenzitetom $I_0=VIII-IX^o$ MCS. S obzirom na zabilježen intenzitet u epicentru, u tom seizmičkom izvoru najjači je potres IX^o MCS, koji je opažen 29. prosinca 1942. godine u 03^h 42^m (GMT) u Imotskome polju (43.40° N, 17.20° E), sa žarištem na dubini od 7 km. Magnituda toga potresa bila je 6.0.

Osim spomenutih, jaki potresi, $M>5.0$, dogodili su se još i kod Gruda i Buškog Blata, te u planini Kamešnici.



A. REGIONALNE STRUKTURNE JEDINICE: 1- Adriatik (1); Dinarik (2). B. GLAVNE NAVLAČNE STRUKTURNE JEDINICE: 2- Promina-Svrlja (1); Dinara-Kamešnica (2); Šator-Starčina (3); Imotski-Bokija (4); Mosor-Blokovo (5); Ravni Kotari-Kozjak (6); Čiovo-Šolta-Brač (7). C. RASJEDI: 3- Granični rasjedi regionalnih strukturalnih jedinica; Rasjed Obrovac-Drnish-Kila (1); Rasjed Split-Ploče (2); 4- Granični rasjedi glavnih navlačnih strukturalnih jedinica; Mučki rasjed (3); Rasjed Dinare (4); Rasjed Kamešnica (5); Rasjed Tisli-Tihuljina (6); Rasjed Kozjak (7); Rasjed Mosora i Blokova (8); Rasjed Šolta-Brač (9); Rasjed Šator-Starčina (10); 5- Najvažniji rasjedi iz zone Vrljika-Sinj; 6- Reverzni, navlačni rasjedi; 7- Dionice reverznih rasjeda s naglašenim horizontalnim pomacima; 8- Dionice rasjeda bez sigurno definiranog karaktera; 9- Reverzne dionice rasjeda s vergencijom prema S, Sj; 10- Pretpostavljene projekcije istih rasjeda na površinu i označenoj dubini; D. STRES, POMACI STRUKTURA: 11- Regionalni stres; 12- Smjer pomaka strukturalne jedinice; 13- Zona horizontalnog pomaka strukturalnih jedinica u području Srijemskog polja; 14- Seizmosektonski profil; 15- Lokacija brane Peruća.

Šlika 1. Strukturalna karta

Seizmički izvor Dinara-Južni Velebit

U ovome se izvoru mogu razlučiti tri epicentralna područja: kod Knina, na potezu od Mokrog Polja do Razvoda, te na južnom rubu Velebita. Najjači potres iz ovoga izvora, magnitude $M=5.5$ dogodio se 25. studenog 1986. godine u $13^{\circ} 59'$ (GMT) kod Knina (44.07° N, 16.32° E), epicentralne jakosti $I_p=VII-VIII^{\circ}$ MCS, žarišne dubine 13 km. Nakon ovog potresa uslijedio je velik broj naknadnih potresa, od kojih su dva bila magnitude $M>4.0$. U epicentralnom području Moko Polje-Razvode najjači potres dogodio se 1972. kod Razvoda, i imao je magnituda $M=4.9$. Na južnim padinama Velebita zabilježen je najjači potres magnitude $M=4.3$ dne 22. veljače 1976. godine.

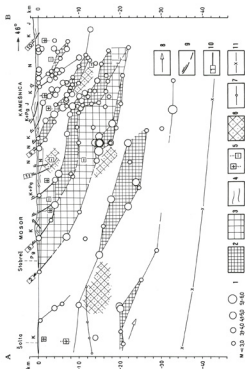
SEIZMOTEKTONSKI ODNOSI

Loakcija brane Peruća nalazi se u rubnom dijelu regionalne strukturne jedinice Dinarika i to u zoni rasjeda koji dijeli dvije glavne navlačne i seizmogene strukturne jedinice: Svilaju (1 na slici 2.) i Dinara-Kamešnicu (2). U tektonskim pokretima bitna su podvlačenja masa stijena u dubini i navlačenja bliže površini. Recentno djelovanje regionalnog stresa uvjetuje izražene tangencijalne pomake u čelnom dijelu navlačnih struktura i dijagonalne u prostoru. To znači da se Svilaja i Dinara-Kamešnica uz rotaciju generalno pomiču prema jugu, pa je duž zone rasjeda prisutan horizontalni pomak, najviše izražen u Sinjskom polju. Uz to se događa zatvaranje i sužavanje područja zone Vrljika-Sinj i Sinjskoga polja.

Na površini oko brane Peruća nalaze se rasjedi iz zone Vrljika-Sinj (11). Trase dva glavna rasjeda iz zone nalaze se na površini zapadno od brane (jedna trasa je djelomice prekrivena navlakom Svilaje, slika 2). Važniji prateći rasjed nalazi se na površini neposredno istočno od brane. Manji rasjedi zamijećeni oko brane spajaju se u dubini s većim dislokacijama. Morfološki istaknuta strma podina istočno od brane obilježava rubni rasjed Dinare-Kamešnice (5).

Koncentracije žarišta potresa u prostoru mogu se povezati s najvažnijim zonama rasjeda, izdvojenima na slici 2. To su seizmotektonski aktivne zone. U obuhvaćenom području ključne su zone vezane s rasjedima: Obrovac-Drniš-Klis (1), Split-Ploče (2), Muć (3), Dinara-Kamešnica (5), Mosor-Biokovo (8) i Vrljika-Sinj (11). U određivanju očekivane maksimalne magnitude M_{max} potresa u pojedinim seizmotektonski aktivnim zonama bilo je moguće, osim podataka o potresima, uključiti i podatke o najaktivnijoj dionici rasjeda i veličini horizontalnog pomaka. Dobiveno je slijedeće:

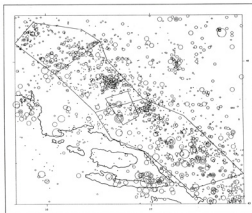
- zona rasjeda Obrovac-Drniš-Klis (1): duljina najaktivnije dionice - 42 km; $M_{max}=5.7$;
- zona Mućkog rasjeda (3): duljina najaktivnije dionice - 44 km; $M_{max}=5.7$;
- zona rasjeda Dinare-Kamešnice (5): duljina najaktivnije dionice - 40 km; $M_{max}=5.6$;



1- Željeza potresa (omlaćene nagibnude); 2- Seizmotektonski najvjerljivije zone; 3- Zona navlake Drinska; 4- Bore nastala uz površinu; 5- Vjerojatne podizice primjerenih makumuna i minimuma ložnice označavaju moguće pomake u prostoru; 6- Zone većih gravimetričkih gradijenata; 7- Vjerojatna područja ploha seizmičnosti; 8- Snijer podvlačenja masa stijena u dubini; 9- Rasjed Šator-Savina (10); Zona rasjeda Vrška-Sat; 11- Mono dialektičnost

S7/k9 2. Seizmotektonski profil

- zona rasjeda Split-Ploče (2) i rasjeda Mosor-Biočko (8): duljina najaktivnije dionice 82 km; $M_{max}=6.6$;
- zona rasjeda Vrljika-Sinj (11): duljina najaktivnije dionice 40 km; $M_{max}=5.6$;
veličina horizontalnog pomaka u Sinjskom polju - 15 km; $M_{max}=6.5$;



Slika 3. Karta epicentara potresa i seizmičkih izvora

Potresni izvori pridruženi su seizmotektonski aktivnim zonama, Sl. 2. Na temelju profila zapažena je prostorna podudarnost širina, duljina i projekcija na površinu obuhvaćene zone rasjeda Obrovac-Drnš-Klis (1) i Mučkog rasjeda (3), te zone Split-Ploče (2) i Mosor-Biočko (8). Također zone Mučkog rasjeda (3) i rasjeda Obrovac-Drnš-Klis (1) iskazuju se većim magnitudama potresa i prekrivaju u prostoru utjecaje vezane uz zone Vrljika-Sinj (11) i Dinara-Kamešnica (5). Takvi odnosi rezultirali su izdvajanjem triju potresnih izvora najbližih lokaciji brane Peruća:

3. Mosor-Biokovo, seizmotektonski aktivne zone vezane uz rasjede Split-Ploče i Mosor-Biokovo:
- $M_{\max}=6.6$.
1. Sinjsko polje, seizmotektonski aktivna zona vezana uz rasjed Vrljka-Sinj i mogućnost uključivanja najjačeg potresa kod Trilja u tu zonu:
- $M_{\max}=6.5$.
2. Svilaja, seizmotektonski aktivne zone vezane uz rasjede Obrovac-Draž-Klis i Muć
- lokacija brane Peruća nalazi se unutar ovog potresnog izvora;
- $M_{\max}=5.7$;

Kako je za proračun parametara seizmičkih sila potrebno uzeti uobzir i udaljenija epicentralna područja, uz navedena tri izvora definiran je i četvrti - Dinara-Južni Velebit, za koji je procijenjeno $M_{\max}=6.1$.

PARAMETRI SEIZMIČKIH SILA

Inženjersko-seizмолоškim istraživanjima određuju se ulazni parametri za proračun utjecaja seizmičkih sila na objekte na istraživanoj lokaciji. Najčešće se radi o najvećim očekivanim iznosima horizontalne akceleracije tla za vrijeme potresa i o najvećem očekivanom makroseizmičkom intenzitetu potresa na lokaciji. Ta su dva parametra računata i za sanaciju brane Peruća.

ODABIR ATENUACIJSKIH FUNKCIJA

Iznosi najveće horizontalne akceleracije i intenziteta koje potres može uzrokovati na istraživanoj lokaciji značajno ovise o izboru empirijske funkcije koja opisuje njihovo opadanje s udaljenošću od izvora potresa kao i ovisnost o magnitudi potresa. Kako za šire područje lokacije brane Peruća ne postoji dovoljno zabilježenih akcelerograma za izvođenje lokalne atenuacijske relacije, odabrana je ona koja najbolje opisuje dostupne podatke. Na osnovi analize koja je provedena na skupu od 25 akcelerograma potresa, uglavnom iz područja Dinarida, zaključeno je da atenuacijska relacija (Prelogović et al., 1985):

$$\log a_{\max} (\text{cm/s}^2) = 2.184 + 0.375 M - 1.468 \log (R + 18.04) \quad (1)$$

dobro opisuje empirijske podatke, te je stoga primijenjena za računanje horizontalnih akceleracija $a_{\max}$ na lokaciji brane Peruća, M označava magnitudu potresa, a R žarišnu

udaljenost. Makroseizmički intenziteti $I_{\max}$ na lokaciji računati su pomoću relacije (Sponheuer, 1961):

$$I_{\max} = I_0 - 3 \log (R/h) - 3 \cdot 0.43429 W (R - h) \quad (2)$$

gdje je I_0 intenzitet u epicentru, h dubina žarišta, a W koeficijent apsorpcije.

Intenzitet I_0 u epicentru potresa, ako nije bio poznat na temelju makroseizmičkih podataka, računat je pomoću relacije izvedene za područje Vanjskih Dinarida (Herak, 1989):

$$I_0 = 3.63 (1 + M/3.18 - (\log h) / 1.72) \quad (3)$$

PRORAČUN PARAMETARA DETERMINISTIČKIM PRISTUPOM

Na temelju ranije navedenih rezultata seizmoloških i seizmotektonskih istraživanja definirana su tri potresa: Pot₁, Pot₂ i Pot₃ koji na lokaciju brane Peruća mogu imati najveći utjecaj. Značajke tih potresa jesu:

Pot ₁ :	M = 6.5	D = 7 km	h = 10 km
Pot ₂ :	M = 6.6	D = 21 km	h = 10 km
Pot ₃ :	M = 5.7	D = 0 km	h = 10 km

M je magnituda, D epicentralna udaljenost, a h dubina žarišta potresa.

Rabeći relacije (1), (2) i (3), za ova tri potresa dobivene su vrijednosti maksimalnih horizontalnih akceleracija $a_{\max}$ i intenziteta $I_{\max}$:

za potres Pot ₁ :	$a_{\max} = 0.286 \text{ g}$	$I_{\max} = 8.6^\circ \text{ MCS}$
za potres Pot ₂ :	$a_{\max} = 0.197 \text{ g}$	$I_{\max} = 7.8^\circ \text{ MCS}$
za potres Pot ₃ :	$a_{\max} = 0.160 \text{ g}$	$I_{\max} = 8.0^\circ \text{ MCS}$

Najveći iznosi dobiveni su za prvi od tri navedena potresa, odnosno za potres magnitude 6.5 prema Richteru, sa žarištem na dubini od 10 km i epicentrom 7 km od istraživane lokacije. Kako se radi o objektu temeljenom na čvrstoj stijeni, ne očekuje se amplifikacijski učinak površinskih slojeva, te je dinamički faktor amplifikacije (DAF) jednak jedinici i nema prirasta izračunatom maksimalnom intenzitetu. Na to upućuju i male amplitude mikrozeizmičkog nemira koje su zabilježene kod mjerenja obavijenih u listopadu 1993. godine. Pritom treba spomenuti da mjerenja zbog ratnih zbivanja nisu mogla biti obavljena na samoj lokaciji brane, već nešto istočnije. Za mjerenja su međutim odabrane lokacije

koje su prema geološkim saznanjima posve ekvivalentne lokaciji brane, na čemu se temelji i prethodni zaključak u svezi s nivoom mikro seizmičkog nemira na lokaciji brane Peruća.

Radeći navedene relacije i rezultate lokalnih seizmoloških istraživanja, procijenjeni su i maksimalni iznosi a_{max} i I_{max} na lokaciji brane Peruća za do sada događene potrese. Dobivene su vrijednosti:

- Za potres 27. studenog 1990, $M=5.6$, $h=8$ km, $D=5.2$ km, $I_0=8.12^\circ$ MCS:

$$a_{max} = 0.15 \text{ g} \quad I_{max} = 7.86^\circ \text{ MCS}$$

- Za potres 2. srpnja 1898, $M=6.5$, $h=10$ km, $D=23.3$ km, $I_0=IX^\circ$ MCS:

$$a_{max} = 0.16 \text{ g} \quad I_{max} = 7.07^\circ \text{ MCS}$$

VJEROJATNOSNI PRISTUP

Vrijednosti intenziteta 8.6° MCS, odnosno akceleracije 0.29 g definirane u prethodnome poglavlju, predstavljaju apsolutne maksimume, bez obzira na vremenski period u budućnosti koji se uzima u obzir. U inženjerskoj se praksi međutim uz tako definirane vrijednosti rabe i one koje su funkcija vremenskog perioda i vjerojatnosti za premašivanje tih vrijednosti, a u suglasju s koncepcijom seizmičkoga rizika.

Postupak određivanja vjerojatnosnih seizmičkih parametara za branu Peruća bazirao se na opće prihvaćenoj metodologiji određivanja seizmičkoga hazarda. Primijenjene su pri tom dvije metode: Corneliova (Cornell, 1968), primjenom McGuireova algoritma (McGuire, 1976), i teorija ekstrema korištenjem Jenkinsonove metode (Kuk, 1982).

Proračun maksimalnih akceleracija metodom McGuirea

Maksimalne akceleracije računate su metodom McGuirea pomoću kompjutorskog programa EQRISK. Pri tome su uzeta u obzir 4 ranije navedena seizmička izvora, te tzv. preostala seizmičnost, iz područja kružnog oblika radijusa 100 km. Za svaki od izvora izračunati su koeficijenti a i b u Gutenberg-Richterovoj relaciji, a za gornju granicu magnituda uzete su seizmotektonski definirane vrijednosti. Dubine žarišta potresa za pojedine izvore uzete su kao konstante.

Izračunate vrijednosti maksimalnih horizontalnih akceleracija a_{max} koje odgovaraju pojedinim povratnim periodima T prikazane su u sljedećoj tablici:

T (god.)	50	100	200	300	500	1000
a_{max} (g)	0.111	0.136	0.165	0.182	0.185	0.186

Tablica 1 Maksimalne horizontalne akceleracije a_{max} kao funkcija povratnog perioda T

Vrijednost akceleracije 0.186 g, navedena uz povratni period 1000 godina, predstavlja asimptotsku vrijednost maksimalne akceleracije koja je dobivena navedenim postupkom.

Proračun maksimalnih akceleracija primjenom teorije ekstrema

Proračun primjenom teorije ekstrema proveden je na osnovi podataka o potresima iz razdoblja 1898.-1993. godina, a izveden je na dva načina: pomoću tzv. ekvivalentnih žarišnih udaljenosti, označeno kao slučaj A i stvarnih žarišnih udaljenosti, označeno kao slučaj B. Primijenjen je postupak opisan u (Prelogović, 1985). Dohvane vrijednosti prikazane su u tablici 2., gdje je sa "s" označena standardna devijacija.

T (god.)	a_{max} (g)		$a_{max}-s$		$a_{max}+s$	
	A	B	A	B	A	B
50	0.117	0.108	0.101	0.090	0.135	0.128
100	0.141	0.134	0.120	0.109	0.166	0.163
200	0.164	0.159	0.137	0.127	0.196	0.200
300	0.176	0.174	0.148	0.145	0.219	0.216
500	0.190	0.192	0.155	0.147	0.233	0.251
1000	0.207	0.215	0.166	0.159	0.259	0.289
10000	0.247	0.274	0.188	0.188	0.323	0.401

Tablica 2 Maksimalne horizontalne akceleracije a_{max} kao funkcija povratnog perioda T

Usporede li se ove vrijednosti s onima u tablici 1., uočava se da primjena teorije ekstrema daje veće vrijednosti nego McGuireova metoda, poglavito kada se radi o većim povratnim periodima. Nadalje, usporedba vrijednosti akceleracije 0.29 g, definirane na osnovi seizmotektonskih podataka, s vrijednostima akceleracije 0.274 g koja odgovara povratnom periodu T=10000 god. u gornjoj tablici, ukazuje na dobro podudaranje, iako su primijenjeni posve različiti načini proračuna.

Vrijednosti maksimalnih akceleracija kao funkcija eksploatacijskog perioda i nivoa rizika, prikazane su u tablici 3. Navode se samo vrijednosti koje odgovaraju slučaju B, proračun uz stvarne žarišne udaljenosti, budući su one nešto veće od analognih u slučaju A.

E (god.)	R (%)	a_{max} (g)	$a_{max}+s$	$a_{max}-s$
100	10	0.213	0.159	0.286
100	20	0.188	0.145	0.245
100	30	0.172	0.135	0.219
200	10	0.234	0.169	0.322
200	20	0.211	0.158	0.283
200	30	0.196	0.149	0.257

Tablica 3 Maksimalne akceleracije a_{max} kao funkcija eksploatacijskog perioda E i rizika R

Proračun maksimalnih intenziteta

Maksimalni intenziteti potresa računati su primjenom teorije ekstrema na dva načina, označavani s A i B, jednako kao i kod proračuna maksimalnih akceleracija. Korišten je također uzorak godišnjih ekstrema iz razdoblja 1899-1993 godine. Izračunate vrijednosti intenziteta I koje odgovaraju pojedinim povratnim periodima T, prikazane su u tablici 4.

T (god.)	I_{max} (" MCS)		$I_{max}-s$		$I_{max}+s$	
	A	B	A	B	A	B
50	7.13	6.99	6.88	6.70	7.39	7.29
100	7.46	7.36	7.17	7.02	7.74	7.70
200	7.71	7.66	7.39	7.27	8.03	8.05
300	7.84	7.81	7.44	7.40	8.18	8.22
500	7.98	7.98	7.61	7.52	8.34	8.44
1000	8.13	8.17	7.73	7.66	8.53	8.69
10000	8.45	8.60	7.95	7.94	8.95	9.26

Tablica 4 Maksimalni intenziteti I_{max} kao funkcija povratnog perioda T

Usporedba vrijednosti intenziteta 8.6° MCS, određene na osnovi seizmotektonskih podataka, s vrijednostima 8.5, odnosno 8.6° MCS koje prema gorejnoj tablici odgovaraju povratnom periodu 10000 godina, ukazuje na dobro podudaranje rezultata.

Vrijednosti maksimalnih intenziteta kao funkcija eksploatacijskog perioda i nivoa rizika, prikazane su u tablici 5. Navode se samo vrijednosti koje odgovaraju slučaju B, proračun uz stvarne žarišne udaljenosti, budući da su one za veće povratne periode nešto veće od analognih u slučaju A.

E (god.)	R(%)	$I_{max} (^{\circ} \text{MCS})$	$I_{max} + s$	$I_{max} - s$
100	10	8.16	7.65	8.67
100	20	7.94	7.49	8.40
100	30	7.79	7.37	8.21
200	10	8.32	7.76	8.88
200	20	8.14	7.64	8.65
200	30	8.01	7.54	8.48

Tablica 5 Maksimalni intenziteti I_{max} kao funkcija eksploatacijskog perioda E i rizika R

PROJEKTI SEIZMIČKI PARAMETRI

Kako je već spomenuto, determinističkim načinom definirane vrijednosti predstavljaju apsolutne maksimume za koje se ne očekuje da budu premašeni u ma kolikom vremenskom razdoblju. Za horizontalnu akceleraciju dobiveno je tim načinom

$$a_{max} = 0.29 \text{ g},$$

a za intenzitet

$$I_{max} = 8.6^{\circ} \text{ MCS}.$$

Vjerojatnosnim pristupom računane su vrijednosti horizontalnih akceleracija i intenziteta potresa kao funkcije povratnog perioda, nivoa rizika i eksploatacijskog perioda. Ako se uzme da su potresi tipa S_1 i S_2 definirani vrijednostima povratnog perioda 200 i 1000 godina, dobivaju se za horizontalnu akceleraciju i intenzitet ove vrijednosti:

$$\begin{aligned} \text{potres } S_1 : \quad I_{max} &= 7.7^{\circ} \text{ MCS} \\ a_{max} &= 0.17 \text{ g} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{potres } S_2 : \quad I_{max} &= 8.2^{\circ} \text{ MCS} \\ a_{max} &= 0.22 \text{ g} \end{aligned}$$

Kako se radi o objektu temeljenom na čvrstoj stijeni, ne očekuje se amplifikacijski učinak površinskih slojeva, te je dinamički faktor amplifikacije (DAF) jednak jedinici i nema prirasta izračunatom maksimalnom intenzitetu. Stoga navedeni parametri predstavljaju i konačne projektne vrijednosti horizontalnih akceleracija i makroseizmičkih intenziteta.

ZAKLJUČAK

Lokacija brane Peruća nalazi se u seizmički vrlo aktivnom području, kako u lokalnom tako i regionalnom smislu. Od potresa koji su se dogodili, najveće značenje imaju potresi iz seizmičkih izvora:

- Sinjsko Polje, najjači potres: 2.7.1898., epicentralnog intenziteta IX° MCS i udaljenosti 23 km od Peruće i
- Svilaja, za lokaciju najznačajniji potres: 27.11.1990., epicentralnog intenziteta VII-VIII° MSK, magnitude 5.6, i udaljenosti od lokacije 5 km.

Navedena dva potresa manifestirala su se na lokaciji brane Peruća horizontalnim akceleracijama 0.16 i 0.15 g, odnosno intenzitetima 7.1 i 7.9° MCS.

Brama Peruća nalazi se u rubnom dijelu regionalne strukturne jedinice Dinarika i to u zoni rasjeda koji dijeli dvije glavne navlačne i seizmogene strukturne jedinice: Svilaju (1) i Dinaru-Kamešnicu (2). U tektonskim pokretima bitna su podvlačenja masa stijena u dubini i navlačenja bliže površini. Recentno djelovanje regionalnog stresa uvjetuje izražene tangencijalne pomake u čelnom dijelu navlačnih struktura i dijagonalne u prostoru naglašenom horizontalnom komponentom daž povoljno orijentiranih rasjeda. Na površini oko brane Peruća nalaze se rasjedi iz zone Vrljika-Sinj. Koncentracije žarišta potresa u prostoru mogu se povezati s najvažnijim izdvojenim zonama rasjeda. U obuhvaćenom području ključne su zone vezane s rasjedima: Obrovac-Drnit-Klis, Split-Ploče, Muć, Dinara-Kamešnica, Mosor-Biokovo i Vrljika-Sinj.

Potresni izvori pridruženi su seizmotektonski aktivnim zonama, izdvajanjem četiri potresna izvora: Sinjsko polje, Svilaja, Mosor-Biokovo i Dinara-Južni Velebit.

U okviru inženjersko-seizmoloških istraživanja računata su maksimalne vrijednosti horizontalnih akceleracija i makroseizmičkih intenziteta. Proračun je proveden na dva načina: determinističkim pristupom na osnovi rezultata seizmotektonskih istraživanja, i vjerojatnosnim u suglasju s koncepcijom seizmičkog rizika.

Determinističkim načinom definirane vrijednosti predstavljaju apsolutne maksimume za koje se ne očekuje da budu premašene u bilo kojem vremenskom razdoblju. Za horizontalnu akceleracija dobiveno je tim načinom

$$a_{\max} = 0.29 \text{ g,}$$

a za intenzitet

$$I_{\max} = 8.6^{\circ}.$$

Vjerojatnosnim pristupom računane su vrijednosti horizontalnih akceleracija i intenziteta potresa kao funkcije povratnog perioda, nivoa rizika i eksploatacijskog perioda. Potresi S_p , odnosno S_2 , definirani su vrijednostima povratnog perioda 280, odnosno 1000 godina. Dohiivene su vrijednosti:

$$\begin{array}{lll} \text{za potres } S_p: & I_{\max} = 7.7^{\circ} \text{ MCS} & a_{\max} = 0.17 \text{ g} \\ \text{za potres } S_2: & I_{\max} = 8.2^{\circ} \text{ MCS} & a_{\max} = 0.22 \text{ g} \end{array}$$

Kako se radi o objektu temeljenom na čvrstoj stijeni, ne očekuje se amplifikacijski učinak površinskih slojeva, te je dinamički faktor amplifikacije (DAF) jednak jedinici i nema prirasta izračunatom maksimalnom intenzitetu. Stoga navedeni parametri predstavljaju i konačne projektne vrijednosti horizontalnih akceleracija i makroseizmičkih intenziteta.

LITERATURA

- [1] Aljinović, B., Prelogović, E. & Skoko, D. (1990): Tectonic processes on the contact of the Adriatic Platform and the Dinarides in the area of the Northern Dalmacija. Proc. of the Inter. Conf. on Mechanics of jointed and faulted rock, Inst. of Mech/Tech. Univ. of Vienna, 179-182, A.A. Balkema, Rotterdam/Brookfield
- [2] Anderson, H. & Jackson, J., (1987): Active tectonics of the Adriatic region. Geophy. J.R.A.S., 91,937-983
- [3] Cornell, C.A. (1968): Engineering Seismic Risk Analysis. BSSA, Vol. 58
- [4] Gumbel, E.J., (1958): Statistics of Extremes. Columb. Univ. Press, New York
- [5] Herak, D., Herak, M., Sović, I. i S. Markušić (1991): Seismicity of Croatia in 1989 and the Kamešnica Mt. earthquake, Geofizika, Vol. 8, 83-99.
- [6] Herak M.J.(1986): A new concept of geotectonics of the Dinarides. Acta geol., YAZU, 16, 1-42, Zagreb
- [7] Herak, M. (1989): The magnitude-intensity-focal depth relation for the earthquakes in the wider Dinara region, Geofizika, 6, 13-21.
- [8] Herak, M., (1991): Dinaridi, mobilistički osvrt na genezu i strukturu. Acta geol. 21/2, Priir.-istraž., 63, HAZU, 35-117, Zagreb

- [9] Jenkinson, A.F. (1969): Statistics of Extremes in Estimation of Maximum Floods. Techn. note no. 98, WMO, WMO-No. 223, T.P.126 Geneva
- [10] Kuk, V. (1982): O maksimalnom intenzitetu potresa. Magistarski rad, PMF Zagreb
- [11] Kuk, V., Prelogović, E., Marić, K., Skoko, D., Allegretti I., Herak, M., Herak, D., Milošević, A., Ivanić, I., Sović, I., Jamičić, D., Aljinović, B., Markušić, S., Markovac, Z. (1994): Brana Peruća - studija seizmičkih parametara. Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb
- [12] Magdalenić, A. (1971): Hidrogeologija slova Cetine. Krš Jugosl; YAZU, 74, Zagreb
- [13] Makjanić, B. (1977): Applying the Theory of Extremes in Geophysics. Hidrometeorološki zavod RH, Zagreb
- [14] McGuire R. K. (1976): Seismic risk analyses, USGS, Open File Rep.
- [15] Milošević, A., Prelogović, E. & Herak, D. (1984): Seizmičnost prostora Dinare. Geol. vjesnik, 37, 205-215, Zagreb
- [16] Miljush, P. (1973): Geologic - Tectonic structure and evolution of outer Dinarides and Adriatic area. B.A.A.P.G., 57/5, 913-929, Tulsa
- [17] Prelogović, E., Bahun, S. & Aljinović, B. (1990): Neotektonski odnosi područja s evaporitima između Bihaća, Knina i Sinja. ARH. Inst. geol. istraž., Zagreb
- [18] Prelogović, E. & Kranjec, V. (1983): Geological development of the Adriatic area. Pomorski zbornik, 21, 387-405, Rijeka
- [19] Prelogović E., D. Skoko, V. Kuk, K. Marić, A. Milošević, M. Živčić, M. Herak, I. Allegretti, I. Sović (1985): Određivanje karakteristika potresa S1 i S2 na lokaciji nuklearne elektrane Slavonija, RGN i PMF, Zagreb
- [20] Skoko, D., Prelogović, E. & Aljinović, B. (1987): Geological structure of the Earth's crust above the Moho discontinuity in Yugoslavia. Geophy. J.R.A.S, 89, 379-382
- [21] Skoko, D. & Prelogović, E. (1988): Seismic potential of Yugoslavia territory. Proc. of the Ninth World Conf. on Earthquake Engineering, August 2-9, 1988, Vol. II, 163-168, Tokyo-Kyoto

- [22] Skoko, D. & Prelogović, E. (1989): Geological and seismic data required for maximum earthquake magnitude determination. *geol. vjesnik*, 42, 287-289, Zagreb
- [23] Skoko, D., V. Kuk, K. Marić, I. Allegretti, S. Markušić (1993): Instrumentalno praćenje seizmičke aktivnosti područja HE PERUČA - I i II dio, Geofizički zavod PMF-a, Sveučilište u Zagrebu (rukopis)
- [24] Sponheuer W. (1960): Methoden zur Herdtiefenbestimmung in der Makroseismik, Freiburger Forschungshefte C 88, Akademie Verlag, Berlin.

ANALIZA VELIKIH VODA NA PREGRADNOM PROFILU BRANE PERUĆA

Dr.sc. Ranko Žugaj, dipl.ing.građ.,
INSTITUT ZA ELEKTROPRIVREDU I ENERGETIKU d.d.
ZAGREB

SAŽETAK

Velike vode Cetine u profilu brane Peruća definirane su maksimalnim protocima i hidrogramima velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja. Opisane su glavne hidrološke karakteristike otečanja velikih voda sa krškog sliva Cetine. Na temelju podataka izravnih opažanja iz razdoblja (1961-1986) analizirani su maksimalni protoci za vlažnu (X-V mjesec) i sušnu sezonu (VI-IX mjesec) unutar godine te oblik i volumeni hidrograma velikih vodnih valova. Hidrogrami su razmatrani za izolirane pojave vodnih valova u vlažnoj i sušnoj sezoni, a za vlažnu sezonu posebno su analizirani dvostruki veliki vodni valovi. Pokazano je da se mjeraodavni hidrogrami velikih voda različitih povratnih razdoblja mogu konstruirati u obliku trokuta.

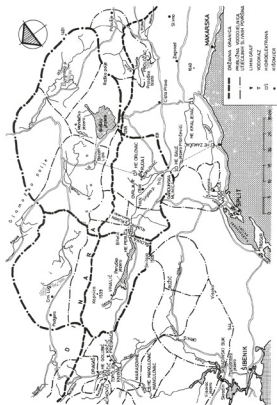
UVOD

Velike vode Cetine u profilu brane Peruća treba odrediti zbog dimenzioniranja evakuacijskih objekata brane Peruća i zbog rada akumulacijskog jezera Peruća. Prema tome potrebno je definirati maksimalne protoke i mjeraodavne hidrograme velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja.

Za velike vode analizirani su raspoloživi hidrološki podaci od izravnih opažanja hidroloških veličina. Kod toga od velike je važnosti uzeti u obzir specifičnosti koje karakteriziraju otečanje vode u krškim područjima, kojima pripada i sliv Cetine.

GLAVNE HIDROLOŠKE KARAKTERISTIKE

Dinarski krški masiv, kojem pripada sliv Cetine daje mu bitne geomorfološke oblike i izrazite orografske karakteristike. Udaljenost sliva Cetine od mora predstavlja prirodnu barijeru vlažnim morskim strujanjima s obiljem atmosfertske vlage, zbog čega nastaju povoljni uvjeti za kondenzaciju i stvaranje obilnih količina oborina [4].



Općenita je karakteristika krša rijetka hidrografska mreža, pa je oko dvije trećine stalnog dotoka Cetine rezultat neprekidnog podzemnog pritjecanja vode najvećim dijelom iz krša jugozapadne Bosne [1].

Za provedenu analizu otjecanja na raspolaganju su bili dnevni dotoci vode u akumulacijsko jezero Peruća u razdoblju 1961-1986 preuzeti od službe HE Peruća, Hrvatska elektroprivreda d.d. Za Cetinu u profilu brane Peruća karakteristični su protoci:

- najniži izmjereni protok: $Q_{min} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$
- srednji protok: $Q_{sr} = 42,2 \text{ m}^3/\text{s}$
- najveći izmjereni protok: $Q_{max} = 298 \text{ m}^3/\text{s}$

Prema ovim podacima varijabilnost otjecanja Cetine u profilu brane Peruća za razdoblje 1964-1986 je:

$$Q_{min} : Q_{sr} : Q_{max} = 1 : 10 : 70 \quad (1)$$

U odnosu na varijabilnost otjecanja vode u dinarskom kršu koja je orijentacijski prema [2]

$$Q_{min} : Q_{sr} : Q_{max} = 1 : 10 : 100 \quad (2)$$

maksimalni protok Cetine u odnosu na srednji i minimalni je ispod prosječnih orijentacijskih proporcija iz izraza (1).

Utjecajni sliv Cetine do profila Gardunska Mlinica prikazan je na slici 1. Površina sliva Cetine do profila brane Peruća prema hidrogeološkoj razvodnici približno je $A=1380 \text{ km}^2$ [5]. Za sliv Cetine do profila brane Peruća prosječna godišnja bruto oborina je $P=1370 \text{ mm}$, a prosječna godišnja efektivna oborina je $P_e=960 \text{ mm}$, pa je prema tome prosječni godišnji utjecajni koeficijent $c=0,70$. Varijacije srednjih godišnjih protoka Cetine u profilu brane Peruća u području su najčešćih vrijednosti za krš, koeficijent varijacije je $c_v=0,24$. Raspodjela srednjih godišnjih protoka Cetine u profilu brane Peruća ima malu negativnu asimetriju, koeficijent asimetrije je $c_s=-0,21$.

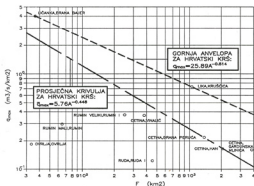
Najveći zabilježeni specifični dotoci sa sliva Cetine i njezinih glavnih pritoka u ovisnosti od veličine sliva prikazani su na slici 2. Uz njih su također prikazane karakteristične krivulje najvećih zabilješčenih specifičnih dotoka u ovisnosti od veličina slivova hrvatskog krša [6].

gornja anvelopa:

$$q_{max}=25,89A^{-0,14} \quad (3)$$

i prosječna zakonitost, kod koje je zbog velikih rasipavanja A , i q_{max} vrijednosti, koeficijent korelacije vrlo nizak; $r=-0,68$, pa je treba shvatiti orijentacijski:

$$q_{max}=5,76A^{-0,486} \quad (4)$$



Slika 2. Najveći zabilježeni specifični dotoci sa sliva Cetine q_{max} u ovisnosti od veličina slivova A , te prosječna krivulja i gornja anvelopa za hrvatski krš

Najveći zabilježeni specifični dotoci sa sliva Cetine i njezinih glavnih pritoka pod jakim su redukcijskim djelovanjem krškog podzemlja, pa se oni nalaze ispod prosječne krivulje izvedene za hrvatski krš [4]. Iznimka je najnižvodniji obrađeni profil Gardunska Mlinica na Cetini, do kojeg je doprinos otjecanja vode sa izravnog sliva veći nego u uzvodnom dijelu sliva Cetine i na njezinim lijevoobalnim pritocima.

Navedenim karakteristikama: srazmjerno malim međusobnim omjerima minimalnog, prosječnog i maksimalnog protoka 1:10:70, visokim otjecajnim koeficijentom srednje vode $c = 0,70$ te ispodprosječnim vrijednostima najvećih zabilježenih protoka u odnosu na krške slivove u Hrvatskoj, dokumentiran je jaki utjecaj krškog podzemlja na vodni režim Cetine.

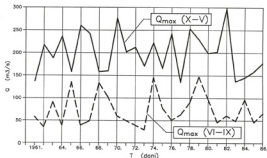
MAKSIMALNI PROTOCI

Kod rijeka dinarskog krša unutar godine vrlo izražene su vlažna i sušna sezona. Za proračun maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja na raspolaganju bili su 26-godišnji neprekinuti, homogeni nizovi međusobno nezavisnih podataka iz vlažnog razdoblja X-V mjesec i sušnog razdoblja godine, VI-IX mjesec. Nizovi maksimalnih protoka Cetine vlažne i sušne sezone u razdoblju 1961-1986 grafički su prikazani na slici 3. Napominje

se da su maksimalni protoci vlažne sezone ujedno i maksimalni godišnji protoci razdoblja 1961-1986.

Iz grafičkog prikaza nizova maksimalnih godišnjih protoka vlažnih i sušnih sezona u razdoblju 1961-1986 sa slike 3, može se i bez posebnog ispitivanja zaključiti da su razmatrani nizovi homogeni.

Pregledom dnevnih dotoka vode u akumulacijsko jezero Peruća ustanovljeno je da nema maksimalnog protoka kojem bi neposredno prethodio drugi maksimalni protok u nizu. Prema tome razmatrane nizove maksimalnih protoka može se smatrati međusobno nezavisnim [7].



Slika 3. Maksimalni protoci Cetine u profilu brane Peruća vlažne i sušne sezone u razdoblju (1961-1986)

Razdoblje obrade od 26 godina, koliko svaki niz ima članova, srazmjerno je kratko sa statističke analize. Zbog toga je ispitano da li su razmatrani nizovi dovoljno dugi. Korišten je izraz Kricky-Menkela za pogrešku koeficijenta varijacije σ_{cr} :

$$\sigma_{cr} = \pm \frac{c_v}{\sqrt{2(n-1)}} \sqrt{1+3c_v^2} \quad (5)$$

gdje su:

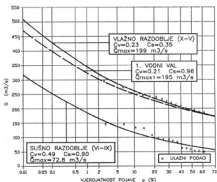
c_v - koeficijent varijacije razmatranog niza protoka

n - broj članova niza

Usvojen je kriterij D. Srebrečevića da je hidrološki niz dovoljno dug za statističku obradu ako je $\sigma_{\alpha} \leq 0,10$ [3].

Za niz maksimalnih protoka vlažnog razdoblja koeficijent varijacije je $c_v=0,23$, a za niz maksimalnih protoka sušnog razdoblja $c_v = 0,49$. Odgovarajuće vrijednosti pogreške koeficijenta varijacije su: za niz protoka iz vlažne sezone $\sigma_{\alpha} = 0,035$; a za niz protoka iz sušne sezone $\sigma_{\alpha} = 0,091$. Prema tome oba razmatrana niza dovoljno su dugi za primjenu metoda matematičke statistike.

Maksimalni protoci Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja za vlažnu i sušnu sezonu proračunani su iz podataka sa slike 3, na temelja različitih raspodjela. Kao najpogodnija za oba niza usvojena je Gumbelova raspodjela, tablica 1, kolone 2 i 4. Mjeronadne krivulje raspodjele maksimalnih protoka Cetine u profilu brane Peruća za vlažnu i sušnu sezonu, zajedno sa ulaznim podacima, grafički su prikazane na slici 4.



Slika 4. Maksimalni protoci različitih povratnih razdoblja Cetine u profilu brane Peruća za vlažnu i sušnu sezonu

Povratno razdoblje (god.)	Izolirani vodni val				Dvostruki vodni valovi							
	Važno razdoblje X-V mjesec		Sušno razdoblje VI-IX mjesec		Važno razdoblje X-V mjesec						Razlika - 100	
					1. vodni val		2. vodni val		Ukupni volumen $V_1 + V_2$ (10^6 m^3)			
	Q_{max} (m^3/s)	V (10^6 m^3)	Q'_{max} (m^3/s)	V' (10^6 m^3)	Q_{max1} (m^3/s)	V_1 (10^6 m^3)	Q_{max2} (m^3/s)	V_2 (10^6 m^3)				
	Q_{max} (m^3/s)	V (10^6 m^3)	Q'_{max} (m^3/s)	V' (10^6 m^3)	Q_{max1} (m^3/s)	V_1 (10^6 m^3)	Q_{max2} (m^3/s)	V_2 (10^6 m^3)	$\frac{Q_{max} - Q_{max2}}{Q_{max}}$ (%)	$\frac{(V_1 + V_2) - V}{V_1 + V_2}$ (%)		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
10.000	510	528	314	203	471	437	421	398	835	7,6	37	
1.000	427	443	249	161	397	373	375	359	732	7,0	39	
100	344	357	195	120	324	309	322	312	621	5,8	43	
50	319	331	166	107	301	290	304	297	587	5,6	44	
25	294	304	146	94,5	279	270	284	280	550	5,1	45	
10	259	269	120	77,4	248	244	256	255	499	4,2	46	
5	232	241	98,6	63,9	224	223	230	233	456	3,4	47	
2	192	199	67,1	43,4	187	191	185	194	385	2,6	48	
Razpodjela	Gumbel		Gumbel		Gumbel		log Pearson 3					
Prosjek c_s	199		72,8		195		189					
c_s	0,23		0,49		0,21		0,26					
S_s	0,35		0,90		0,96		0,93					

Oznake u tablici:

Q_{max} - maksimalni protok u vlažnoj sezoni, maksimalni godišnji protok

Q'_{max} - maksimalni protok u suhoj sezoni

Q_{max} - maksimalni protok 1. vodnog vala u dvostrukom vodnom valu

Q_{max} - maksimalni protok 2. vodnog vala u dvostrukom vodnom valu

V - volumen izoliranog velikog vodnog vala u vlažnoj sezoni

V' - volumen izoliranog velikog vodnog vala u suhoj sezoni

V_1 - volumen 1. vodnog vala u dvostrukom vodnom valu

V_2 - volumen 2. vodnog vala u dvostrukom vodnom valu

Tablica 1 Pregled karakterističnih vrijednosti velikih voda Četine u profilu brane Peruća

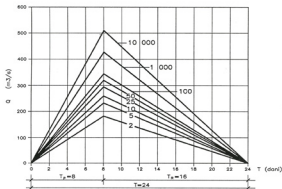
VELIKI VODNI VALOVI

Izolirani veliki vodni valovi

Analiza stvarnih, zabilježenih hidrograma velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća provedena je na temelju dnevnih dotoka u akumulacijsko jezero Peruća iz razdoblja 1961-1986 [7]. Obzirom na duga trajanja vodnih valova i lagane promjene veličine dotoka kao realan vremenski inkrement usvojen je jedan dan.

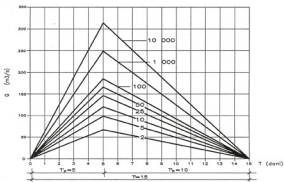
Za vlažno razdoblje u godini, X-V mjesec, određeno je prosječno vrijeme podizanja $T_p=8$ dana, a prosječno trajanje vodnog vala, baza hidrograma je $T=24$ dana. Za sušnu sezonu, VI-IX mjesec prosječno vrijeme podizanja vodnog vala je $T'_p=5$ dana, a trajanje vodnog vala je $T=15$ dana.

Oblik hidrograma izoliranih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća u vlažnoj i sušnoj sezoni na zadovoljavajući se način može aproksimirati trokutom.



Slika 5. Izolirani veliki vodni valovi različitih povratnih razdoblja Cetine za vlažno razdoblje godine X-V mjesec

Na temelja aproksimativnog trokutnog oblika, prosječnih vremena podizanja i trajanja te maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja, određeni su hidrogrami izoliranih velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja Cetine u profilu brane Peruća za vlažnu sezonu na slici 5 i za sušno sezonu na slici 6.



Slika 6. Izolirani veliki vodni valovi različitih povratnih razdoblja Cetine za sušno razdoblje godine VI-IX mjesec

Veličine volumena izoliranih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja su u tablici 1 - za vlažno razdoblje godine u koloni 3, a za sušno razdoblje godine u koloni 5.

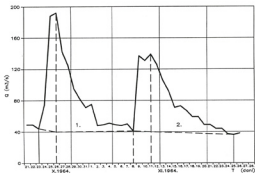
Dvostruki veliki vodni valovi

Kriško podzemlje u zaleđu akumulacijskog jezera Peruća, zbog velike zapremine svojih šupljina, redukcijski djeluje na velike vodne valove Cetine. To se očituje u dugim vremenima podizanja vodnih valova i u njihovoj dugoj recesiji. Zbog toga poslije jakih oborina veliki vodni val redovito traje duže od 15 dana.

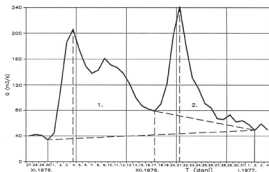
Često se događa u vlažnoj sezoni da, kad je hidrogram u recesiji, na sliv Cetine ponovo padnu jake oborine. U takvim slučajevima drugi se vodni val nastavlja na prvi i njih se može razmatrati zajedno kao dvostruki vodni val. Kod dvostrukih vodnih valova mogu se izdvojiti dva maksimalna, vrhina protoka, koji su najčešće međusobno udaljeni 15-30 dana.

Na osnovi hidrograma srednjih dnevnih protoka Cetine u profilu brane Peruća u razdoblju 1961-1986 ustanovljene su česte pojave uzastopnih, dvostrukih velikih vodnih valova [8]. U analiziranom razdoblju 1961-1986 obrađeno je 18 dvostrukih velikih vodnih valova. Izdvojeni su prvi i drugi vodni val te njihovi glavni elementi: maksimalni i bazni protoci, vremena podizanja i baze hidrograma te volumeni. Posebno je razmatran oblik hidrograma. Dva karakteristična hidrograma dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća prikazani su na slikama 7 i 8.

Svi dvostruki vodni valovi, koje zbog njihovih veličina i trajanja ima smisla analizirati, pripadaju vlažnom razdoblju godine, X-V mjesec.



Slika 7. Dvostruki veliki vodni val Cetine u profilu brane Peruća
23.10.1964-25.11.1964



**Slika 8. Dvostruki veliki vodni val Cetine u profilu brane Peruća
30.11.1976-2.1.1977**

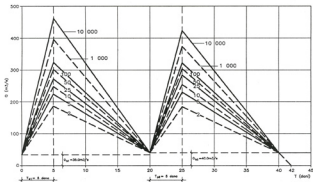
Dvostruki veliki vodni valovi Cetine u profilu brane Peruća u razdoblju 1961-1986 međusobno su nezavisni događaji, jer su između njih dovoljno duga razdoblja sa niskim dotocima vode. Zbog toga dotoci prethodnih valova praktički nemaju utjecaja na dotoke dvostrukih vodnih valova koji dolaze nakon njih. Ovo vrijedi kad se dvostruki valovi promatraju kao zasebne cjeline. Ali unutar svakog dvostrukog vodnog vala njegov prvi vodni val ima određeni utjecaj na drugi vodni val, koji dolazi odmah nakon njega. Navedeno svojstvo ne predstavlja problem, jer se prve i druge vodne valove, koji su unutar dvostrukih vodnih valova razmatra odvojeno.

Kod analiziranja pojedinih elemenata dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća najprije su za prve i druge vodne valove odvojeni bazni od izravnih dotoka. Prosječni bazni dotok prvog vodnog vala je $Q_{b1}=35,0 \text{ m}^3/\text{s}$, a drugog vodnog vala $Q_{b2}=40 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nizovi maksimalnih, vršnih protoka prvog i drugog vodnog vala homogeni su i dovoljno dugi za statističke analize: Za prvi vodni val: $n=18$; $c_v=0,21$; $\sigma_{\ln}=0,038$, a za drugi vodni val: $n=18$; $c_v=0,26$; $\sigma_{\ln}=0,04$. Na osnovi tih podataka proračunati su za oba vodna vala, unutar dvostrukog vodnog vala, maksimalni protoci različitih povratnih razdoblja prema različitim raspodjelama. Kao najpogodnije odabrane su za maksimalne protoke prvog vodnog vala Gumbelova raspodjela, a za maksimalne protoke drugog vodnog vala log-Pearson 3

razpodjela. Vrijednosti maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja Cetine u profilu brane Peruća su za prvi vodni val u koloni 6 tablice 1, a za drugi vodni val u koloni 8 tablice 1.

U koloni 11 tablice 1 prikazane su razlike u veličinama maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja izoliranih vodnih valova vlažnog razdoblja iz kolone 2 i prvog vodnog vala, iz dvostrukog vodnog vala, također vlažnog razdoblja iz kolone 6. Razlike su vrlo male i iznose do 7,6 posto za 10.000 -godišnje povratno razdoblje. To se vidi i na slici 4, gdje je uz krivulje raspodjele maksimalnih protoka vlažne i sušne sezone prikazana i krivulja raspodjele maksimalnih protoka prvog vodnog vala, iz dvostrukog vodnog vala. Prosječna vremena podizanja za svaki vodni val su pet dana, a prosječna trajanja svakog vodnog vala su 20 dana, tako da prosječni dvostruki vodni val traje ukupno 40 dana. Na temelju analize hidrograma stvarnih, zaštićenih dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća zaključeno je, da se njihovi oblici na zadovoljavajući način mogu aproksimirati trokutom. Sa usvojenim trokutnim oblikom, na osnovi prosječnih baznih protoka, maksimalnih protoka različitih povratnih razdoblja, te prosječnih vremena podizanja i trajanja vodnih valova, određeni su hidrogrami dvostrukih velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja Cetine u profilu brane Peruća, koji su prikazani na slici 9.



Slika 9. Dvostruki veliki vodni valovi Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja

Veličine volumena dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja su u tablici 1; za prvi vodni val u koloni 7, za drugi vodni val u koloni 9, a za ukupne dvostruke vodne valove, zbrojeni volumeni prvog i drugog vodnog vala u koloni 10.

Razlike između volumena dvostrukih i izoliranih velikih vodnih valova dosta su velike i iznose od 37 posto kod 10.000-godišnjih velikih vodnih valova, pa do 48 posto kod 2-godišnjih velikih vodnih valova, kolona 12, tablica 1. Prema tome kod akumulacijskog jezera Peruća treba u vlažnoj sezoni voditi računa o dvostrukim velikim vodnim valovima.

U tablici 2 uspoređeni su volumeni dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja određenih na temelju hidrograma u obliku trokuta, vrijednosti $V_1 + V_2$ u koloni 2 sa odgovarajućim volumenima dvostrukih vodnih valova određenih na osnovi raspodjele Pearson 3, koja se najbolje prilagođava proračunskim podacima, vrijednosti V' tablica 2, kolona 3.

Povratno razdoblje (god)	$V_1 + V_2$ ($10^6 m^3$)	V' ($10^6 m^3$)	$\frac{(V_1 + V_2) - V'}{V'} \cdot 100$ (%)
1	2	3	4
10 000	835	871	-4,1
1 000	732	736	-0,5
100	621	595	4,4
50	587	550	6,7
10	499	436	14
Raspodjela		Pearson 3	
Prosjeck		306	
c_s		0,32	
c_v		0,88	

Tablica 2 Usporedba volumena dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja trokutnog oblika $V_1 + V_2$ i prema raspodjeli Pearson 3 V'

Razlika između volumena dvostrukih velikih vodnih valova trokutnog oblika i volumena određenih po raspodjeli Pearson 3, kolona 4, tablice 2 za vodne valove od 50 do 10.000-godišnjeg povratnog razdoblja vrlo su male i ne prelaze sedam posto. Prema tome trokutni oblik hidrograma prihvatljiv je za dvostruke velike vodne valove Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja.

ZAKLJUČAK

Provedena analiza velikih voda Cetine u profilu brane Peruća pokazala je da se maksimalne protoke može razmatrati u vlažnoj sezoni, X-V mjesec, koji su ujedno i maksimalni godišnji protoci i u sušnoj sezoni unutar godine, VI-IX mjesec. Maksimalni dotoci sa sliva Cetine pod jakim su utjecajem krškog podzemlja, pa su zbog toga njihove vrijednosti u odnosu na druge krške slivove srazmjerno niske, sl. 2. Maksimalni protoci Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja vlažne sezone znatno su veći od odgovarajućih protoka sušne sezone, sl. 4.

Hidrogrami izoliranih velikih vodnih valova u vlažnoj sezoni naročito su bogati vodom u odnosu na izolirane velike vodne valove u sušnoj sezoni. Volumeni izoliranih velikih vodnih valova vlažne sezone prosječno su oko 2,5 puta veći od volumena velikih vodnih valova sušne sezone.

Uz izolirane velike vodne valove na Cetini često se puta, praktički uvijek samo u vlažnoj sezoni, pojavljuju dvostruki veliki vodni valovi, koji su znatno veći od izoliranih velikih vodnih valova vlažne sezone od 37 do 48 posto, tablica 1, kolona 12. Njihovom obradom određeni su hidrogrami dvostrukih velikih vodnih valova Cetine u profilu brane Peruća različitih povratnih razdoblja.

Na temelju provedenih obrada velikih voda Cetine u profilu brane Peruća zaključuje se:

1. Za dimenzioniranje evakuacijskih objekata brane Peruća treba koristiti rezultat obrade maksimalnih protoka vlažne sezone, koji su ujedno i maksimalni godišnji protoci, odnosno 10000-godišnji maksimalni protok: $Q_{10000} = 510 \text{ m}^3/\text{s}$, tablica 1, kolona 2.
2. Za rad akumulacijskog jezera treba koristiti:
 - u vlažnoj sezoni, X-V mjesec hidrograme dvostrukih velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja, sl. 9.
 - u sušnoj sezoni, VI-IX mjesec hidrograme izoliranih velikih vodnih valova različitih povratnih razdoblja sušne sezone, sl. 6.

LITERATURA

- [1] Baučić I.: Cetina - razvoj reljefa i cirkulacije vode u kršu, Geografski institut Sveučilišta u Zagrebu, 1967.
- [2] Herak M. i sur.: Krška hidrologija u osam zemalja na obodu Sredozemlja, Građevinski fakultet Sveučilišta u Sarajevu, 1975., 11-30.
- [3] Srebrenović D.: Problemi velikih voda, Tehnička knjiga, Zagreb, 1971.
- [4] Šepinac A.: Otjecanje u Dinarskom kršu, Krš Jugoslavije, knjiga 6, JAZU, Zagreb, 1969., 207-235
- [5] Žugaj R.: Prosječni protoci u kršu Hrvatske, Hrv. vode, 2 (1994) 8, 521-534.
- [6] Žugaj R.: Ekstremni protoci u kršu Hrvatske, Građevinar 46 (1994) 12, 749-763.

Ostali izvori:

- [7] Brana Peruća, Sanacija brane Peruća, Hidrologija Cetine - velike vode u profilu brane Peruća, Elektroprojekt inženjering d.d., Zagreb, 1994.
- [8] Brana Peruća, Sanacija brane Peruća, Hidrologija Cetine - analiza uzastopnih vodnih valova u profilu brane Peruća, Elektroprojekt inženjering d.d., Zagreb, 1995.

GEOTEHNIČKI ISTRAŽNI RADOVI I PRORAČUNSKI PARAMETRI ZA ANALIZE STABILNOSTI BRANE PERUĆA

Mr.sc. TOMISLAV IVŠIĆ, dipl.ing.građ.

Prof.dr.sc. ANTUN SZAVITS-NOSSAN, dipl.ing.građ.

Mr.sc. MEHO SAŠA KOVAČEVIĆ, dipl.ing.građ.

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

SAŽETAK

Prikazani su koncepcija, opseg i rezultati složenih geotehničkih terenskih i laboratorijskih istražnih radova u glinenoj jezgri provedenih godinu dana nakon oštećenja.

Izbor projektnih parametara za proračune statičke i seizmičke stabilnosti brane uključio je i podatke prikupljene tijekom izgradnje brane, te kontrolnih radova provedenih nakon dvadeset godina korištenja brane.

Usporedba najnovijih mjerenja i odabranih raspona parametara pokazuje da su proračunske vrijednosti glinenog materijala realno procijenjene.

UVOD

Nakon miniranja brane Peruća 28. siječnja 1993. godine, privremene sanacije oštećenja brane i ispuštanja vode iz jezera, pristupilo se izradi projekta sanacije. Za tu svrhu predviđeni su opsežniji geotehnički i geofizički istražni radovi s ciljem utvrđivanja stanja glinene jezgre te galerije i temeljne stijene kao ključnih čimbenika upotrebljivosti brane. Prvobitnim programom predviđeni su istražni radovi na krajevima i u središnjem dijelu brane. Rješenja sanacije zasnovana na vizuelnoj inspekciji i pokazateljima neposredno nakon pokušaja rušenja ukazala su na opravdanost iskopa i ponovne izgradnje krajeva brane, pa je i prvobitni program istražnih radova reduciran na središnji dio brane.

Zbog neposredne ratne opasnosti istražne radove na kruni brane nije se moglo izvesti tijekom cijele 1993. godine. Za to vrijeme započelo se s iskopom i sanacijom galerije, te je završen projekt sanacije cijele brane. Projektom je predviđen iskop i ponovna izgradnja krajeva, skidanje i rekonstrukcija gornjih 5-10 m središnjeg dijela brane, te izvedba vododržne dijafragme na uzvodnoj strani jezgre.

Nakon sporazuma o prekidu vatre u travnju 1994 godine započelo se s iskopom krajeva i gornjeg dijela brane. Istražni radovi s kote 353,0 m.n.m., 10 m niže od ranije krune brane izvedeni su u svibnju i lipnju 1994 godine.

NAMJENA I OPSEG GEOTEHNIČKIH ISTRAŽNIH RADOVA

Geotehnički istražni radovi provedeni su sa sljedećom namjenom:

- a) Uvid u stanje jezgre na mjestima bušenja i sondiranja s ciljem ustanovljenja eventualnih većih oštećenja koja mogu ugroziti izvedbu dijafragme.
- b) Rezultati pokusa na materijalu jezgre omogućuju provjeru proračunskih parametara gline u analizama statičke i seizmičke stabilnosti brane.

Istražni radovi izvedeni su kombiniranim terenskim metodama, bušenje s jezgrovanjem, standardni i statički penetracijski pokus, ispitivanje vodopropusnosti u bušotini, geofizičke metode, a laboratorijski program obuhvatio je širi spektar klasifikacijskih pokusa i pokusa za određivanje mehaničkih parametara tla.

Raspored istraživačkih mjesta na približnoj poziciji buduće dijafragme između stac 1+35,00 i 1+85,00 je takav da na svakih 5 m uzduž jezgre postoji kontinuirano ispitivanje po dubini jezgre. Naizmjenično su postavljene sondažne bušotine i ispitivanja statičkom penetracijskom sondom, pa su tako dobijeni podaci po dubini jezgre. Bušotine su produžene u stijenu ispod brane, tako da postoje podaci o stijeni na razmacima od 10 m.

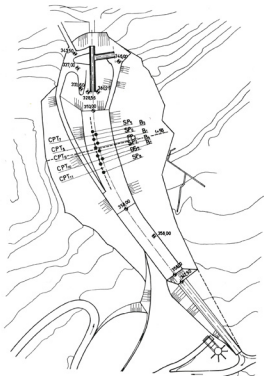
Grubo poprečno povezivanje u jezgri ostvareno je seizmičkom "cross-hole" metodom također na razmacima od 5 m po dubini jezgre. Ocijenjeno je da se takvom "mrežom" ispitivanja mogu registrirati veća područja oštećenja jezgre ili eventualne značajnije pukotine ili kaverne.

Situacija provedenih istražnih radova nalazi se na slici 1.

OPIS IZVEDENIH ISTRAŽNIH RADOVA

Istražno bušenje. Istražno bušenje i pokuse u bušotinama izvela je Geotekhnika, Zagreb, Odjel za injekcijske radove i specijalne premaze.

Bušotine su izvedene u svibnju i lipnju 1994. motornim bušilicama. U glinenoj jezgri bušenje je izvedeno jednostrukim jezgrenim aparatima profila 146-101 mm, bez upotrebe



Slika 1. Raspored geotehničkih istražnih bušotina

isplake, u manevrima od 1 m. U stijeni je bušenje izvedeno T6S jezgrenim aparatima uz korištenje vodene isplake.

Kod izvođenja bušotina i pokasa vodopropusnosti metodom Lefranc dolazilo je kod dužeg čekanja do zatvaranja bušotina zbog bujanja gline, pa ispitivanje propusnosti tom metodom nije izvedeno u bušotinama SP-6, SP-7 i SP-8.

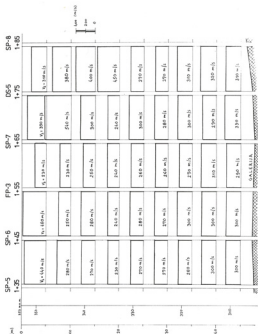
U bušotinama s oznakom SP izvedeni su prema planu standardni penetracioni pokusi na svakih 5 m po dubini glinene jezgre. Usporedo s jezgrovanjem uzimani su i poremećeni uzorci glinenog materijala. Osnovne fizikalne i klasifikacijske pokuse na tim uzrocima obavio je laboratorij Instituta građevinarstva Hrvatske Zagreb (IGH) - Poslovni centar Split.

Statička penetracijska sonda. Ispitivanja glinene jezgre statičkom penetracijskom sondom izvela je GEOTEHNIKA-Zagreb. Korištena je oprema nizozemskog proizvođača N.V. Goudsche Machinefabriek, Gouda s najvećom dopuštenom silom utiskivanja od 200 kN i silom izvlačenja od 260 kN. Sonda je električnog tipa, dimenzija prema standardu i omogućuje kontinuirano mjerenje otpora na šiljku i lokalnog trenja na plaštu. Zapis mjerenja vođen je analognim električnim pisačem. Za većinu sondi korišten je umanjivač trenja smješten na propisanoj udaljenosti od vrha sonde. Sonde nisu izvedene kontinuirano nego su penetracije izvedene u dionici od 10 m po dubini uz predbušenje, osim pri površini, gdje je dionica sezala i do 20 m.

Geofizički istražni radovi. Geofizičke istražne radove izvelo je poduzeće MOHO d.o.o., Zagreb u lipnju 1994. godine. Radovi su obuhvatili cross-hole ispitivanja i karotazna mjerenja u 6 bušotina. Pobuda za cross-hole predavanja je čekićem nakon izvođenja standardnog penetracionog pokusa na svakih 5 m dubine u bušotinama SP-6, SP-7 i SP-8. Opažanja su obavljena u prethodno izbušenim i zacičevljenim bušotinama SP-5, FP-3 i DS-5. Korišteni su trokomponentni geofoni za cross-hole, a uvedeni su i dodatni geofoni kako bi se cross-hole postupak dopunio seizmičkom polarnom metodom na uzdužnom profilu glinene jezgre.

Za ovu prigodu najznačajniji su rezultati brzine širenja posmičnih "v_s" valova u jezgri koji su zajednički prikazani na slici 2. U gornjem dijelu profila u većini mjernih mjesta uočava se odstupanje od pretežnog trenda i očekivanih kvantitativnih rezultata za glinene materijale: veće brzine v_s na dubini od 5 m, a prema sondi SP-8 i do 20 m dubine. Uzevši u obzir da je jezgra još uvijek relativno uska na dubini od 10-15 m od vrha, te da su bušotine od sredine jezgre pomaknute prema uzvodnoj potpornoj zoni moguće je da su seizmički valovi pronašli kraći privilegirani put kroz kruće filtarske slojeve i kameni zasip, pa su i prosječne brzine v_s nešto veće od očekivanja na malim dubinama. Odstupanja kod sonde SP-8 na većim dubinama ne uklapaju se u ovo moguće objašnjenje.

Probno injektiranje glinene jezgre. U sklopu geotehničkih istražnih radova izvedeno je i probno injektiranje glinene jezgre gravitacijskim zapanjivanjem, bušotine B3 i B4, te



Stĺka 2. Bráne posmiénň valova u jezgrí odredene cross-hole metodom

postupkom silaznog injektiranja usporedo s bušenjem, bušotine B1 i B2. Probno injektiranje izvela je Geotehnika-Zagreb. Injektiranje je izvedeno u bušotinama promjera 66 mm, a prilikom čekanja na vezivanje injekcijske smjese dolazilo je do bubrenja gline i zatvaranja bušotine. Do izbijanja injekcijske smjese došlo je u bušotini B-2 pri tlaku od 1,5 bara na etaži 10-15 m i pri pritisku od 3,0 bara u etaži 15-20 m.

Laboratorijsko ispitivanje uzoraka glinene jezgre. Laboratorijsko ispitivanje provedeno je u laboratoriju Odjela za geotehniku, IGH Zagreb, Poslovni centar Split. Na posmećenim uzorcima proveden je veći broj klasifikacijskih i indeksnih pokusa, granulometrija, zapreminske težine, Atterbergove granice, prirodne vlažnosti, pokus bujanja, a na neporemećenim uzorcima određivanja je čvrstoća gline, UU i CIU triaksijalni pokusi, te deformacijske karakteristike u statičkim, (edometar) i cikličkim uvjetima opterećenja (ciklički triaksijalni pokus, u laboratoriju Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu).

Pokusi bujenja (bujanja) ispitivani u edometru za neopterećen saturiran uzorak dali su veličine bujanja u rasponu od 0,61-2,09%.

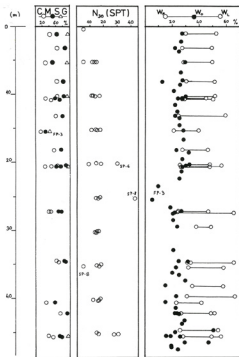
OPIS PROFILA JEZGRE BRANE

U cijelosti gledajući u ispitivanom dijelu jezgre uočljiv je relativno visok stupanj homogenosti glinenih materijala što potvrđuju neposredni opisi izvađenih glinenih uzoraka prilikom bušenja, te razumno podudarni rezultati terenskih, SPT, CPT, cross-hole i laboratorijskih pokusa.

Očekivane heterogenosti uslijed oštećenja bile bi zone razrahljenog materijala s povećanom vlažnošću i niskom otpornošću na penetracije ili čak kaverne (rupe), gdje bi propadala oprema za bušenje uslijed vlastite težine. Takve zone u ispitivanom rasteru nisu pronađene, što navodi na zaključak da su eventualna oštećenja jezgre, ukoliko postoje, prvenstveno lokalnog karaktera i manjih razmjera.

Činjenica da je jezgra brane nedugo nakon eksplozije i pražnjenja izdržala pritiske vode visine otprilike pola jezera bez značajnijih procjeđivanja, pri kojima je izvedena i rekonstrukcija galerije bez havarije upućuje na to, da kroz eventualna lokalna oštećenja nisu bili uspostavljeni privilegirani putevi, koji bi doveli do naknadnih nepovoljnih učinaka vode. U najvećem dijelu brane visina galerije je oko 4% visine jezgre, a njen volumen ispod 1% volumena glinenog tijela jezgre (po metru visine brane). Čini se da je podatljivo tijelo jezgre ispunilo rupe nastale miniranjem sroda galerije i prilagodilo se novonastalim okolnostima bez drastičnih lomova. Svojstvo bujanja (bubrenja) gline koje je zamijećeno pri istražnom bušenju i potvrđeno u laboratoriju vjerojatno je utjecalo na zatvaranje sitnijih pukotina u područjima manjih lokalnih pritisaka.

Budući da su istražni radovi izvedeni gotovo godinu i pol nakon miniranja brane, to oni i odražavaju novoprilagođeno stanje jezgre.



Slika 3 Zajednički prikaz granulometrijskog sastava, SPT i vlažnosti za sve bušotine u jezgri

Na slici 3. nalazi se zajednički prikaz podataka o granulometrijskom sastavu, broju udaraca SPT, Atterbergove granice i prirodne vlažnosti iz svih bušotina.

Granulometrijski prikaz pokazuje da je uglavnom riječ o materijalu s više od 60-80% prašinih i glinovih čestica, s izuzetkom sonde FP-3, gdje je pronađena leća šljunčanog materijala na dubini od 15 m i tragovi šljunka u gornjem dijelu profila.

Zbroj udaraca SPT za prvih 30 cm penetracije (nije po standardu) kvalitativno ukazuje na ujednačenost po dužini jezgre i blagi trend porasta s dubinom. Rezultati osjetno veći od prosjeka su lokalni i vjerojatno su posljedica nailaska na oblutke vapnenca i šljunkovite čestice o kojima se relativno često izješćuje u bušačim zapisima. Pojedinačne male vrijednosti broja udaraca na vrhu profila i u dubini, SP-8, mogu označavati lokalno oslabljenje ali isto tako i omekšanje materijala uslijed bušenja.

Prirodna vlažnost gline po dubini profila najdetaljnije je ispitana u bušotini FP-3. Na zajedničkom prikazu uočava se da se rezultati iz ostalih bušotina uklapaju u zatečeni rasap. U globalu su vrijednosti prirodne vlažnosti između 20 i 30% i podudaraju se s rasponom vlažnosti tijekom ugradnje (Nonveiller, 1983). Bitno manji rezultati oko dubine 25 m vjerojatno su posljedica rasušenog uzorka ili eventualno, ocijedenog nekoherentnog materijala, koji je zamijećen na toj dubini u bušotini FP-3. Osjetno povećanje vlažnosti, preko 40%, zamijećeno je samo na dva uzorka u bušotini FP-3 na kontaktu jezgre s galerijom. Budući da je u blizini te bušotine i pretpostavljeno mjesto eksplozije ove povećane vlažnosti bi mogle biti pokazatelji lokalnog razrahljenja glinene jezgre. Usporedbe s Atterbergovim granicama pokazuju, da su u pravila po cijeloj dubini profila prirodne vlažnosti na granici plastičnosti ili nešto manje od nje.

U bušotini FP-3 zamijećena je pojava šljunkovite gline ispod 20 m dubine, a mjestimično je leća bila debela i 60 cm (ispod vapnenačkog kamena). Čini se da se taj sloj-leća proteže i do sonde CPT-9 udaljene 5 m, gdje je na tim dubinama zamijećeno bitno povećanje otpora šiljka. Izbacivanje mjernih uređaja CPT izvan mjernog raspona vjerojatno je posljedica nailaska sonde na oblutke vapnenca ili krupnija zrna šljunka. Ovakva zrna ili tvrdi slojevi mogu odkloniti CPT-sondu od vertikale. Budući da su obavljena predbušenja vjerojatno su veća odstupanja tim postupkom korigirana.

Leća nekoherentnog propusnog materijala vjerojatno je bila ispunjena vodom, pa je probijem tijekom bušenja i sondiranja uspostavljena veza i ostvareno procjeđivanje u bušotinu FP-3. Sama leća nalazi se u sredini visine brane i vjerojatno nije neposredna posljedica miniranja. Naime, eksplozija u galeriji bi izbacila krhotine betonskog svoda sive boje koje nisu zamijećene, a slijezanje krune i potporne zone je bilo u gornjih nekoliko metara brane i imalo smjer prema jezera, a ne prema jezgri. Sličan je slučaj i s oblutina vapnenca bijele boje, koji su pronađeni na različitim dubinama i u bušotinama izvan

pretpostavljenog mjesta eksplozije. Na fotografijama iskopa krajeva također se mjestimično vide obluci u jezgri.

Potporne zone građene su istovaranjem kamenog materijala u debljim slojevima bez zbijanja tijekom cijele sezone, dok je izgradnja glinene jezgre imala prekide u klimatski nepovoljnim razdobljima. Iz tog razloga je izgrađeni nivo jezgre bio niži od susjednih potpornih zona pa je moguće, da se pojedino kamenje otkotrljalo na jezgru i tamo ostalo zatrpano. Stoga nije nerealna mogućnost da su neglineni sastojci jezgre prisutni još od samog građenja brane.

Probno injektiranje također je pokazalo povećani utrošak materijala u pojedinim etažama, a konsolidacijsko injektiranje u sklopu sanacijskih radova također je u središnjem dijelu jezgre pokazalo povećanje utroška materijala. Tim postupkom je generalno smanjena propusnost jezgre i zapunjene su eventualne pukotine i leće bez obzira na uzroke njihovog postojanja. Stoga se može ocijeniti da provedene sanacijske mjere zajedno s dijafragmom u središnjem dijelu predstavljaju zadovoljavajuće sigurno rješenje.

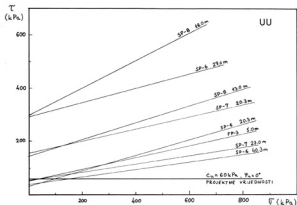
PARAMETRI GLINENE JEZGRE

Parametri čvrstoće. Za analize stabilnosti brane metodom graničnih stanja uz pretpostavljeni mehanizam sloma (klizne plohe) bitni su i parametri čvrstoće materijala. U sklopu laboratorijskih istražnih radova proveden je veći broj triakslijalnih pokusa, UU i CIU, a posredno se nedrenirana čvrstoća može ocijeniti i preko rezultata statičke penetracijske sonde.

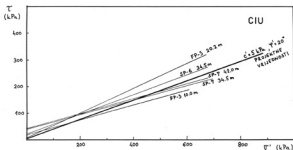
Parametri čvrstoće u **totalnim naponima (nedrenirana čvrstoća)** određeni su nekonsolidiranim nedreniranim, UU pokusima, a zajednički prikaz rezultata mjerenja nalazi se na slici 4. Uočava se razmjerno velik rasap rezultata te grupiranje u skupine s nedreniranim kohezijom oko 50 kPa, 150 kPa i 300 kPa. Uzorci s najvećim rezultatima imali su nešto manju prirodnu vlažnost, 17,5-20% i veću zbijenost, suha gustoća 1,74-1,83 t/m³, u odnosu na ostale uzorke, $\gamma_d=1,5-1,6$ t/m³, $w_p>25\%$. Za neke od uzoraka s niskim vrijednostima parametara navedeno je u izvještaju da ne odgovaraju standardima.

Nedrenirana čvrstoća određena iz otpora šiljka CPT pomoću korelacije iznosi od 150-280 kPa što približno odgovara rasponu srednjih rezultata sa slike 4., no prema literaturi ta korelacija nije sasvim prikladna za ove djelomično zasićene i djelomično prekonsolidirane materijale.

Obzirom na heterogenost zbijenosti i vlažnosti glinene jezgre realno je za očekivati rasap rezultata čvrstoća. Odabrane projektne vrijednosti $c_u=60$ kPa i $\phi_u=0$, također prikazane na slici 4., dovoljno su konzervativne i obuhvaćaju najnepovoljnije slučajeve izmjerenih



Slika 4. Parametri nedrenirane čvrstoće - mjerene i projektne vrijednosti



Slika 5. Parametri čvrstoće u efektivnim naponima - mjerene i projektne vrijednosti

rezultata. Parametri čvrstoće u efektivnim naponima određeni su konsolidiranim nedreniranim pokusima uz mjerenje pornog tlaka, CIU pokusi, i prikazani zborno na slici 5. Uočava se nešto manji rasap rezultata. Izmjerene kohezije kreću se u rasponu od 8-42 kPa, a kutevi trenja od 15,2-25,1°. Prema očekivanjima iz literature izmjereni kutevi od 10-16° su preniski za ovaj tip materijala.

Za analize u efektivnim naponima odabrani su parametri $c' = 5$ kPa i $\phi' = 20^\circ$. Iz slike 5. se vidi da oni daju nešto niže čvrstoće od izmjerenih u područja nižih vertikalnih napona, a u području viših napona proračunske čvrstoće su u prosjeku mjerenja. Obzirom na relativno visoke faktore sigurnosti za dublje plohe u provedenim analizama ovakav izbor parametara se smatra zadovoljavajućim.

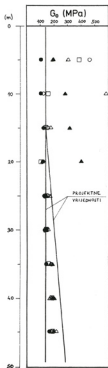
Dinamički parametri. Analize seizmičke stabilnosti brane metodom ključnog bloka uključuju proračune stabilnosti kosina i analizu dinamičkog odziva. Za stabilnost kosina metodom graničnih stanja korišteni su ranije navedeni parametri nedrenirane čvrstoće. Za analize dinamičkog odziva potrebna je raspodjela početnih posmičnih modula $G_0 = \rho \cdot v_s^2$, te nelinearne ovisnosti modula i prigušenja o posmičnoj cikličkoj deformaciji.

Na osnovu izmjerenih brzina širenja posmičnih valova v_s i prosječne gustoće $\rho = 2,0$ t/m³ određene su vrijednosti posmičnog modula G_0 i prikazane na slici 6.

Proračunske vrijednosti G_0 određene su pomoću korelacije $G_0 = 2300 \cdot c_u$ i proračunima su obuhvaćena dva profila modula po dubini: u prvom je G_0 konstantan, $G_0 = 138$ MPa, $v_s = 263$ m/s, a u drugom G_0 raste s dubinom, $G_0 = 138-230$ MPa, $v_s = 263-339$ m/s. Iz prikaza na slici 6. se vidi da se proračunski i mjerni raspon modula u globalu dobro podudaraju, osim lokalnih devijacija na vrhu profila navedenih ranije.

Nelinearni odnosi modula i prigušenja s posmičnom deformacijom ispitani su na tri uzorka cikličkim triaksijalnim pokusom. Ispitivanja uzoraka s mjerenjem deformacija neposredno na uzorku (Hall-osjetila) pokazuju redukciju modula u skladu s primijenjenim odnosima iz literature, a vrijednost izmjerene maksimalnog modula je u rasponu geofizičkih mjerenja. Izmjerena prigušenja su nešto veća od primijenjenih u proračunima, što proračun čini nešto konzervativnijim. Na slici 7. prikazani su obrađeni rezultati jednog cikličkog triaksijalnog pokusa.

Iz ovog prikaza se može zaključiti da su dinamički proračunski parametri glinene jezgre odabrani realno ili konzervativno, pa se ocjenjuje da provedeni proračuni zadovoljavaju potrebe projekta.



Slika 6. Dinamički moduli posmika " G_s " u glinenoj jezgri
- mjerene i projektne vrijednosti

PARAMETRI KAMENOG NASIPA

U sklopu sanacionih radova nisu bila provedena ispitivanja materijala kamenog nasipa, pa su parametri tog materijala procijenjeni prema rezultatima sakupljenim tijekom izgradnje brane (Nonveiller, 1958) i prema novijim spoznajama iz stručne literature.

Izvedba kamenih potpornih zona brane Peruća slijedila je tadašnja svjetsku praksu izvedbe kamenih nasipa, relativno uniformna granulacijska krivulja s malo sitneži, nasipavanje u visokim slojevima, natapanje kamena vodom. Ovakva praksa (dumped rockfill) je krajem pedesetih i početkom šezdesetih godina osjetno promijenjena (Nonveiller, 1983, Cooke 1984), pa se s postupka istovarenog, nasipnog kamena (dumped rockfill) prelazi na postupak zbijenog kamenog nasipa (compacted rockfill).

Donji dio kamenog nasipa brane Peruća izvođen je u slojevima debljine 12 m, a gornji dio u slojevima debljine 6 m. Prema opisima, u nizvodnu kosinu ugrađen je kamen sitnije, a u uzvodnu kosinu kamen krupnije granulacije. Zbijanje kamena u nasipu obavljeno je pomoću jakih mlazeva vode u omjeru 4m³ vode na 1m³ nasipa.

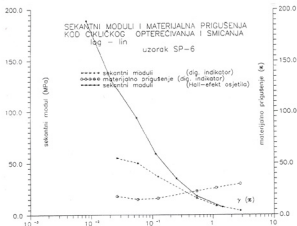
Prosječni granulometrijski sastav kamena iz kamenoloma (Nonveiller, 1958) pokazuje da je maksimalno zrno veće od 500 mm, te da zrna manjih od 2 mm ima ispod 8%. Pokusna nasipavanja pokazala su da je postupkom ugradnje moguće postići suhe gustoće od 1.75 t/m³ do 1.88 t/m³.

Za nekoherentne materijale većih promjera zrna karakteristična je pojava **drobljenja zrna** i time promjena u mehaničkom ponašanju. Pokušaji da se ta pojava kvantificira i korelira s drugim mjerljivim parametrima su uglavnom empirijske naravi (npr. Marsal 1973, Hardin, 1985). Prema Hardinu (1985) kameni materijal brane Peruća ima potencijal lomljivosti $B_n = 2.95$. Relativna lomljivost B_n se za raspon vertikalnih napona od 200 - 1000 kPa i raspon horizontalnih napona od izotropne konsolidacije do pasivnog tlaka, kretala u ekstremima od 1 - 15 %. Ocjenjeno je, da su za veći dio kamenog nasipa prognozne promjene granulometrijskog sastava umjerenog opsega.

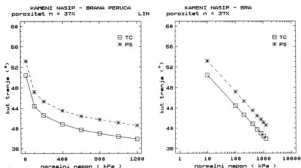
Čvrstoća nekoherentnih materijala ovisi o više čimbenika, a kao značajni, za isti mineraloški sastav se ističu zbijenost, granulometrijski sastav i iznos normalnih napona.

Ispitivanja za Peruću na pokusnom granitu (Nonveiller, 1958) provedena s promjenljivim maksimalnim zrnom indiciraju porast kuta trenja s porastom promjera maksimalnog zrna, što bi upućivalo na kut trenja od 45° kao realan ili čak konzervativan izbor.

Detaljniji uvid u čvrstoću kamenih materijala brane Peruća može se steći empirijskim pristupom Bartona i Kjaernslija (1981) kojim su obuhvaćeni utjecaji čvrstoće osnovnog



Slika 7. Rezultati cikličkog triaksijalnog pokusa na glinenom uzorku
sekantni moduli i prigušenje



Slika 8. Varijacija kuta trenja kamenog nasipa s normalnim naponom

materijala, veličine prosječnog zrna nasipa, oblika zrna, zbijenosti materijala i normalnih napona. Efektivni kut trenja " Φ " određuje se pomoću izraza:

$$\Phi = R \log (S/\sigma'_n) + \Phi_0$$

- gdje su:
- R - ekvivalentna hrapavost zrna zavisna o obliku i porijeklu zrna, te zbijenosti, porozitetu, materijala nakon ugradnje
 - S - ekvivalentna čvrstoća zrna zavisna o jednoaksijalnoj čvrstoći izvorne stijene, promjeru prosječnog zrna, D_{50} i tipu ispitivanja, triaksijalno ili ravninsko stanje deformacija
 - σ'_n - efektivni normalni napon
 - Φ_0 - "osnovni" kut materijalnog trenja, obično u rasponu od 25° - 35°

Promjer prosječnog zrna materijala Peruće je, $D_{50}=150$ mm. Uz pretpostavljenu jednoaksijalnu čvrstoću vapnenca $\sigma_c=100$ MPa i prosječni osnovni kut $\Phi_0 = 30^\circ$ analizirani su utjecaji zbijenosti i normalnih napona za triaksijalno, TC stanje i ravninsko stanje deformacija, PS. Karakteristični rezultati za porozitet $n = 37\%$, gustoća 1.75 t/m³, prikazani su na slici 8. za linearno i logaritamsko mjerilo napona

Drobljenje zrna pri većim naponima smanjuje promjer prosječnog zrna, a kroz naknadno slijeganje nasipa i zapunjavanje pora povećava se zbijenost kamenog materijala. U svjetlu provedenih analiza ovi efekti trebali bi povećati čvrstoću materijala, no prema procjenama taj doprinos ne bi trebao biti značajan. Osim toga, takav prirodni "proces zbijanja" nije pod kontrolom niti ravnomjeran, pa na njega u konzervativnom projektiranju ne treba računati. Stoga je za proračune izabran kut trenja od 45° za raspon normalnih napona 0 - 200 kPa i kut trenja 41° za veće normalne napone.

Maksimalni posmični modul, G_0 , modul pri malim deformacijama, određen je prema empirijskim izrazima Seed i Idriss (1970) za nekoherentne materijale:

$$G_0 = 220 K_{200} \sigma_0^{0.33} \text{ (kPa)} \quad \text{gdje su}$$

K_{200} - bezdimenzionalni parametar zavisn o vrsti i zbijenosti tla

σ_0 - srednji efektivni pritisak

Prema literaturi parametar K_{200} je za šljunčane i kamene materijale veći od 100, a za moderne zbijene kamene nasipe kreće se u rasponu od 150-250 (Gazetas, 1992). Npr. za seizmičke analize visoke brane Orroville korištena je vrijednost $K_{200} = 130$, pri čemu je zbijeni kameni nasip imao osjetno sitnije frakcije nego kameni nasip u Perući. Obzirom na vjerojatno slabiju zbijenost kamena u Perući procjenjuje se parametar K_{200} u rasponu vrijednosti $K_{200} = 100$ -150.

Za nelinearne odnose posmičnog modula i prigušenja s cikličkom posmičnom deformacijom korištene su preporučene krivulje iz literature (Seed i dr, 1985).

ZAKLJUČAK

Geotehnički istražni radovi provedeni u središnjem dijelu glinene jezgre brane Peruća provedeni su radi ustanovljenja eventualnih oštećenja jezgre koja mogu ugroziti izvedbu dijafragme i radi provjere proračunskih parametara tla.

Unutar ispitivanog rastera, 5 x 5 m, nisu pronađena veća područja razrahljenog materijala ili velike pukotine i rupe. Istražnim radovima je ukazano na moguća oštećenja jezgre u neposrednoj blizini mjesta eksplozije, te na lokalne leće propusnog koherentnog materijala u središtu jezgre.

Priprema jezgre konsolidacijskim injektiranjem vjerojatno je zapunila manje propusne zone i omogućila sigurniju izvedbu vododržive dijafragme koja treba brani dati konačnu sigurnost.

Projektni proračunski parametri glinene jezgre su odabrani realno ili na strani sigurnosti u odnosu na rezultate ispitivanja. Parametri kamenog nasipa procijenjeni su na osnovu podataka sakupljenih tijekom izgradnje brane i odgovarajuće literature.

LITERATURA

- [1] Barton, N., Kjaernsly, B. (1981)
Shear strength of rockfill. Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 107, GT7, 873-891.
- [2] Cooke, J.B. (1984)
Progress in rockfill dams, 18th Terzaghi lecture, Journal of Geotechnical Engineering ASCE, Vol. 110, No. 10, 1381-1414.
- [3] Gazetas, G., Dakoulas, P. (1992)
Seismic analysis and design of rockfill dams: state-of-the-art. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Vol. 11, No. 1, 27-61.
- [4] Hardin, B.O. (1985)
Crushing of soil particles. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 111, No. 10, 1177-1192.
- [5] Marsal, R.J. (1973)
Mechanical properties of rockfill. Embankment Dam Engineering, J.Wiley and Sons, New York, pp 109-200.

- [6] Nonveiller,E. (1958)
Projekt i građenje nasute brane "Peruća" na Cetini, Zbornik radova IV Kongresa za visoke brane, Beograd, 210-217.
- [7] Nonveiller,E. (1983)
Nasute brane-projektiranje i građenje. Sveučilište u Zagrebu, školska knjiga, Zagreb, 359 str.
- [8] Seed,H.B., Idriss,I.M. (1970)
Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. EERC, Report No. EERC 70-10, University of California, Berkeley.
- [9] Seed,H.B., Seed,R.B., Lai,S.S., Khameneipour,B. (1985)
Seismic design of concrete faced rockfill dams, Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance, ASCE 1985, 459-478 (citirano po Gazetas, 1992)

ANALIZA SEIZMIČKE STABILNOSTI BRANE PERUĆA

Prof.dr.sc. ANTUN SZAVITS-NOSSAN, dipl.ing.građ.

Mr.sc. TOMISLAV IVŠIĆ, dipl.ing.građ.

Mr.sc. MEHO SAŠA KOVAČEVIĆ, dipl.ing.građ.

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

SAŽETAK

Seizmička stabilnost brane analizirana je tzv. metodom "klizućeg bloka" koja uključuje analizu dinamičkog odziva tijela brane, određivanje kritičnih ubrzanja kliznih masa i procjenu trajnih pomaka brane nakon djelovanja potresa.

Analize dinamičkog odziva provedene su modelom "posmičnog štapa" promjenljive krutosti, a obuhvaćen je širi raspon dinamičkih parametara krutosti zemljanih materijala i odgovarajuće nelinearno naponsko-deformacijsko ponašanje. Za ulazne seizmičke parametre korišteno je više zapisa realnih potresa različitog frekventnog sastava. Kritična ubrzanja određena su uobičajenom metodom stabilnosti kosina. Za procjenu trajnih pomaka izvedeni su odgovarajući dijagrami za korištene akcelerograme.

Istim postupkom provedena je i analiza seizmičkog ponašanja brane za najjači dogodeni potres 1990 godine uz korištenje izvornih akcelerograma zabilježenih na bliskim lokacijama.

UVOD

Branu Peruća nasuta je kamena brana sa skoro uspravnom, relativno uskom glinenom jezgrom obostrano zaštićenom višeslojnim filtrima. Materijal jezgre je visokoplastična glina. Brana je smještena u kanjonu Cetine, točnije blago konkavno zaobljena u uzvodnom smjeru. Do njenog namjernog oštećenja od strane neprijatelja početkom 1993. godine, brana je tridesetak godina besprijekorno funkcionirala. Možda je zanimljivo napomenuti da do danas ni jedna brana tog tipa u svijetu nije doživjela značajnija oštećenja tokom jačih potresa.

Općenito pri maksimalnom mogućem potresu tijelo brane se ne smije srušiti zbog likvefakcije materijala u tijelu ili temelju, zbog klizanja po nekoj kliznoj plohi, zbog gubitka nadvijenja iznad razine vode u jezera, te zbog nekontroliranog procurivanja kroz pukotine. U slučaju brane Peruća problem likvefakcije nije prisutan, jer nema podložnih materijala

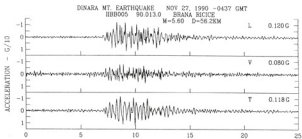
u brani, dok će se veličina klizanja po potencijalnim kliznim ploham kao i gubitak nadvijenja iznad razine vode kontrolirati seizmičkim proračunom. Nekontrolirano procurivanje kroz pukotine na rekonstruiranom dijelu brane spriječit će se odgovarajućim uzvodnim i nizvodnim filtrima. Pri tome uzvodni filter ima ulogu zapunjača eventualnih pukotina. Na oštećenom dijelu brane nekontrolirano procjeđivanje spriječit će se izvedbom vodonepropusne dijafragme koja nije podložna progresivnoj eroziji u slučaju procjeđivanja kroz eventualne pukotine.

Za seizmičku analizu nasutih brana danas je na raspolaganju niz postupaka, od vrlo pojednostavljenih do vrlo složenih (ICOLD 1986, Gazetas, Dakoulas 1992). Danas je preovlađujuće mišljenje da za brane koje nisu izgrađene iz materijala koji gube značajniji dio čvrstoće pri seizmičkom opterećenju ili nisu temeljene na takvim materijalima, zadovoljavaju analize osnovane na Newmarkovoj metodi ključeg bloka (Seed 1979, Marcusen, Hadala, Franklin 1980). Budući da ni u originalnoj, niti u rekonstruiranoj brani Peruća, nema likvefabilnih materijala, seizmički proračuni su provedeni varijantom Newmarkove metode ključeg bloka koji se sastoji od slijedećih koraka:

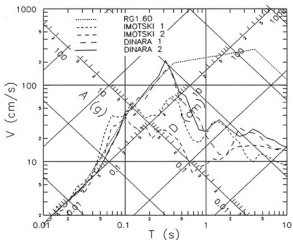
- I Usporedni proračun seizmičkog odziva brane postupkom Ambraseys i Sarma (1967) te pomoću programa SHAKE (Schnabel, Lysmer, Seed 1972). U prvom od ova dva postupka trokutasti presjek brane je predstavljen homogenom elastičnom konzolom koja se deformira samo horizontalnim pomacima ("posmična greda"). U drugom postupku trokutasti presjek brane također se predstavlja "posmičnom gredom" ali uslojenom konačnim brojem vodoravnih slojeva čija se posmična krutost odnosno prigušenje prilagođava prosječnoj veličini posmičnih deformacija. Time se omogućava približno uzimanje u obzir nehomogenog i nelinearnog ponašanja brane.
- II Proračun kritičnih vodoravnih uzezanja koja izazivaju jedinične faktore sigurnosti na potencijalnim kliznim ploham u tijelu brane modificiranim programom SSTAB1.
- III Proračun trajnih pomaka kliznih tijela Newmarkovom metodom ključeg bloka (Newmark 1965, Seed 1979) na osnovu rezultata koraka I i II kao podloge za procjenu trajnih deformacija brane.

Za rekonstruirane dijelove brane pretpostavlja se da će biti izgrađeni iz materijala istih ili boljih karakteristika od materijala u originalnoj brani, a modeliranje njihovog rasporeda u presjeku brane usklađeno je s glavnim projektom.

Ovi koraci proračuna s odgovarajućom parametarskom analizom detaljnije su provedeni za rekonstruirani srednji presjek brane, najveće visine $h=60$ m. Uz to je provedena analiza za presjeke različitih visina uzduž brane, te analiza utjecaja nadvijenja brane na njezin seizmički odziv. Provedena je i ocjena seizmičke stabilnosti brane prije oštećenja.



Slika 1. Vremeni zapisi potresa iz planine Dinara (arhiv Geofizičkog zavoda)



Slika 2. Spektri odziva Dinarskih potresa

Osim seizmičkih proračuna u tehničkim uvjetima za ugradnju materijala u rekonstruirane dijelove brane specificirane su mjere koje su u skladu sa suvremenim saznanjima o projektiranju brane u seizmičkim područjima.

SEIZMIČKO OPTEREĆENJE

Seizmičko opterećenje za lokaciju Peruća određeno je studijom Geofizičkog zavoda "Andrija Mohorovičić" Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, 1994. godine.

Maksimalna očekivana ubrzanja osnovne stijene određena su determinističkim postupkom za tri tipa potresa:

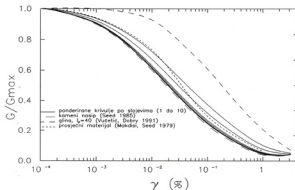
- potres neposredno na lokaciji brane, magnituda $M=5,7$, maksimalno ubrzanje $a_{\max}=0,160$ g, maks. intenzitet $I_{\max}=8,0^{\circ}$ MCS
- bliski potres, epicentralna udaljenost - 7 km, magnituda $M=6,50$, maksimalno ubrzanje $a_{\max}=0,286$ g, maks.intenzitet $I_{\max}=8,6^{\circ}$ MCS
- udaljeni potres, epicentralna udaljenost - 21 km, magnituda, $M=6,6$, maksimalno ubrzanje $a_{\max}=0,197$ g, maks. intenzitet $I_{\max}=7,80^{\circ}$ MCS.

Probabilističkim postupkom određena je najveća vrijednost seizmičkog ubrzanja $a_{\max}=0,22$ g za povratni period $T=1000$ god. Navedene vrijednosti odnose se na potres S2 dok za tzv. projektni potres S1 maksimalno ubrzanje iznosi $a_{\max}=0,17$ g.

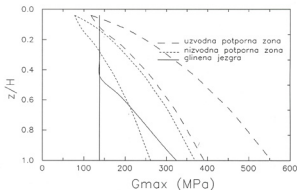
Prema mnogim propisima uobičajeno je provjeriti seizmičku stabilnost građevina i pri slabijem, tzv. projektom potresu. Za nasutu branu koja ima zadovoljavajući stupanj stabilnosti obzirom na maksimalni mogući potres, nije jasno koje bi granične kriterije trebalo zadovoljiti za projektni potres. Iz tog razloga nije uobičajeno za tijelo nasute brane provoditi posebne proračune za projektni potres. Stoga je za daljnje proračune odabrana najveća vrijednost $a_{\max}=0,29$ g.

Budući da osim maksimalnog ubrzanja, na seizmički odgovor brane značajan utjecaj ima i frekventni sastav potresa za analize je izabrano više akceleroograma. Prvu grupu akceleroograma čine umjetni, sintetski, akceleroogram kompatibilan s projektnim spektrom RG 1.60 za nuklearne elektrane (NEPH4), te zapisi dogodenih crnogorskih potresa iz 1979. godine (IZIIS, 1984):

- ULCINJ, 15. ili 16.4.1979, komponenta W-E, izvorni $a_{\max}=136,9$ cm/s² Ovaj zapis reprezentira potres neposredno na lokaciji.



Slika 3. Raspon maksimalnih posmičnih modula po pojedinim zonama brane; visina brane $H = 60$ m



Slika 4. Redukcija posmičnog modula s amplitudom posmične deformacije za glinu i kameni nasip u usporedbi s ponderiranim krivuljama za horizontalne slojeve u brani

- BAR, 24.5.1979., komponenta N-S, izvorni $a_{\max}=198,5 \text{ cm/s}^2$. Zapis predstavlja potrese na srednjoj udaljenosti od lokacije.
- VELIKI STON, 15.4.1979., komponenta N-S, izvorni $a_{\max}=264,1 \text{ cm/s}^2$. Zapis predstavlja potrese s epicentralnom udaljenošću većom od 100 km.

Druhu grupu akcelorograma čine zapisi potresa iz bliže okoline lokacije brane Peruća, zabilježeni tijekom 1990 godine na brani Ričice. Za analize su odabrane longitudinalne komponente slijedećih potresa (iz arhive Geofizičkog zavoda):

- potres Imotski-Grude, 3.4.1990., $M=5,0$, izvorno $a_{\max}=0,113 \text{ g}$
- potres Imotski-Grude, 27.8.1990., $M=4,6$, izvorno $a_{\max}=0,074 \text{ g}$
- potres u planini Dinari, 27.11.1990., 4,37 sati, $M=5,6$, $a_{\max}=0,120 \text{ g}$
- potres u planini Dinari, 27.11.1990., 5,51 sati, $M=5,5$, $a_{\max}=0,069 \text{ g}$

Ovi zapisi reprezentiraju srednje do udaljene potrese. Za potrebe analize svi potresi su podešeni na maksimalno ubrzanje od $a_{\max} = 0,29 \text{ g}$.

Na slici 1 prikazan je vremenski zapis jednog od dinarskih potresa, a na slici 2 njihovi spektri odziva, također podešeni na $a_{\max}=1,0 \text{ g}$.

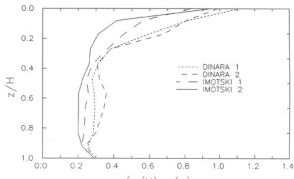
Spektri odziva svih korištenih akcelorograma odražavaju različitost frekventnog sastava dogđenih potresa, dok umjetni akcelorogram NEPH4 konzervativno pokriva cijeli raspon relevantnih perioda.

PARAMETRI UGRADENIH MATERIJALA

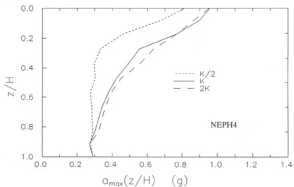
Projektni parametri materijala brane određeni su na osnovu istražnih radova za izvorni projekt i procjena iz literature. Obzirom na moguće varijacije analizirana je osjetljivost rezultata za širi raspon mogućih parametara. Za karakteristične dijelove brane izabrane su slijedeće veličine:

Glinena jezgra:

- gustoća: 2 t/m^3
- čvrstoća (nedrenirana): $s_v=40-60 \text{ kPa}$ ili $s_v=60 \text{ kPa}$ od krune do dubine od 24 m, a ispod te dubine raste linearno do $s_v=130 \text{ kPa}$ na dubini od 60 m (temelj brane).
- maksimalni posmični modul:
 $G_0=2300 \cdot s_v$



Slika 5. Maksimalno ubrzanje po normaliziranoj visini brane za krutost K



Slika 6. Utjecaj krutosti brane na maksimalna ubrzanja - potres NEPH4

Kameni nasip

- gustoća: 2,1 t/m³
- čvrstoća: a) $\Phi=45^\circ$ za dubinu do 20 m na potopljenoj uzvodnoj potpornoj zoni, odnosno za dubinu do 10 m na suhoj nizvodnoj potpornoj zoni;
b) $\Phi=41^\circ$ za dubine veće od gore navedenih
- maksimalni posmični modul:

$$G_0 = 220 K_{200} p^{0.5} \text{ [kPa]}$$

gdje je p - srednji efektivni napon, a $K_{200}=100-150$

Na slici 3 prikazani su rasponi proračunskih maksimalnih posmičnih modula izdvojeno za potopljenu, uzvodnu i nepotopljenu, nizvodnu potpornu zonu brane, te glinenu jezgru. Za analize su korišteni prosječni ponderirani moduli.

Za promjene posmičnog modula i prigušenja s amplitudom deformacije odabrane su krivulje Vučetića i Dobry-a (1991) za glinenu jezgru, uz indeks plastičnosti $I_p=40$ i preporučene krivulje za kameni nasip (Seed i dr.,1985).

Navedene krivulje, modul-deformacija, prikazane su na slici 4, zajedno s krivuljom "prosječnog materijala" koju preporučuju Makdisi i Seed(1979). Na slici su pokazane i prosječne krivulje za deset horizontalnih slojeva ponderirane prema učešću kamenog nasipa ili gline u horizontalnom sloju. Pokazuje se da krivulja "prosječnog materijala" dobro aproksimira krivulje pojedinih slojeva, pa je ona i korištena u daljnjim analizama.

Ostali materijali: Zbog malog utjecaja u presjeku brane filteri su uključeni u zonu kamenog nasipa. Isto se odnosi na dijafragmu koja nije posebno modelirana. Za osnovnu stijenu na kojoj leži brana pretpostavljena je brzina posmičnih valova od $v_s=1000$ m/s i gustoća od 2,4 t/m³.

ANALIZA SEIZMIČKOG ODZIVA BRANE

Postupak programom SHAKE. Program SHAKE (Schnabel, Lysmer, Seed 1972) omogućuje proračun odziva "posmične grede" na seizmičku pobudu zadanu bilo u njenoj osnovi, osnovnoj stijeni ili na izdanku osnovne stijene. "Posmična greda" može biti proizvoljno uslojena. Seizmička se pobuda zadaje kao akcelerogram zadan u vremenskom području. Proračun se provodi u frekventnoj domeni u kompleksnom području, što omogućuje zadržavanje frekventno neovisnog prigušenja. Nelinearnost ponašanja materijala, prikazana kao ovisnost posmičnog modula i prigušenja o prosječnoj amplitudi posmične deformacije, uzima se u obzir pogodnim iterativnim postupkom.

U proračunima je seizmička pobuda zadana na izdanku osnovne stijene. Osim što je to realnije nego je zadati u temelju brane, time se ujedno izbjegavaju u literaturi spominjani dubiozni rezonantni efekti (Gazetas, Dakoulas 1992).

U svim analiziranim slučajevima pretpostavljeno je puno akumulacijsko jezero.

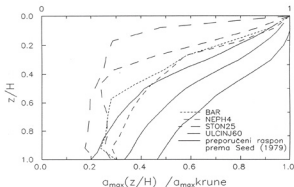
Analiza osjetljivosti modela na promjenu krutosti provedena je za prosječnu krutost K , te dva puta veće, $2K$, i dva puta manje, $K/2$, vrijednosti. Prosječna krutost K definirana je kao srednja vrijednost maksimalnog posmičnog modula G procijenjenog raspona parametara, sl. 3. Vrijednostima $2K$ i $K/2$ obuhvaćen je širi raspon krutosti od prikazanog.

Analize programom SHAKE provedene su za svih 8 nevedenih akceleroograma i navedene modelske krutosti brane.

Prosječna akceleracija na kruni brane iznosi:

- a) za krutost $K/2$ $a_{max}=0,7834$ g
- b) za krutost K $a_{max}=1,0238$ g
- c) za krutost $2K$ $a_{max}=1,1687$ g

Omjer prosječnog maksimalnog ubrzanja krune brane i osnovne stijene kreće se u rasponu od 2,70 do 4,03. Izračunate krivulje su kvantitativno i kvalitativno u skladu s očekivanim ponašanjem za takvu vrstu brane (Gazetas i Dakoulas, 1992).



Slika 7. Normalizirano maksimalno ubrzanje po visini brane za krutost K

Na slici 5. prikazana je raspodjela maksimalnih ubrzanja po normaliziranoj visini, dubini brane za krutost K i drugu grupu potresa, a na slici 6. utjecaj proračunskog raspona krutosti za akcelrogram NEPH4. Normalizirana, relativna, dubina predstavlja omjer dubine brane z , mjereno od krune, i maksimalne visine brane H .

Na slici 7. prikazana je raspodjela ubrzanja po visini brane normaliziranih s maksimalnim ubrzanjem krune za prosječnu krutost K . Za usporedbu je nacrtan i preporučeni projektni raspon (Seed, 1979). Pokazuje se da rezultati ovog proračuna daju nešto povoljniju raspodjelu normaliziranih akceleracija za gornji dio brane. Stoga je ocijenjeno da je za analize trajnih pomaka dovoljno konzervativna prosječna krivulja preporučenog raspona.

Uz detaljne proračune provedene za najviši presjek brane, obavljena je i provjera seizmičkog odziva za presjke različitih visina uzduž brane. Pokazuje se da najviši presjek daje u većini slučajeva i najveću akceleraciju na kruni. Izuzeci na presjecima između 30-40 m visine daju oko 5% veća ubrzanja krune nego najviši presjek, no to je u granicama sveukupnih prosječnih rezultata.

Postupak Ambraseysa i Sarme. Dijagrami Ambraseysa i Sarme (1967) često se koriste za analize seizmičkog odziva brane kad se ne provode složeniji proračuni numeričkim metodama. Ovdje se postupak koristi samo za usporedbu sa rezultatima programa SHAKE.

Osnovni period brane T_0 modelirane kao homogena trokutasta posmična greda iznosi

$$T_0 = 2.61 H/v_s \quad \text{gdje je } H \text{ visina brane, a } v_s \text{ prosječna brzina širenja posmičnih valova.}$$

Ekvivalentna brzina v_s za nehomogeni presjek uzet će se na 1/3 visine brane. Raspon ekvivalentnih maksimalnih posmičnih modula za tu dubinu iznosi 270-370 MPa. Uz prosječnu redukciju modula na 40-50% početne vrijednosti dobija se vrijednosti u rasponu $v_s = 235-304$ m/s što daje osnovne periode brane za visinu $H=60$ m u rasponu od $T_0 = 0.51-0.67$ sekundi.

Korekcija za treću dimenziju ocijenjena je prema Gazetas i Dakoulas (1992). Za trapezoidni kanjon i omjer dužine krune i visine brane 5-6 odnos ekvivalentnog trodimenzionalnog i ravninskog perioda je 0,82, pa korigirani periodi iznose $T_{0,cor} = 0.42-0.55$.

Prema rezultatima prijašnje analize može se procijeniti da prosječno prigušenje u brani iznosi između 10 i 15%, pa se uz korekciju za prigušenje dobije konačna vrijednost amplifikacije u kruni brane od $k(y) = 2.55$.

Ova vrijednost se približno može usporediti s prosječnim amplifikacijskim faktorom dobijenim programom SHAKE koji se kreće u rasponu od 2,68-4,03. Postupkom Ambraseyssa i Sarne na taj bi se način dobile nešto manje konzervativne akceleracije na krani brane od rezultata programom SHAKE.

KRITIČNA UBRZANJA

U skladu s Newmarkovom metodom "klizućeg" bloka (Newmark, 1965) kritično ubrzanje kliznih masa predstavlja ono seizmičko ubrzanje osnovice, odnosno odgovarajuću inercijalnu silu, koja ukupnu masu kliznog tijela dovodi u stanje granične ravnoteže, tj. reducira statički faktor sigurnosti na jedinicu. Za seizmičke analize brane potrebno je odrediti ubrzanje kliznih masa na različitim visinama u presjeku brane budući da se seizmička ubrzanja podloge brane amplificiraju po visini presjeka.

Kritična ubrzanja za analizu brane Peruća određena su pomoću kompjuterskog programa SSTAB1 (Wright, 1974), a odgovarajuća horizontalna sila unesena je rotacijom koordinatnog sustava. Izračunati su faktori sigurnosti za nekoliko vrijednosti horizontalnih sila, a zatim je, interpolacijom, za svaku kliznu plohu određena ona vrijednost ubrzanja (sile) koja daje faktor sigurnosti jednak jedinici.

Proračunski profil rekonstruirane brane i odabrane kružne klizne plohe na uzvodnoj i nizvodnoj kosini prikazani su na slikama 8. i 9.

Analiziran je slučaj punog jezera budući da je on najkritičniji za seizmičko opterećenje.

Proračuni su provedeni s parametrima čvrstoće za glinu $c_u=40$ kPa i za kameni nasip $\phi=45^\circ$ do napona 200 kPa, odnosno $\phi=41^\circ$ za veće napone. Kut trenja u filtrima odabran je $\phi=40^\circ$.

Rezultati proračuna prikazani su u tablici 1.

Statički faktori sigurnosti su veći od 1,5 osim za plitku kliznu plohu na vrhu brane koja daje faktor sigurnosti 1,47, što odgovara faktoru sigurnosti plohe paralelne s kosinom u nekoherentnom materijalu. Ova klizna ploha dala je i najmanje kritično ubrzanje.

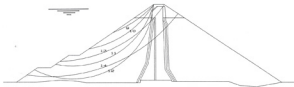
Prema očekivanju kritična ubrzanja su manja na uzvodnoj strani budući da seizmička sila djeluje na ukupnu masu (tlo i voda), a čvrstoća je ovisna o efektivnim naponima koji su manji nego u nepotopljenjnoj nizvodnoj kosini.

U Z V O D N O			N I Z V O D N O		
klizna ploha	faktor sigurnosti	kritično ubrzanje	klizna ploha	faktor sigurnosti	kritično ubrzanje
1.	2.368	0.228	1.	1.794	0.336
2.	1.708	0.172	2.	1.848	0.389
3.	1.783	0.193	3.	1.989	0.498
4.	1.972	0.210	4.	1.767	0.338
5.	2.423	0.280	5.	1.992	0.470
6.	1.697	0.160	6.	2.051	0.639
7.	2.011	0.200	7.	1.551	0.225
8.	2.534	0.250	8.	1.662	0.284
9.	1.474	0.100	9.	1.740	0.327
10.	1.753	0.131	10.	2.019	0.465
11.	2.147	0.197	11.	1.862	0.403
12.	2.321	0.280	12.	1.850	0.414
13.	1.788	0.174			
14.	2.057	0.200			

Tablica 1 Faktori sigurnosti i kritična ubrzanja kliznih ploha

POTENCIJALNI TRAJNI POMACI

Prema Newmarkovcem konceptu, klizanje bloka niz kosinu počinje u trenutku kad ubrzanje baze premaši kritično ubrzanje bloka, a završava kad brzina promjeni predznak. Klizanje bloka natrag uz kosinu ne uzima se u obzir, pa je tako ostvareni pomak bloka ujedno i njegov trajni pomak. Naredno premašenje kritičnog ubrzanja izazvat će novi pomak bloka prema dolje, a konačni trajni pomak bloka niz kosinu nakon djelovanja potresa je zbroj svih pojedinačnih pomaka.



Slika 8. Klizne ploe na uzvodnoj strani - proračunski profil rekonstruirane brane



Slika 9. Klizne ploe na nizvodnoj strani - proračunski profil rekonstruirane brane

Pomoću ovog koncepta mogu se nezavisno obrađivati akcelerogrami pojedinih potresa, te izračunati kumulativni trajni pomak u zavisnosti od omjera kritičnog ubrzanja k_c g i maksimalnog ubrzanja potresa a_{max} . Za tu svrhu izrađen je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu odgovarajući kompjutorski program ACCE, te su njime obrađeni svi navedeni akcelerogrami. Svi akcelerogrami podijeljeni su na maksimalno ubrzanje $a_{max}=0,29$ g, pa se dobijeni rezultati mogu neposredno primijeniti u ovim analizama.

Rezultati opisane dvostruke integracije ubrzanja u vremenu po pravilima ključnog bloka prikazani su na slici 10. Pokazuje se da akcelerogrami koji su davali ekstremne rezultate u analizi seizmičkog odziva imaju slabiji kumulativni učinak.

Na slici 10 prikazan je i očekivani raspon pomaka za potrese magnitude $M=6,5$ prema Seedu (1979). Umjetni zapis NEPH4 relativno dobro slijedi gornju granicu očekivanog raspona, dok zapisi dogođenih potresa pokazuju veliki rasap.

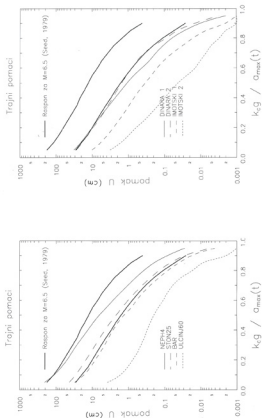
Za daljnje analize treba uzeti u obzir da ovi trajni pomaci predstavljaju ukupni kosi pomak bloka, pa za određivanje npr. trajnog slijezanja treba uzeti samo vertikalnu komponentu pomaka.

Ocjena trajnih pomaka brane. Određivanje trajnih pomaka brane nakon pretpostavljenog potresa obuhvaća rezultate svih prethodnih analiza. Analiza seizmičkog odziva daje vrijednost maksimalnih ubrzanja, analiza graničnih stanja daje kritična ubrzanja klijnih masa, a analiza (integriranje) akcelerograma konačni trajni pomak zavisno o omjeru ubrzanja.

Pomoću ovog postupka analizirana su dva slučaja:

- a) maksimalni dogođeni potres na brani prije oštećenja
 - b) očekivani najveći potres za rekonstruiranu branu
- a) Prema studiji Geofizičkog zavoda najjači potres na lokaciji brane Peruća dogodio se 1990. godine, a procijenjeno maksimalno ubrzanje na osnovnoj stijeni iznosi $a_{max}=0,16$ g. Prema izvješćima voda u jezeru se zamutila, no nije pomato da je brana pretrpjela ikakva oštećenja.

Analiza ponašanja brane pri tom događaju obuhvaća slijedeće: iz analize seizmičkog odziva slijedi da omjer ubrzanja krune i podloge iznosi oko 4,0 za veću ispitivanu krutost. Budući da se pri manjim seizmičkim silama javljaju i manje posmične deformacije, to je i redukcija modula manja, a manje je i prigušenje. Stoga je realno očekivati da je i rezultat za veće ispitivane krutosti mjerodavan za ocjenu. Uz omjer ubrzanja 4, očekivano ubrzanje krune iznosi 0,64 g. Kritična ubrzanja određena su u tablici 1, a raspodjela ubrzanja po visini brane uzeta je za ekstrem navedenog Seedovog projektnog raspona. Za procjenu pomaka izabrani su akcelerogrami Dinara koji daju veće vrijednosti pomaka u navedenoj skupini zapisa bliskih lokaciji brane i podešeni su na maksimalno ubrzanje 0,16 g.

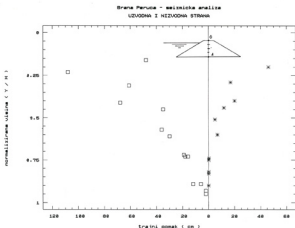


Slika 10. Ovisnost trajanih pomaka o omjeru kritičnog i maksimalnog ubrzanja za obje grupe podresa

Ekstremni kosi pomak klizne plohe na vrhu brane iznosi 6 cm, a odgovarajuće računsko slijezanje krune iznosilo bi 3,5 cm. Ova vrijednost je u granici točnosti cijelog postupka, pa se može ocijeniti da takav pomak nema značajnijih posljedica za tijelo brane, što se u stvarnosti i pokazalo.

Iz ovog se također može ocijeniti da cijeli postupak "ključeg bloka" uz razuman konzervativizam, ne daje pretjerane ili nerealne rezultate.

- b) Ocjena trajnih pomaka za rekonstruiranu branu uključuje slijedeće elemente:
- iz analize seizmičkog odziva preuzeto je maksimalno ubrzanje krune brane od $a_{max}=1,03\text{ g}$ što odgovara rezultatima za prosječnu krutost materijala brane. Za raspodjelu ubrzanja po visini brane konzervativno je odabrana srednja vrijednost preporučenog projektnog raspona Seeda (1979).



Slika 11. Maksimalni seizmički trajni (kosi) pomaci kliznih tijela za rekonstruiranu branu

- kritična ubrzanja pojedinih kliznih ploha preuzeta su iz tablice 1.
 - trajni pomaci očitani su za gornju granicu raspona potresa s magnitudom $M=6,5$
- Tako izračunati konačni trajni pomaci prikazani su u tablici 2 i na slici 11.

U Z V O D N O			N I Z V O D N O		
klizna ploha	relativna dubina	trajni pomak	klizna ploha	relativna dubina	trajni pomak
1.	0.16	48	1	0.29	17.
2.	0.31	61	2	0.51	5.
3.	0.45	35	3	0.83	0.
4.	0.73	16	4	0.44	12.
5.	0.95	2	5	0.75	0.
6.	0.57	36	6	0.90	0.
7.	0.73	18	7	0.20	46.
8.	0.89	6	8	0.40	20.
9.	0.23	108	9	0.60	7.
10.	0.41	68	10	0.82	0.
11.	0.72	19	11	0.74	0.4
12.	0.93	2	12	0.90	0.
13.	0.61	30			
14.	0.89	12			

Tablica 2 Procijenjeni trajni pomaci kliznih masa (cm)

Najveći procijenjeni kosi trajni pomak na kruni brane iznosi 108 cm, a odgovarajuće trajno slijeganje je 59 cm.

Pomaci na uzvodnoj strani su u prosjeku preko 2 puta veći od pomaka na nizvodnoj strani koji u ekstremu iznosi 46 cm.

Iz navedenih rezultata ne očekuju se katastrofalne posljedice po branu, no moguće su lokalne deformacije i pomaci pojedinih kliznih masa koji mogu izazvati pukotine u tijelu brane.

ZAKLJUČAK

Analiza seizmičke stabilnosti rekonstruirane nasute brane Peruća dala je slijedeće rezultate:

- pri djelovanju najvećeg mogućeg potresa na lokaciji, maksimalnog ubrzanja $a_{max}=0,29$ g moguća je pojava oštećenja tijela brane uslijed trajnih pomaka potencijalnih kliznih masa.
- ocjenjuje se da globalna stabilnost brane neće biti narušena uslijed prelijevanja brane, jer maksimalno očekivano trajno slijezanje krune brane iznosi oko 60 cm i postoji dovoljna zaliha slobodne visine između maksimalnog radnog nivoa jezera i krune. Eventualna oštećenja krune brane ne smatraju se značajnijim za globalnu stabilnost.
- potencijalni pomaci kliznih masa u gornjoj polovici brane mogu izazvati lokalna oštećenja pokosa i pukotine u tijelu brane, no ocjenjuje se da planirana izvedba filtera s obje strane jezgre, kao i nepropusna dijafragma u središnjem dijelu, u dovoljnoj mjeri sprečavaju eventualne preboje i procjeđivanje vode kroz jezgru.

LITERATURA

- [1] Ambraseys, N.N. and Sarma, S.K. (1967), The response of Earth Dams to strong Earthquakes, *Geotechnique* 17, No. 3, pp 181-213.
- [2] ICOLD (1986), Earthquake analysis procedures for dams, ICOLD Bulletin 52, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 148 p.
- [3] Gazetas, G., Dakoulas, P. (1992), Seismic analysis and design of rockfill dams: state of the art; *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 11, 27-61.
- [4] Geofizički zavod (1994), Brana Peruća-studija seizmičkih parametara, Geofiz. zavod "Andrija Mohorovičić", PMF, Sveučilišta u Zagrebu.
- [5] IZIIS (1984), Corrected accelerograms and integrated ground velocity and displacement curves, IZIIS Bull. No1, Skopje.
- [6] Makdisi, F.I., Seed, H.B. (1979), Simplified procedure for evaluation embankment response, *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE*, 105, GT12, 1427-1434.

- [7] Marcuson,W.F. III, Hadala,P.F., Franklin,A.G. (1980), Current methods of dynamic analysis for seismic stability of earth dams, *Engineering Geology*, 16 19-28.
- [8] Newmark,N.M. (1965), Effects of Earthquakes on Dams and Embankments. *Geotechnique* 15, No. 2, pp 139-160.
- [9] Seed, H.B. (1979), Considerations in the earthquake-resistant design of earth and rockfill dams, 19th Rankine Lecture, *Geotechnique* 29, No. 3, pp 215-263.
- [10] Seed,H.B., Seed,R.B., Lai,S.S., Khamenlipour,B. (1985), Seismic design of concrete faced rockfill dams, *Concrete Face Rockfill Dams-Design, Construction and Performance*, ASCE 1985, 459-478.
- [11] Schnabel,P.B. Lysmer,J., Seed,H.B. (1972), SHAKE: A Computer program foreartquake response analysis of horizontally layered Sites, ReportNo. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University ofCalifornia, Berkeley, California.
- [12] Vučetić,M., Dobry,R. (1991), Effect of soil plasticity on cyclic response, *Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 117,No.1, 89-107.
- [13] Wright, S.G. (1974), SSTAB1- A General Computer Program for Slope Stability Analyses, Dep. of Civil Eng., University of Texas at Austin

ANALIZA STANJA NAPREZANJA I DEFORMACIJA BRANE PERUĆA

Prof.dr.sc. ANTUN SZAVITS-NOSSAN, dipl.ing.-građ.

Mr.sc. TOMISLAV IVŠIĆ, dipl.ing.-građ.

Mr.sc. MEHO SAŠA KOVAČEVIĆ, dipl.ing.-građ.

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU

SAŽETAK

Izgradnja vododržive dijafragme u jezgri oštećene brane Peruća predviđena je kao jedna od sanacijskih mjera. Predviđeno je da se dijafragma ureže u temelj brane. Kako će brana tokom svoje buduće eksploatacije doživljavati deformacije doći će do međusobnog djelovanja tijela brane i same dijafragme.

Za potrebe analize mehaničke interakcije u dnu upete dijafragme i tijela brane proveden je opsežan program proračuna, koji je obuhvatio proračun početnog stanja naprezanja u brani, skidanje gornjih deset metara brane, ugradnju dijafragme, naknadnu izgradnju gornje dijela brane te punjenje akumulacijskog jezera nakon rekonstrukcije brane.

Proračuni su provedeni metodom konačnih elemenata uvažavajući elastoplastično ponašanje materijala te nelinearne veze naprezanja i krutosti odnosno čvrstoće i efektivnih naprezanja zemljanih materijala u brani.

UVOD

Izgradnja vododržive dijafragme u jezgri oštećene brane Peruća predviđena je kao jedna od sanacijskih mjera. Predviđeno je da se dijafragma ureže u temelj brane. Kako će brana tokom svoje buduće eksploatacije doživljavati deformacije doći će do međusobnog djelovanja tijela brane i same dijafragme. Radi temeljitije analize tog međusobnog djelovanja provedena je opširna studija čiji se osnovni rezultati ovdje ukratko navode.

Dijafragma je kruta konstrukcija u tijelu brane, upeta u svom dnu, na mjestu ulaza u betonski temelj brane ili krutu osnovna stijenu. Materijal dijafragme, plastičnog, treba projektirati tako da osigura vododrživost pri svim projektnim uvjetima u kojima se brana

može naći u toku buduće eksploatacije. Osim tehnoloških uvjeta kvalitete, dijafragma mora zadržati svoju funkciju pri svim mogućim deformacijama brane.

Za potrebe analize mehaničke interakcije u dnu upete dijafragme i tijela brane proveden je opsežan program proračuna koji je obuhvatio proračun početnog stanja naprezanja u brani, skidanje gornjih deset metara brane, ugradnju dijafragme, naknadnu izgradnju gornjeg dijela brane te punjenje akumulacijskog jezera nakon rekonstrukcije brane. Ovi su proračuni provedeni u skladu s predloženim projektnim rješenjem rekonstrukcije brane, a uvažili su moguće varijacije krutosti i čvrstoće materijala tijela brane kao određen raspon krutosti i čvrstoće materijala dijafragme. Proračuni su provedeni metodom konačnih elemenata uvažavajući elastoplastično ponašanje materijala te nelinearne veze naprezanja i krutosti odnosno čvrstoće i efektivnih naprezanja zemljanih materijala u brani. Pri tome je korišten program FLAC 5IC za elektroničko računanje koji omogućuje rješenje takovih složenih deformacijskih problema u geotehnici.

DISKRETIZACIJA METODOM KONAČNIH ELEMENATA

Diskretizacija metodom konačnih elemenata provedena je na srednjem, najvišem, poprečnom presjeku brane visine 60 m. Korištena je relativno gusta mreža konačnih elemenata čiji broj za čitav profil brane iznosi oko 2000.

Za utvrđivanje početnih naprezanja u brani, simulirana je njena izgradnja u šest slojeva od po 10 m visine. Zatim je simulirano skidanje najvišeg sloja kao dio zahvata rekonstrukcije. Konačna simulacija obuhvatila je ponovnu izgradnju najvišeg sloja, dodatno povišenje originalne brane s dosipavanjem nizvodnog pokosa te dizanje vode u jezeru do najviše kote, sve uz aktivirano djelovanje dijafragme.

Sve su analize provedene u efektivnim naprezanjima što je uključilo djelovanje hidrostatskih pritisaka u uzvodnoj potpornoj zoni brane te strujanje vode kroz jezgru brane, osim na mjestu dijafragme koja je predstavljala nepropusnu granicu.

MEHANIČKI PARAMETRI MATERIJALA

Vrijednosti mehaničkih parametara materijala tijela brane preuzeti su iz odgovarajućih poglavlja za statičke i seizmičke analize sanacije brane Peruća, te iz izvještaja Duncan i dr. (1980) [2]. Posljednji izvještaj je korišten za procjenu parametara krutosti za nelinearni odnos potperne zone (kamen i nabačij) i jezgru (glina) za koje nema podataka u istražnim radovima.

Kut trenja za zemljane materijale računan je po izrazu

$$\varphi' = \varphi'_b + R \log \frac{S}{p'} \quad (1)$$

gdje je p' srednje efektivno naprezanje u tijelu brane prije unošenja novog inkrementa opterećenja.

Isto tako je Youngov modul elasto-plastičnog modela dan izrazom

$$E = K p_a \left(\frac{p'}{p_a} \right) \quad (2)$$

gdje je p_a veličina atmosferskog tlaka.

Procjene veličina pojedinih parametara dane su u tablici 1.

	Potporne zone	Jezgra
φ'_b (°)	30	20
c' (MN/m ²)	0	0,005
R (°)	6	0
S (MN/m ²)	100	-
K (-)	200	50
n (-)	0,5	0,7
ν (-)	0,30	0,45
ρ (t/m ³)	2,07	1,97

Tablica 1 Parametri tla

φ'_b, R, S	-	parametri nelinearnog zakona čvrstoće
c'	-	kohhezija
K, n	-	parametri Youngovog modula ovisno o srednjem efektivnom naprezanju p'
ν	-	Poissonov koeficijent
ρ	-	gustoća saturiranog materijala

Osnovni parametri dijafragme, Youngov modul, tlačna čvrstoća nakon 28 dana te nosivost presjeka dijafragme na savijanje uz isključanje vlačne zone dani su u tablici 2. Posljednja veličina je izračunata uz pretpostavku, da se u presjeku dijafragme aktivira puna tlačna

čvrstoća betona, a da presjek ne može preuzeti vlačna naprezanja (beton nema vlačne čvrstoće). Pri proračunu nosivosti presjeka uzeto je u obzir i djelovanje tlačne sile u dijafragmi. Ono se sastoji od doprinosa vlastite težine dijafragme umanjene za uzgon od procjedne vode kroz brana, te doprinosa deformacije brane od opterećenja gornjim rekonstruiranim slojem i rasterećenjem od potapanja uzvodne potporne zone u brani.

Youngov modul (MN/m^2)	300
Tlačna čvrstoća (MN/m^2)	1.0
Nosivost presjeka dijafragma na savijanje (MNm/m^3)	0.08

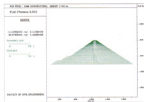
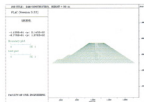
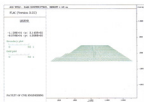
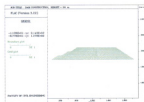
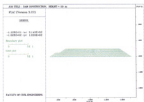
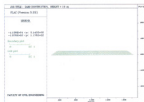
Tablica 2 Parametri dijafragme

S gore pretpostavljenim parametrima materijala brane proračunati su horizontalni pomaci krune originalne, nerekonstruirane brane uslijed punjenja akumulacijskog jezera od dna do maksimalne razine. Dobiiveni horizontalni pomak krune iznosio je oko 6 cm. Mjereni pomaci krune od naglog punjenja jezera iznosili su od 1 do 4 cm, a horizontalni pomaci tokom 20-tak godina rada brane iznosili su oko 20 cm. U sklopu parametarskih numeričkih analiza varirani su parametri krutosti materijala brane. Varijacijom parametra K na polovicu i dvostruku vrijednost veličine iz tablice 1 dobijen je horizontalni pomak krune originalne nerekonstruirane brane od 14,5 i 0,6 cm. Ovim je proračunima omogućena analiza utjecaja procijenjenih parametara tla na deformacije brane.

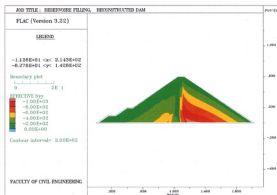
Isto su tako parametarskim analizama obuhvaćeni rasponi mogućih parametara dijafragme (bitno kruća i bitno mekša dijafragma od one iz tablice 2).

Za proračun unutarnjih sila u dijafragmi simulirane su sljedeće faze u života tijela brane:

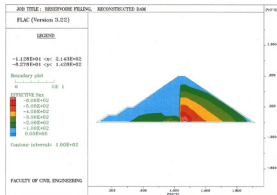
- 6 faza nasipavanja pri izgradnji brane u slojevima od po 10 m visine; skidanje najvišeg sloja (rekonstrukcija brane);
- ugradnja dijafragme, nasipavanje zadnjeg sloja te povišenje krune brane s dosipavanjem nivoznog pokosa, te hidrostatsko opterećenje vode iz akumulacije;
- seizmičko opterećenje, zadano kao ekvivalentna statička sila od 15% totalne težine.



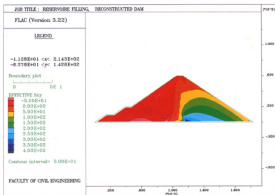
Slika 1. Mreže konačnih elemenata za razne faza gradnje



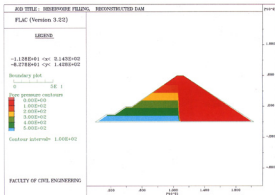
Slika 2. Završna faza - efektivna, Syy, vertikalna naprezanja, [kN/m²]



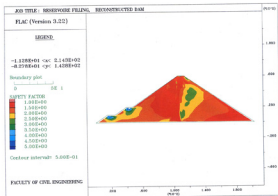
Slika 3. Završna faza - efektivna, Sxx, horizontalna naprezanja, [kN/m²]



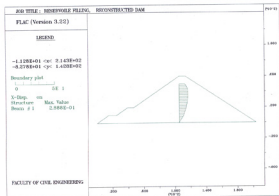
Slika 4. Završna faza - efektivna, S_{xy} , posmična naprezanja, [kN/m^2]



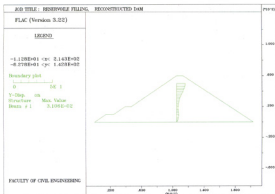
Slika 5. Završna faza - porni pritisci, [kN/m^2]



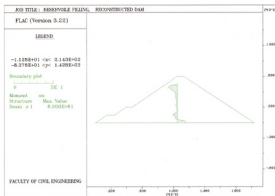
Slika 6. Završna faza - faktori sigurnosti



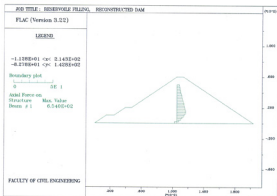
Slika 7. Završna faza - horizontalni, x, pomaci dijafragme, [m]



Slika 8. Završna faza - vertikalni, y, pomaci dijafragme, [m]



Slika 9. Završna faza - Momenti savijanja u dijafragmi, [kNm/m¹]



Slika 10. Završna faza - dodatne uzdužne sile u dijafragmi, [kN/m^3]

PRIKAZ REZULTATA NUMERIČKIH ANALIZA

Karakteristični rezultati analiza prikazani su grafički samo za parametre materijala iz tablica 1 i 2.

Na slici 1 prikazane su mreže konačnih elemenata za razne faze izgradnje.

Na slikama 2-10 prikazani su rezultati završne faze - punjenje jezera, za projektom predviđenu rekonstruiranu branu, s dijafragmom i novom krunom s nadvišenjem.

Slike 2-6 prikazuju dijagrame - intervale vertikalnih, S_{yy} , horizontalnih S_{xx} i posmičnih S_{xy} efektivnih naprezanja, pomih pritiska u (kN/m^2), te faktora sigurnosti.

Faktori sigurnosti određeni su kao omjer prosječne čvrstoće i prosječnog mobiliziranog posmičnog napona za svaki element mreže, pa nisu direktno usporedljivi s faktorima sigurnosti iz metoda granične ravnoteže, koji se odnose na cijelo klizno tijelo.

Slike 7-10 prikazuju horizontalne x i vertikalne y pomake dijafragme u (m), te dijagrame momenata savijanja u (kNm/m^3) i dodatne uzdužne, aksijalne sile u (kN/m^3).

REZULTATI PARAMETARSKIH ANALIZA I ZAKLJUČCI

Osnovni zaključci parametarskih analiza kojih je ukupno bilo 21, mogu se svrstati u slijedeće:

- Bez obzira na moguće krutosti materijala brane i dijafragme faktori sigurnosti u tijelu brane su zadovoljavajući, pa njena globalna stabilnost nije ugrožena ni u jednom trenutku tokom njene eksploatacije,
- Za sve varijante krutosti materijala brane te krutosti i čvrstoće materijala dijafragme, u dnu dijafragme se pojavljuje plastični zglob, tj. doseže se veličina njene nosivosti na savijanje. Naime deformacije brane nameću prisilne pomake dijafragmi, koji izazivaju pojavu plastičnog zgloba na mjestu njene upetosti na razini temelja brane. Na svim ostalim mjestima momenti savijanja u dijafragmi manji su od nosivosti presjeka bez obzira na pretpostavke o parametrima krutosti i čvrstoće,
- Poprečna pukotina u plastičnom zglobu dijafragme, nastala nedostatkom vlačne čvrstoće materijala dijafragme, doseže do 80 cm od uzvodnog prema nizvodnom rubu dijafragme. U najekstremnijem slučaju zliv pukotine je manji od 5 mm,
- Parametarske analize pokazuju da eventualno omekšavanje materijala dijafragme, a time i smanjenje njene čvrstoće, pri čemu su analizirani odnosi Youngovog modula i čvrstoću od 1000:1 do 200:1 ne eliminira pojavu plastičnog zgloba u njenom dnu. Kako je zbog sigurnosti od moguće progresivne erodibilnosti materijala dijafragme na mjestu pukotine potrebno, da materijal dijafragme ima zadovoljavajuću čvrstoću, preporuča se da se materijal dijafragme projektira tako da mu Youngov modul iznosi ne više od 400 MN/m², a tlačna čvrstoća nakon 28 dana ne manje od 1 MN/m².

LITERATURA

- [1] - (1993), *FLAC, User's Manual*, Itasca Consulting Group, Inc., Minneapolis, Minnesota.
- [2] Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S., Mabey, P. (1980), *Strength, Stress-Strain And Bulk Modulus Parameters For Finite Element Analyses Of Stresses And Movements In Soil Masses*, Report No. UCB/GT/80-01, College of Engineering, University of California, Berkeley, California, 70. str.

ISTRAŽNI RADOVI NA NALAZIŠTIMA MATERIJALA I KONTROLA UGRADNJE U NASUTI DIO BRANE

KREŠIMIR SEVER, ing.geoteh.

Nadzorni inženjer

MIROSLAV IVOŠ, ing.geoteh.

Nadzorni inženjer

"GEOKON" ZAGREB

IVO BARBALIĆ, dipl.ing.građ.

INSTITUT GRADEVINARSTVA HRVATSKE, Poslovni centar SPLIT

SAŽETAK

U prvom (A) dijelu ovog članka dat je prikaz problema vezanih uz istraživanja, odnosno pronalaženja materijala potrebnog za sanaciju brane Peruća. Akcent istraživanja je na problemima vezanim uz pronalaženje potrebnih količina, a posebice glinenog materijala kojega, obzirom na stroge projektne zahtjeve, u neposrednoj okolini brane nema, te na pronađene količine materijala i usporedbu njihovih fizičko-mehaničkih svojstava s projektiranim zahtjevima.

U drugom (B) dijelu članka ilustriran je primjer statističke obrade postignutih rezultata dobivenih tekućim i kontrolnim ispitivanjima glinenih materijala, te numerički prikaz rezultata postignutih ugradnjom kamenih materijala i njihovom usporedbom s projektiranim zahtjevima.

(A) ISTRAŽNI RADOVI NA NALAZIŠTIMA MATERIJALA

UVOD

Promatrajući karakterističan poprečni presjek brane Peruća nameće se pitanje radi čega je odabran upravo takav sa tako tankom glinenom jezgrom. No, upravo tanka jezgra daje nam i odgovor. Naime, još prilikom prvih istraživanja, odnosno određivanja pregradnog mjesta spoznalo se da kvalitetnog glinovitog materijala za izgradnju vodonepropusne glinene jezgre nema u dovoljnim količinama.

Tom činjenicom suočilo se i prilikom sanacije brane. Glavnim je projektom sanacije brane bilo predviđeno, da se pri iskopsu gornjeg dijela brane, te lijevog i desnog kraja, materijali selektiraju i odlože na za to odgovarajuća mjesta u neposrednoj blizini brane uz uvjet da se što je više moguće sačuvaju njihova fizičko-mehanička svojstva. Na taj su način sačuvani svi kvalitetni i upotrebljivi materijali za ponovnu ugradnju pri rekonstrukciji brane.

Takvo razmišljanje pokazalo se ispravnim, jer se na taj način sačuvalo oko 23000 m³ uzvodne kamene zaštitne obloge, rip-rap-a, materijala upotrebljivog za potporne zone, a što je najvažnije i najvrednije sačuvano je oko 10.000 m³ glinenog materijala. Filtarski materijal nije sačuvan, jer je bio degradiran odnosno dobrim dijelom pomiješan materijalom iz potpornih zona i glinom iz jezgre.

Iskopani materijal bio je uglavnom poznatih fizičko-mehaničkih svojstava, ali uprkos tomu provedena su dodatna laboratorijska ispitivanja na temelju kojih su određena svojstva pojedinih vrsta materijala, te određeni kriteriji ugradnje.

Iskopanim materijalom iz postojećeg tijela brane i deponiranim u njezinoj neposrednoj blizini započeta je sanacija, te se tako dobilo na vremenu potrebaom za promatranje nedostatka materijala, a posebice glinovitog.

PROJEKTIRANA SVOJSTVA MATERIJALA I UVJETI ZA UGRADNJU U TIJELO BRANE

Materijali koji su ugrađivani u tijelo brane bili su sljedeći:

- **Glina** - prirodni koherentni nedisperzivni materijal, odgovarajuće plastičnosti, stišljivosti i vrlo male vodopropusnosti u zbijenom stanju,
- **Filtarski materijal** - nekoherentni kameni materijal odgovarajućeg granulometrijskog sastava prirodnog porijekla, pijesak i šljunak ili proizveden drobljenjem minirane stijene,
- **Krupnozrnatni kameni materijal** - materijal za potporne zone odgovarajućeg granulometrijskog sastava, dobiven miniranjem i selektiranjem
- **Kameni blokovi** - krupni kameni blokovi za oblaganje uzvodnog pokosa, dobiveni miniranjem,
- **Zaglinjeni kameni materijal** - kameni materijal pomiješan glinenim vezivom, prirodnog porijekla ili dobiven miješanjem gline sa drobljencom odgovarajućeg granulometrijskog sastava.

Svi navedeni materijali trebali su zadovoljiti opće zahtjeve, tj. morali su biti bez organskih primjesa i bez soli topivih u vodi, dok su se posebni zahtjevi odnosili na fizička i mehanička svojstva, te na načine odnosno standarde ispitivanja, koja su navedena u nastavku.

Glineni materijal za jezgru

Za izgradnju glinene jezgre trebala se upotrijebiti glina srednje do visoke plastičnosti, CI/CH, sa svojstvima koja su trebala zadovoljiti slijedeće kriterije:

- granulometrijski sastav $35\% < 0,002 \text{ mm}$ $75\% < 0,06 \text{ mm}$
- granica tečenja $43\% < W_L < 60\%$
- indeks plastičnosti $20\% < I_p < 38\%$
- zbijenost po modificiranom Proctor-u $W_{qc}=17,0-24,0 \text{ } (\%)$, $\gamma_d=15,5-17,5 \text{ } (\text{kN/m}^3)$
- zbijenost ugrađene gline $\gamma_{d \text{ max}}=0,95$ po modificiranom Proctora
- nije bilo dozvoljeno ugrađivanje organskih glina i prahova, OL, OH i M, organskih otpadaka, humusa, korijenja i sl., te materijala velike stišljivosti i onih koji bi vremenom promijenili svoja fizičko-mehanička svojstva.

Filtarski materijal za zaštitu glinene jezgre

Filtarski materijal koji služi za zaštitu glinene jezgre trebao je zadovoljiti osim već navedenih općih zahtjeva slijedeći granulometrijski sastav:

PROMJER ZRNA (mm)	%
60	100
20	65-100
6	40-65
2	15-40
0,6	7-25
0,2	0-13
<0,06	0

Materijal je trebao zadovoljiti i zahtjev po Sherardu, da je promjer 15%-tnog zrna $DF_{15}=0,7-1,5 \text{ mm}$, te da zapreminska težina ugrađenog materijala treba iznositi 0,7 maksimalne zapreminske težine postignute u laboratoriju.

Kameni materijal za potporne zone

Za potporne zone mogao se upotrijebiti kameni materijal dobiven miniranjem, sortiranjem i ostaje specifične gustoće od 2500 kg/m^3 , te slijedećeg granulometrijskog sastava:

PROMJER ZRNA (mm)	%
600	95-100
60	55-70
6	20-35
2	10-25
0,06	0-5

Trebalo je također nastojati da najveći promjer odlomka ne bude veći od 500 mm, te da zapreminska težina ugrađenog materijala ne bude manja od 20,0 kN/m³.

Kameni materijal za zaštitu uzvodnog pokosa

Kao zaštita uzvodnog pokosa trebao se upotrijebiti kameni materijal koji je morao biti tvrd, gust, vremenski postojan i mehanički otporan, te minimalne specifične gustoće od 2500 kg/m³. Takav materijal trebao se sastojati od krupnih odlomaka stijene i kamenih blokova najvećeg promjera oko 1,0 m, a granulometrijski sastav trebao je zadovoljiti sljedeći kriterij:

PROMJER BLOKOVA (mm)	%
1000	70-100
600	50-70
200	25-40
60	10-20
20	0-10

Zaglinjeni šljunak za krunu brane

Materijal iz kojega se trebala izvesti kruna brane trebao je, uz već naprijed navedene opće kriterije zadovoljiti sljedeći granulometrijski sastav:

PROMJER ZRNA (mm)	%
60	100
2	60
0,06	25
0,002	10

Zapreminska težina ovog materijala u zbijenom stanju trebala je iznositi 18,0 kN/m³.

Standardi za provođenje ispitivanja

Kako Republika Hrvatska nije donijela odgovarajuće propise i standarde bilo je dozvoljeno korištenje svih međunarodnih standarada kao npr. DIN, BS, ASTM, te JUS standarda i propisa sukladnih Zakonu o preuzimanju zakona o standardizaciji.

ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA

Glina za glinenu jezgru

Sačuvanom količinom glinenog materijala izvađenog uklanjanjem krajeva i gornjeg dijela brane pokrivena je jedva trećina ukupno potrebnog materijala za izgradnju nove jezgre. Prema tome bilo je potrebno nadomjestiti oko 20000 m³ glinenog materijala istih ili sličnih svojstava kao i postojeća jezgra brane.

Pronalaženje potrebnih količina glinenog materijala predstavljalo je veliki problem s obzirom na ograničene količine gline na ovom području. Pri tome je trebalo voditi računa i o udaljenosti od mjesta ugradnje, ekonomičnosti nalazišta obzirom na raspoložive količine, pristupne puteve i prijevoz, a uz to zadovoljiti projektom zahtijevana fizičko-mehanička svojstva.

Iako su se imale u vidu sve gore spomenute komponente postojala je jedna gorka činjenica koja je znatno usporavala istraživanja, a ta je da je uže i šire područje Peruća i Satrića bilo prva bojeva linija, te je stoga postojala velika opasnost od zaostalih ili namjerno postavljenih eksplozivnih sredstava. Osobito opasno bilo je na području Alebića Kule i sela Peruća-Prolići na prilazu brani, gdje su u vrijeme ratnih bojebnih djelovanja bili artiljerijski položaji. Tako je prilikom vizuelnog odabira pojedine lokacije obilazak terena obavljan uz pomoć i dozvolu Hrvatske vojske, a prije pristupa na svaku pojedinu lokaciju morao se zatražiti pregled od strane inženjerijskih jedinica i čišćenje terena, na temelju kojeg se dobivala dozvola za neometani rad. Iako prilikom pregleda terena nisu pronađena eksplozivna sredstva, ili barem za njih ne znamo, te mjere su morale biti poduzete radi sigurnosti istraživačkog osoblja.

Određivanje lokacije nalazišta

Vodeći se spomenutim kriterijima određeno je potencijalno nalazište šireg lokaliteta Satrić udaljenog oko 3,0 km zračne udaljenosti od brane. Vizuelnim pregledom cijelog lokaliteta,

određene su tri lokacije, "Vardića kuće", zaseok "Prolići" i selo "Lijči", na kojima je prema geološkim pokazateljima trebalo biti gline u dovoljnim količinama. Ostali dio terena ocijenjen je nepogodnim iz razloga, što se radilo o obradivim površinama u blizini obiteljskih kuća.

Prema Programu istražnih radova za nalazišta gline, koji je sadržavao terenska i laboratorijska istraživanja pristupilo se istraživanjima na terenu.

Terenski istražni radovi na spomenutim lokacijama započeli su krajem mjeseca travnja 1994. godine, a obuhvaćali su bušenje jedanaest prospektorskih bušotina. Na temelju istraženih bušotina utvrđeno je, da je jedino na lokaciji "Vardića kuće" pronađena glina odgovarajućih svojstava i značajnijih količina, iako je u prošlojima bilo povećanih organskih i prašinastih materijala. Na toj lokaciji utvrđena je količina od oko 8000 m³ glinenog materijala, što je bilo još uvijek nedovoljno za dovršenje jezgre brane.

Kako se pokazalo da na preostale dvije lokacije nema kvalitetne gline, te da su količine vrlo male i neekonomične za eksploataciju, istraživanja su morala biti proširena na zemljišta u blizini kuća, a i izvan područja Satrić. Vizuelno je pregledano cijelo područje Satrić, zaseoci Peruća i Prolići, Hrvaca, pa čak i jedan dio Sinjskog polja. Na temelju vizuelne prospekcije i uz suradnja lokalnog stanovništva određeno je još osam lokacija potencijalnih nalazišta.

Na ovim lokacijama istraživanja nisu obavljena bušenjem već kopanjem istraženih jama strojevima. Tako su pregledana, istražena i klasifikacijski ispitana nalazišta u zaseoku Hrgovići i na prilazu brani ispod zaseoka Peruća i Prolići. Na nalazištu u Hrgovićima pronađene su veoma male količine, oko 800 m³ visokoplastične gline, dok su na lokacijama Peruća i Prolići gline bile uglavnom srednje i visoke plastičnosti, te prašinasti materijali sa dosta organskih primjesa. Gline nisu zadovoljile zahtijevane kriterije.

U međuvremenu dok su obavljana istraživanja na spomenutim lokacijama iskrsnuo je još jedan neočekivani problem, ali sada sa vlasnicima parcela na lokaciji Vardići. Naime, za eksploataciju gline sa njihovih parcela tražili su veoma visoku nadoknadu iako im je bilo obećano da će se nakon eksploatacije parcele vratiti u prvobitno stanje i namjenu. Navedena istraživanja trajala su tri mjeseca, ali bez ikakvih rezultata. Naredna, gotovo četiri mjeseca obavljena su istraživanja ponovno na području Satrića, lokacije Lokve, Naplavi, Majići i Alešića Kule, pregledano je područje akumulacijskog jezera, koje je bilo pod kontrolom Hrvatske vojske, te dio Sinjskog polja uz Cetinu. Niti ova istraživanja nisu dala pozitivne rezultate. Tada se od lokalnog stanovništva doznalo za lokaciju "Zorica" oko 10 km udaljena od brane u pravcu Sinja.



Slika 1. Situacija šireg područja istraživanja s lokacijama na kojima su obavljena istraživanja

Njen uži lokalitet je dio, odnosno padina, brežuljka iznad zaseoka Zorice. Samo nalazište obuhvaćalo je površinu od oko 10 000 m².

Iako u nevjerici krenulo se u istraživanje, prvo vizuelnom prospekcijom, a zatim iskopom istražnih jama.

Terenska istraživanja i laboratorijska ispitivanja vodio je i usmjeravao na osnovi dobivenih predhodnih rezultata geomehanički nadzorni inženjer.

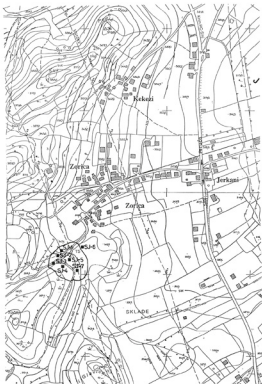
Terenski istražni radovi

Terenski istražni radovi provedeni su koncem mjeseca studenog, a obuhvatili su iskop istražnih jama bagerom do dubine 3,50 m. Izvedeno je ukupno sedam jama s oznakama od SJ-1 do SJ-7, dimenzija oko 2,50x1,20x3,50 m, osim jame SJ-6 koja je iskopana do dubine od 0,60 m. Usporedo sa kopanjem istražnih jama obavljena je terenska AC klasifikacija materijala, skice oblika i dubina jama, kao i promjene uslojenosti materijala. Položaj istražnih jama prikazan je na sl. 2.

Sastav i svojstva tla

Na nalazištu "Zorica", a na temelju rezultata terenske AC klasifikacije i laboratorijskih ispitivanja konstatirano je, da su se na svim istraženim lokacijama ispod humusnog sloja prostirale visokoplastične, CH, gline, osim lokacije jame SJ-6, gdje je konstatirana sedra već nakon 0,50 m dubine. Pronađene gline različitih su boja i to od svijetložute, žutosmeđe, sive pa sve do crne. Klasificiranjem iskopanog materijala konstatirana je gotovo na svim lokacijama protkanost gline tankim proslojcima sivoga praša po čijim se plohamu glina lomila u grumenove. Praš se nalazio u nepravilnim proslojcima debljine 1-2 mm i u ukupnoj masi nije utjecao na svojstva gline.

Poslije laboratorijske potvrde sastava i karakteristika tla na ovom nalazištu utvrđena je količina od nešto više od 20000 m³ glinenog materijala. Pronađene količine morale su se brižljivo eksploatirati kako ne bi došlo do manjka materijala, a što je u jednom trenutku pejičilo iz razloga što se na jednom dijelu nalazišta našlo na zaglinjene šljunke, sitne jednolične prahove, pa čak i ugljen, no taj problem ubrzo je riješen neznatnim proširenjem nalazišta.



Slika 2. Situacija nalazišta Zorica

Laboratorijska ispitivanja

Iz svih istraţnih jama, izuzev SJ-6, uzeti su uzorci materijala u dovoljnim količinama potrebnim za laboratorijska ispitivanja. Za potrebe laboratorijskih ispitivanja uzeti su veliki uzorci poremećenog materijala iz istraţnih jama: SJ-1, SJ-2, SJ-3, SJ-4, SJ-5 (dva uzorka) i SJ-7, te provedena ispitivanja mehaničkih i fizičkih svojstava tla prema vaţećim propisima.

- prirodna vlaţnost	W_o (%)
- Atterbergove granice plastičnosti	W_p, W_L, I_p (%)
- granulometrijski sastav	-----
- specifična gustoća	ρ (g/cm ³)
- relativni porozitet i modul stišljivosti, edometarski	e, M_v (MPa)
- vodopropusnost	k (m/s)
- troosni posmik	c (kPa) i ϕ (°)
- optimalna zbijenost prema standardnom Proctoru	W_{opt} (%) i γ_d (kN/m ³)
- sadrţaj organskih tvari	(%)
- erodibilnost - Pin Hole test prema Journal of Geotechnical Engineering Division	

Prva su provedena laboratorijska ispitivanja fizičkih svojstava pojedinih slojeva tla, prirodna vlaţnost, specifična gustoća, granulometrijski sastav, Atterbergove granice plastičnosti i sadrţaj organskih tvari, a potom mehaničke osobine, standardni i modificirani Proctorovi pokusi.

Za sva ostala ispitivanja materijal je predhodno bio pripreman s optimalnom vlaţnošću određenom modificiranim Proctorovim pokusima.

U istraţnoj jami SJ-4 konstatirana su po dubini, a prema fizičkom izgledu dva različita sloja tako, da su za ispitivanja uzorci bili pripremani miješanjem tih dvaju materijala u pribliţnom omjeru kakva je dubina slojeva u prirodi.

Tijekom provođenja troosnog posmika, edometarskih ispitivanja i erodibiliteta, utvrđena su bubrenja svih ispitanih materijala koja su bila reda veličine od 6 do 16%.

Prilikom ugradnje uzoraka za troosni posmik primijećeno je, da je veza između slojeva relativno slaba. Visina uzoraka bila je 8 cm, a debljina slojeva 3 cm. Navedeno, gotovo je sigurno bila posljedica pripreme uzoraka prema modificiranom Proctorovom pokusu, budući je optimalna vlaţnost relativno mala u odnosu na relativno veliku uložena energija. Ova je konstatacija navedena radi toga, što može imati utjecaja na vrijednosti dobivenih rezultata laboratorijskim putem.

Uzorci ugrađivani u edometarski aparat prvo su bili kompletno saturirani vodom, a ispitivanja su provedena tek nakon završetka procesa bubrenja.

Ispitivanja erodibilnosti, Pie-Hole test, također su provedena na uzorcima pripremljenim po modificiranom Proctorovom pokusu. Tim ispitivanjima nisu dobiveni nikakvi brožani rezultati, budući je u vrlo kratkom vremenskom razdoblju, od početka pokusa, habrenje glinenog materijala zatvorilo probušenu rupicu za protok vode. Radi toga, a sa željom da se dobije bilo kakav rezultat, obavljena su dodatna, doduše izvanstandardna ispitivanja. Po završenom prvom ispitivanju, odnosno potpunoj saturaciji vodom svakog pojedinog uzorka, provedeno je 12 ispitivanja, ponovno je kroz uzorak probušena standardna rupica, a zatim ponovno provedeno ispitivanje, ali sada s najvećim tlakom vodenog stupca.

Takvim pokasima utvrđeno je, da je protok vode kroz uzorke bio nepromjenljiv, da je voda nakon prolaza kroz uzorak bistra i bez imalo zamućenja, odnosno da nije došlo do erozije.

Po završenim ispitivanjima uzorci su bili detaljno pregledani te je utvrđeno, da na njima nije bilo nikakvih oštećenja.

Korištenje nalazišta "Zorica"

Budući je nalazište bilo smješteno na padini malog brdašca jedini mogući način korištenja nalazišta bio je da se iskop obavlja na čeonu način. Glina iz nalazišta kopana je bagerom s čela i tovarena u kamione, te odvažana na mjesto ugradnje ili na za to predviđenu deponiju. Tome i takvoj tehnologiji pogodovalo je i to što je glina u samom nalazištu imala prirodnu vlažnost nešto višu od optimalne koja se prilikom prijevoza smanjila na približno optimalnu tako, da prilikom ugradnje nije bilo većih problema. U slučajevima kada je glina bila suviše vlažna prosušivanje se obavljalo na mjestu ugradnje ili na deponiji. Dinamika korištenja i odvoza gline iz nalazišta ovisila je o vremenskim uvjetima i dinamici izgradnje pojedinih elemenata brame. Na narednoj fotografiji prikazan je način korištenja gline iz nalazišta Zorica, foto 1.

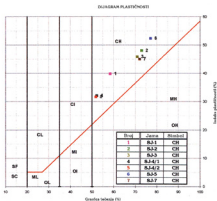
Usporedba projektiranih svojstava s rezultatima laboratorijskih ispitivanja materijala iz nalazišta Zorica

Rezultati laboratorijskih ispitivanja dobiveni ispitivanjima materijala iz nalazišta Zorica, prije same eksploatacije bili su uspoređeni s projektnim zahtjevima. Tom usporedbom vrijednosti dobivene ispitivanjima na uzorcima uzetim iz nalazišta Zorica konstatirano je, da materijal po svim svojim svojstvima u potpunosti zadovoljava projektom zahtjevano kriterije, pa čak i više od toga, obzirom na svoju plastičnost, a što se vidi iz dijagrama plastičnosti i granulometrijskog dijagrama, sl. 3 i 4.

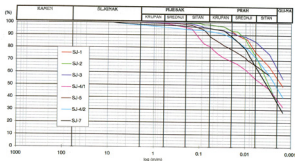
Priloženim dijagramima prikazana su pojedinačno ili zbirno sva laboratorijska ispitivanja provedena na materijalu uzetim iz istraženih jama, koja su obavljena u svrhu odobrenja korištenja nalazišta "Zorica". Ujedno su prikazane laboratorijski dobivene vrijednosti koje je trebalo zadovoljiti prilikom ugradnje glinenog materijala.



Foto 1. Način korištenja nalazišta Zorica



Slika 3. Dijagram plastičnosti glinenog materijala iz nalazišta "Zorica"



Slika 4. Granulometrijski dijagram glinenog materijala iz nalazišta "Zorica"

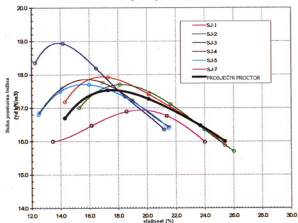
Filtarski materijal za zaštitu glinene jezgre

Kako je već spomenuto filtarski materijal prilikom iskopa postojeće brane nije sačuvan, tako da ga se trebalo nadomjestiti u punoj količini koja je iznosila oko 15.500 m³.

Kako na širem području brane Peruća nema odgovarajućeg kamenog materijala prirodnog porijekla, osim na području pod okupacijom, s kojeg se dovozio prilikom gradnje brane, pristupilo se pronalaženju materijala iz postojećih kamenoloma sa pravca Split - Peruća. U tu svrhu pregledani su svi kamenolomi sa spomenatog područja, jer je filtarski materijal morao zadovoljiti projektom zahtijevana fizičko-mehanička svojstva i granulometrijski sastav, proizvođač je morao garantirati proizvodnju potrebnih količina, a ujedno i osigurati dovoljne količine na gradilištu. Zaključeno je, da sve zahtjevane uvjete zadovoljavaju kamenolomi Srinjine i Dugobabe, koji pripadaju istom vlasniku, što je jamčilo i isporuku.

Prilikom prve isporuke filtarskog materijala, na samom gradilištu, obavljene su kontrolne granulometrijske analize koje su potvrdile proizvođačeve ateste i garancije, a što je vidljivo iz priloženog dijagrama granulometrijskih krivulja, sl. 7.

Zbijenost po Proctor-u

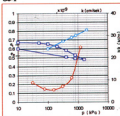


Slika 5. Dijagram zbijenosti prema modificiranom Proctorovom pokusu

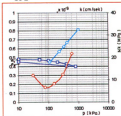
JAMA	SJ-1	SJ-2	SJ-3	SJ-4	SJ-5	SJ-7	PROSJEČNI MODIF. PROCTOR
W _{opt}	17.76	18.97	14.35	15.70	21.40	19.65	17.97
γ _d	17.99	17.81	18.96	18.01	16.67	16.97	17.40

U svrhu postizanja zapreminske težine ugrađenog filtarskog materijala, koja je trebala iznositi 0.7 maksimalne zbijenosti zapreminske težine dobivene u laboratoriju, u terenskom laboratoriju su provedena ispitivanja minimalne i maksimalne zbijenosti. Prema laboratorijski dobivenim rezultatima maksimalna zbijenost iznosila je 24,16 kN/m³, dok je minimalna zapreminska težina iznosila 18,83 kN/m³ uz vlažnost materijala od 4,81% odnosno 2,11%. Prema tome svaka zbijenost između tih vrijednosti zadovoljavala je projektne zahtjeve.

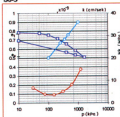
SJ-1



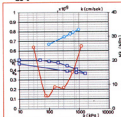
SJ-2



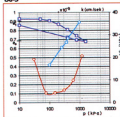
SJ-3



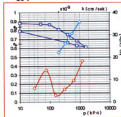
SJ-4



SJ-5



SJ-7



Slika 6. Dijagrami stišljivosti u edometru s vodopropusnošću

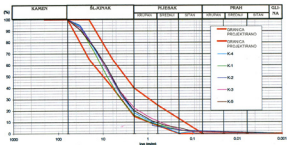
Kameni materijal za potporne zone i zaštitu uzvodnog pokosa

Prilikom iskopa gornjeg dijela i krajeva brane sav kameni materijal bio je deponiran na područja starog kamenoloma oko 300 m uzvodno od brane. Iskopani materijal bio je deponiran istresanjem niz padinu kamenoloma pri čemu je segregirao. Od tako segregiranog materijala odvajali su se veći blokovi potrebni za uzvodnu oblogu, dok su preostale sitnije i čišće frakcije uzimane za izgradnju potpornih zona brane. Jedan dio tog kvalitetnog kamenog materijala iskorišten je i ugrađen u branu, što nije bilo dovoljno za dovršenje, uključujući i povišenje brane. Preostala potrebna količina materijala dobivena je miniranjem u postojećem kamenolomu.

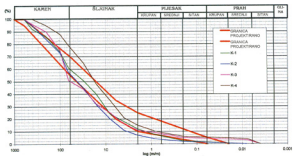
Samo područje kamenoloma izgrađeno je od gornjokrednih vapnenaca koji su slabo do srednje ispucale uglavnom vertikalnim pukotinama ispunjenim crvenicom. Gledajući kamenolom s čela gornjih oko 15 m više je ispucale i rastrošeno, dok je zona ispod toga oko 20 m izgrađena od debelo uslojenih kompaktnijih vapnenaca. Iz tog razloga korištenje kamenoloma se odvijalo u dvije etaže te, se koristio za nizvodnu odnosno uzvodnu potporna zonu.

Za potrebe ponovnog otvaranja kamenoloma izrađen je projekt eksploatacije, kojim je obzirom na tražene granulacije optimiziran ufošak eksploziva.

Sav kameni materijal prilikom izgradnje brane Peruća dobavljan je također iz ovog kamenoloma. Kamen iz ovog kamenoloma bio je povoljan za sanaciju, budući je bio poznatih fizičko-mehaničkih svojstava, koja su ujedno kroz eksploatacijski vijek brane bila atestirana. Tako za potrebe sanacije nisu zahtjevani posebni atesti fizičko-mehaničkih svojstava.



Slika 7. Projektirane granice i prvobitna kontrola granulometrijskog sastava filterarskog materijala iz kamenoloma Srinjine i Dugobabe



Slika 8. Projektirane granice i predhodna kontrola granulometrijskog sastava kamenog materijala za potporne zone



Foto 2. Eksploatacija kamenoloma

Na foto 2 vidljiv je način korištenja kamenoloma, te rastrošene i kompaktne zone, a iz granulometrijskih dijagrama, sl. 8, prethodne granulometrijske analize radi potvrde projekta korištenja i optimalizacije utroška eksploziva.

(B) KONTROLA UGRADNJE MATERIJALA

UVOD

Glavim projektom sanacije brane Peruća, "Programom kontrole i osiguranja kvalitete ugrađenih materijala", bilo je predviđeno da se kontrola kvalitete za vrijeme ugradnje materijala provode **tekućim i kontrolnim** ispitivanjima.

Tekuća ispitivanja, koja je provodio Izvoditelj radova, obavljana su svakodnevno po dovršenju ugradnje materijala u pojedini element brane, dok su se kontrolna ispitivanja provodila povremeno radi provjere tekućih ispitivanja, a provedena su od strane Investitorskog nadzornog tima.

PROGRAM ISPITIVANJA

Za sva Projektom predviđena terenska i laboratorijska ispitivanja propisane su vrste ispitivanja, standardi po kojima se ispitivanja trebaju provoditi i količine uzoraka za ispitivanja. Tako su sva ispitivanja razvrstana po vrstama materijala, količini uzimanja uzoraka, vrsti ispitivanja i važećim standardima.

Za tekuća i kontrolna ispitivanja bila su predviđena slijedeća, klasifikacijska i mehanička ispitivanja:

Tekuća ispitivanja

Glinena jezgra:

-	zapreminska težina	1 kom/ 25m ³
-	vlažnost	1 kom/ 25m ³
-	standardni Proctorov pokus	1 kom/3000m ³
-	granulometrijski sastav	1 kom/ 500m ³
-	Asterbergove granice	1 kom/ 500m ³
-	specifična težina	1 kom/3000m ³
-	sadržaj organskih primjesa	1 kom/1000m ³

Filtarski materijal:

-	granulometrijski sastav	1 kom/ 300m ³
-	zapreminska težina	1 kom/ 50m ³

Potporne zone:

-	granulometrijski sastav	1 kom/10000m ³
-	zapreminska težina	1 kom/ 5000m ³

Kontrolna ispitivanja**Glinena jezgra:**

-	zapreminska težina	1 kom/ 250m ³
-	vlažnost	1 kom/ 250m ³
-	standardni Proctorov pokus	1 kom/3000m ³
-	granulometrijski sastav	1 kom/1500m ³
-	Atterbergove granice	1 kom/1500m ³
-	specifična težina	1 kom/3000m ³
-	sadržaj organskih primjesa	1 kom/3000m ³
-	sadržaj karbonata	1 kom/3000m ³
-	kompresija + VDP	1 kom/3000m ³
-	triaksijalni pokus	1 kom/3000m ³

Filtarski materijal:

-	granulometrijski sastav	1 kom/ 500m ³
-	zapreminska težina	1 kom/ 250m ³

Potporne zone:

-	granulometrijski sastav	1 kom/30000m ³
-	zapreminska težina	1 kom/15000m ³

KONTROLA UGRADNJE GLINENOG MATERIJALA**Uvod**

Za ugradnju u tijelo brane korištene su dvije vrste gline, uvjetno nazvane "stara" i "nova" glina.

Zbog naprijed spomenutih problema sa potrebnim količinama gline za izgradnju jezgre, prilikom iskopa goraje dijela i krajeva brane imperativno se vodilo računa da se sačuva što više gline iz postojeće jezgre. Ona je deponirana u neposrednoj blizini brane, termin "stara" glina. Termin "nova" glina odnosi se na glinu iz nalazišta Zorica.

Kako su predhodno laboratorijski ispitana sva relevantna svojstva materijala, ugradnja je započela u srpnju 1994. godine korištenjem "stare" gline sa gradilišne deponije, foto 3.



Foto 3. Deponija "stare" gline



Foto 4. Način zbijanja glinene jezgre

Ugradnja ove gline trajala je do 21. listopada 1994 godine kada se na lijevom kraju brane dosegla kota 345,80 m n.m.

Za potrebe konačnog definiranja kriterija ugradnje gline izvedeno je probno polje prema uputstvima geomehaničke nadzorne službe. Probno polje bilo je smješteno u neposrednoj blizini brane na radnom platou, a za dovođenje, razastiranje i zbijanje korištena je mehanizacija kojom su se obavljali radovi na izgradnji glinene jezgre. Variranjem debljine slojeva i broja prijelaza valjka (vibreo valjak - Bitelli Ghibli C100) zaključeno je da se optimalni rezultati postižu sa slojem debljine 30-35 cm u rahlom stanju, te sa 8 prijelaza po istom tragu i uključenom vibracijom. Brzina zbijanja bila je ograničena na 5 km/h.

Većina laboratorijskih ispitivanja provedena je na terenu u prikladnim laboratorijima smještenim u krugu gradilišta u neposrednoj blizini brane opremljenim samo i u svrha praćenja ugradnje materijala u branu.

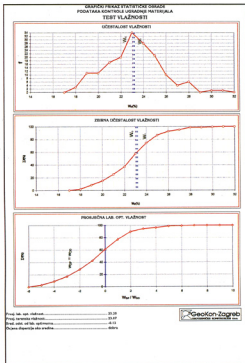
Tekućim i kontrolnim laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je da je "stara" glina srednje do visoke plastičnosti, Cl-CH, crvenkasto smeđe boje, dok su ostale vrijednosti bile unutar slijedećih granica:

- specifična gustoća	$\rho = 2,6 - 2,72 \text{ (kg/dm}^3\text{)}$
- granice tečenja	$W_L = 45,77 - 54,33 \text{ (%)}$
- granica plastičnosti	$W_P = 25,40 - 29,58 \text{ (%)}$
- indeks plastičnosti	$I_P = 18,99 - 24,75 \text{ (%)}$
- sadržaj karbonata	$\text{CaCO}_3 = 2,98 - 8,50 \text{ (%)}$

Za ilustraciju postignute kvalitete ugradnje, te načina obrade i prikazivanja rezultata u nastavku teksta dat je primjer statističke obrade postignutih rezultata **ispitivanja vlažnosti i zapreminske težine ugrađene "stare" gline u lijevi kraj brane u vremenskom razdoblju od 15. do 30. rujna 1994 godine.**

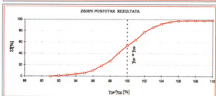
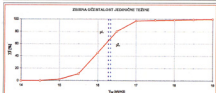
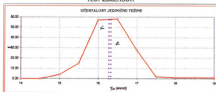
Iz numeričke obrade vidljivo je da na uzorku od ukupno 167 rezultata srednja vrijednost **optimalne vlažnosti** određene u laboratoriju iznosi $W_{opt}=23,20(\%)$, dok je kod ugradnje postignuta prosječna vlažnost od $W_T=23,07(\%)$, što daje razliku u vrijednosti od $-0,13(\%)$, te se disperzija rezultata ocjenjuje kao mala. Na grafičkom prikazu, sl. 9, vidljivo je, da je u tom razdoblju ugrađivana glina čija se vlažnost u 95% slučajeva kretala u okvirima od -4 do $+4(\%)$ u odnosu na srednju optimalnu vlažnost određenu u laboratoriju.

Na istom uzorku rezultata obrađene su i dobivene vrijednosti **suhih zapreminskih težina**. Iz numeričke obrade vidljivo je, da je kod ugradnje postignuta prosječna suha zapreminska težina od $\gamma_d=16,34 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ što u odnosu na optimalnu vrijednost od $\gamma_{opt}=16,28 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ daje razliku u vrijednosti od $0,06 \text{ (kN/m}^3\text{)}$. Na osnovi ovog podatka disperzija rezultata ocjenjuje se kao vrlo mala. Na grafičkom prikazu, sl. 10, vidljivo je da je u tom razdoblju ugrađivana glina čija je zbijenost u 97(%) slučajeva bila iznad 95(%) vrijednosti modificiranog Proctorovog pokusa, kao projektnog kriterija ugradnje.



Slika 9. Statistička obrada rezultata kontrolnih i tekućih ispitivanja vlažnosti prilikom ugradnje "stare" gline tijekom druge polovice rujna 1994. godine.

STATISTIČKA PRERAĐAJ STATISTIČKE OBRADJE
PODATAKA KONTROLE UGRADNJE MATERIJALA
TEST ZBUJENOSTI

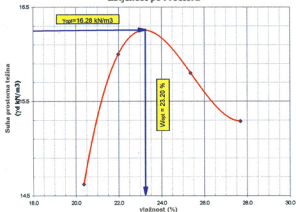


Prosj. težina (jed. masa) 11.21
Prosj. masa jedn. jed. masa 11.24
Broj. jedin. od jedn. različitosti 1.00
Opisna disperzija svih jedinica 100.0000

GeoKon-Zagreb
POSREDOVANJE U PROMETU NEPOKRETNOSTI

Slika 10. Statistička obrada rezultata kontrolnih i tekućih ispitivanja zapreminske težine prilikom ugradnje "stare" gline tijekom druge polovice rujna 1994. godine.

Zbijenost po Proctoru



Slika 11. Referentni modificirani Proctorov pokus za skupinu podataka "stare" gline

Na slici 11 prikazan je dijagram referentnog modificiranog Proctorovog pokusa za ovu grupu rezultata. Na osnovu svega gore navedenog može se zaključiti da je glina u ovom razdoblju ugrađivana kvalitetno i u skladu sa projektnim pretpostavkama.

Od 22. studenog 1994 godine započela je eksploatacija "nove" gline sa nalazišta Zorica kao i njena ugradnja. Ugradnja je trajala do 16. prosinca 1994 godine kada je zbog loših vremenskih uvjeta prekinuta. Pokušalo se u ožujku 1995. godine nastaviti sa ugradnjom, ali loše vremenske prilike i uvjeti na nalazištu odgodili su izvođenje radova za mjesec svibanj kada se počelo ozbiljnije raditi uz povremene prekidne zbog jakih kiša.

Tekuća i kontrolna ispitivanja za "novu" glinu obavljena su po istim uvjetima kao i za predhodno ugrađivanu glinu s time, da se ovisno o stanju na nalazištu češće pristupalo kontroli prirodne vlage. Kopane su dodatne istražne jame, te su uzimani uzorci za kompletne identifikacijske analize materijala.

Tekućim i kontrolnim laboratorijskim ispitivanjima utvrđeno je da je "nova" glina uglavnom visoke plastičnosti, CH, s manjim dijelovima nalazišta, gdje prevladavaju srednje plastične gline CI. Gline iz tog nalazišta su različitih boja i to od svijetložute, žutosmeđe, sive pa sve do crne, dok su ostale vrijednosti bile unutar slijedećih granica:

- specifična gustoća	$\rho = 2,6 - 2,74 \text{ (kg/m}^3\text{)}$
- granica tečenja	$W_L = 39,97 - 77,10 \text{ (%)}$
- granica plastičnosti	$W_P = 18,50 - 30,90 \text{ (%)}$
- indeks plastičnosti	$I_P = 19,26 - 52,40 \text{ (%)}$
- sadržaj karbonata	$\text{CaCO}_3 = 1,08 - 6,66 \text{ (%)}$
- sadržaj organskih tvari	$0,00-0,42 \text{ (%)}$

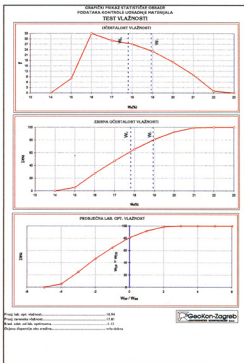
Za ilustraciju postignute kvalitete ugradnje, te načina obrade i prikazivanja rezultata u nastavku teksta dat je primjer statističke obrade postignutih rezultata ispitivanja **vlažnosti i zapreminske težine ugrađene "nove" gline u lijevi i desni kraj brane tijekom svihna 1995. godine.**

Iz numeričke obrade vidljivo je da je na uzorku od ukupno 148 rezultata srednja vrijednost optimalne vlažnosti iznosi $W_{opt}=18,94(\%)$, dok je kod ugradnje postignuta prosječna vlažnost od $W_P=17,81(\%)$ što daje razliku u vrijednosti od $-1,13(\%)$ te se disperzija rezultata ocjenjuje kao vrlo mala. Na grafičkom prikazu, sl. 12, vidljivo je da je u tom razdoblju ugrađivana glina čija se vlažnost u 95(%) slučajeva kretala u okvirima od -4 do $+2(\%)$ u odnosu na srednju optimalnu vlažnost određenu u laboratoriju.

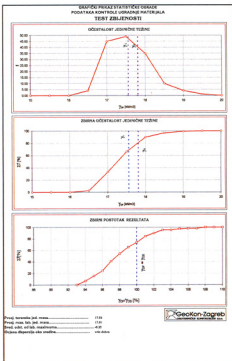
Na istom uzorku brađene su i dobivene vrijednosti suhih zapreminskih težina. Iz numeričke obrade vidljivo da je kod ugradnje postignuta prosječna suha zapreminska težina od $\gamma_d=17,56 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ što u odnosu na optimalnu vrijednost od $\gamma_{opt}=17,81 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ daje razliku u vrijednosti od $0,25 \text{ (kN/m}^3\text{)}$ te se disperzija rezultata ocjenjuje kao vrlo mala. Na grafičkom prikazu, sl. 13, vidljivo je da je u tom razdoblju ugrađivana glina čija je zbijenost u 92% slučajeva bila iznad 95% vrijednosti modificiranog Proctorovog pokusa, kao projektnog kriterija ugradnje.

Na slici 14 prikazan je dijagram referentnog modificiranog Proctor-ovog pokusa za ovu grupu rezultata. Na osnovu svega gore navedenog može se zaključiti da je glina u ovom razdoblju ugrađivana kvalitetno i u skladu sa projektnim pretpostavkama.

Ispitivanje mehaničkih osobina ugrađene gline obaviti će se po završetku gradnje prilikom bušenja za potrebe ugrađivanja instrumenata za promatranje ponašanja brane.

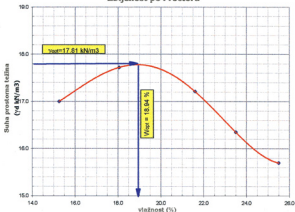


Slika 12. Statistička obrada rezultata kontrolnih i tekućih ispitivanja vlažnosti prilikom ugradnje "nove" gline tijekom svibnja 1995. godine.



Slika 13. Statistička obrada rezultata kontrolnih i tekućih ispitivanja zapreminske težine prilikom ugradnje "nove" gline tijekom svihnja 1994 godine

Zbijenost po Proctoru



Slika 14. Referentni modificirani Proctorov pokus za skupinu podataka "nove" gline

KONTROLA UGRADNJE KAMENIH MATERIJALA

Filtarski materijal za zaštitu glinene jezgre

Granulometrijski sastav

Određivanje granulometrijskog sastava filtarskog materijala provedeno je u skladu sa standardom U.B1.018, a služilo je za klasifikaciju i identifikaciju, te ocjenu fizikalnih i mehaničkih osobina drobljenog kamenog materijala za izgradnju filtarskih zona. Granulometrijske analize rađene su metodom suhog prosijavanja koje je izvedeno na standardnim geomehaničkim sitima do najmanjeg otvora od 0,10 mm.

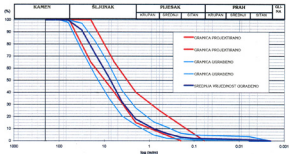
Tijekom radova na sanaciji, do trenutka pisanja ovog članka, obavljeno je preko šezdeset (60) ispitivanja. Za ispitane uzorke granulometrijska analiza pokazala je da drobljeni materijal iz kamenoloma Dugobabe i Srinjine zadovoljava uvjete tražene projektom. Tijekom izgradnje, prateći granulometrijski sastav filtera, uočena su manja odstupanja od traženih

uvjeta kod pojedinih količina materijala dopremljenih na gradilištu deponija. To je zahtijevalo potrebu korekcije granulometrijskog sastava filtera. Takvi slučajevi odmah su se ispravljali intervencijom kod tehnologa proizvodnje, a već isporučene količine su granulacijski ispravljane dovođenjem sitnijih frakcija drobljenca i mijeljanjem s deponiranim količinama filtera.

Iz priloženog granulometrijskog dijagrama, koji prikazuje zahtijevane granice ucrtane su granice granulometrijskog sastava stvarno ugrađenog materijala iz kojih su vidljiva sva odstupanja u odnosu na zahtijevano. Izuzev tih polja prikazana je i prosječna granulometrijska krivulja svih obavijenih sijanja, sl. 15, koja pokazuje da filterski materijal po svojoj prosječnoj granulometrijskoj analizi u cjelosti zadovoljava tražene uvjete za ugradnju u filterske slojeve.

Zapreminska težina

Sukladno tehničkim uvjetima filterski materijal ugrađivan je u slojevima debljine oko 50 cm, u sušnom periodu vlažen, a potom nabijan glatkim vibracijskim valjkom (Bitelli, Gihbli C100). Na mjestima, gdje je rov za ugradnju filtra bio uži, te nije mogao pristupiti veliki valjak, korišten je mali vibracijski glatki valjak (Dinapack, CG 11) ili vibracijski nabijač, "žaba" (Wacker, DS 72 Y). Broj prijelaza strojem preko sloja filtra ovisio je o vrsti stroja



Slika 15. Granulometrijski dijagram s prikazom granica granulometrijskog sastava filterskog materijala - zahtijevano i stvarno izvedeno



Foto 5. Zasipavanje nizvodnog filtrarskog rova filtrarskim materijalom

s kojim se zbijalo. Analizom uzoraka s probnih dionica zaključeno je da se tražena zbijenost filtrarskog materijala postiže sa šest prijelaza preko obrađivane površine vibracijskim nabijačem ("žabom"), pet prijelaza malim glatkim vibracijskim valjkom i četiri prijelaza velikim glatkim vibracijskim valjkom. Navedenim brojem prijelaza strojevima za zbijanje zadovoljen je zahtjev zbijenosti od 70% maksimalne zbijenosti dobivene prethodnim ispitivanjima filtrarskog materijala, $\max. \gamma_d = 24.16 \text{ (kN/m}^3\text{)}$, $\min. \gamma_d = 18.83 \text{ (kN/m}^3\text{)}$, $W_{opt} = 3.40(\%)$.

Ispitivanja zapreminske težine obavljana su u skladu sa standardom U.B1.012., a rezultati ispitivanja poslužili su za kontrolu zbijenosti slojeva filtrarskih zona.

Prostorna težina ispitivana je u vlažnom i suhom stanju. Do trenutka pisanja članka obavljeno je preko dvjestosedamdeset (270) ispitivanja.

Prosječne vrijednosti zapreminske težine u vlažnom stanju su sljedeće:

Lijevi kraj uzvodno: $\gamma_w = 22.45$ (kN/m³), min. $\gamma_w = 19.58$ (kN/m³), max. $\gamma_w = 23.91$ (kN/m³)

Lijevi kraj nizvodno: $\gamma_w = 22.69$ (kN/m³), min. $\gamma_w = 20.54$ (kN/m³), max. $\gamma_w = 23.84$ (kN/m³)

Desni bok uzvodno: $\gamma_w = 22.33$ (kN/m³), min. $\gamma_w = 20.21$ (kN/m³), max. $\gamma_w = 23.80$ (kN/m³)

Desni bok nizvodno: $\gamma_w = 20.90$ (kN/m³), min. $\gamma_w = 16.97$ (kN/m³), max. $\gamma_w = 22.46$ (kN/m³)

Prosječne vrijednosti zapreminske težine u suhom stanju su sljedeće:

Lijevi kraj uzvodno: $\gamma_d = 21.86$ (kN/m³), min. $\gamma_d = 19.13$ (kN/m³), max. $\gamma_d = 23.34$ (kN/m³)

Lijevi kraj nizvodno: $\gamma_d = 22.05$ (kN/m³), min. $\gamma_d = 19.83$ (kN/m³), max. $\gamma_d = 23.89$ (kN/m³)

Desni kraj uzvodno: $\gamma_d = 21.76$ (kN/m³), min. $\gamma_d = 19.91$ (kN/m³), max. $\gamma_d = 23.09$ (kN/m³)

Desni kraj nizvodno: $\gamma_d = 20.37$ (kN/m³), min. $\gamma_d = 16.47$ (kN/m³), max. $\gamma_d = 21.88$ (kN/m³)

Vlažnost

Vlažnost uzoraka na deponiji i mjestu ugradnje određivana je u skladu sa standardom U.B1.012. Određivanje vlažnosti provedeno je s ciljem, da se filterski materijal optimalno navlaži i što kvalitetnije nabije. U tu svrhu svaki ugrađeni sloj dodatno je vlažen ukoliko vlaga filterskog materijala nije bila zadovoljavajuća (optimalna).

Za uzorke filtera na mjestu ugradnje dobijene su sljedeće prosječne vrijednosti vlažnosti:

Lijevi kraj uzvodno: $W_0 = 2.74(\%)$, min. $W_0 = 1.16(\%)$, max. $W_0 = 5.14(\%)$

Lijevi kraj nizvodno: $W_0 = 2.86(\%)$, min. $W_0 = 1.42(\%)$, max. $W_0 = 4.99(\%)$

Desni kraj uzvodno: $W_0 = 2.53(\%)$, min. $W_0 = 1.51(\%)$, max. $W_0 = 4.43(\%)$

Desni kraj nizvodno: $W_0 = 2.62(\%)$, min. $W_0 = 1.61(\%)$, max. $W_0 = 3.62(\%)$

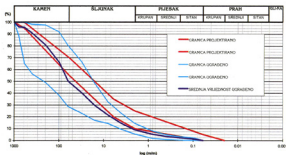
Podporna zona

Kameni materijal ugrađivan je u slojevima maksimalne debljine 1.0 m. Slojevi su valjani glatkim vibracijskim valjcima (Bötelli, Ghibli C100). Analizom rezultata zapreminske težine postignute na probnoj dionici zaključeno je da se tražena zbijenost postiže s najmanje pet prijelaza valjkom po istoj dionici sloja.

Granulometrijski sastav

Određivanje granulometrijskog sadržaja kamenog materijala za izgradnju potpornih zona provedeno je u skladu sa standardom U.B1.018, a služi za klasifikaciju i identifikaciju te za ocjenu fizikalnih i mehaničkih osobina kamenog materijala za izgradnju uzvodne i nizvodne potporne zone. Granulometrijska analiza rađena je metodom mjerenja promjera velikih zrna pomičnim mjerilom i metodom prosijavanja, od promjera zrna 40,0 cm na niže. Prosijavanje je izvedeno na standardnim geomehaničkim sicima do najmanjeg otvora od 0,10 mm.

Do polovice srpnja 1995. godine završeno je osamnaest (18) granulometrijskih analiza. Uzorci kamenog materijala za granulometrijsku analizu uzimani su iz jama za mjerenje zapreminske mase potpornih zona tijela brane.



Slika 16. Granulometrijski dijagram s prikazom granica granulometrijskog sastava materijala potpornih zona - zahtijevano i stvarno izvedeno

Iz prikazanog granulometrijskog dijagrama, sl. 16, vidljivo je da se granulometrijske krivulje ispitanih uzorka djelomično uklapaju unutar granica postavljenih projektom. Analizom rezultata može se zaključiti da je do odstupanja moglo doći zbog slučajno nepovoljnog uzorkovanja. No unatoč navedenom, geomehaničke i hidrauličke osobine novoizvedenih dijelova potpornih zona su takve, da funkcija uzvodne i nizvodne potporne zone izvedene raspoloživim i ispitanim kamenim materijalom neće biti dovedena u pitanje niti umanjena u bilo kojem smislu.

Zapreminska težina

Ispitivanja su obavljena u skladu sa standardom U.B1.012. Rezultati ispitivanja služe za kontrole zbijenosti slojeva uzvodne i nizvodne potporne zone.

Prostorna težina ispitivana je u vlažnom i u suhom stanju. Tijekom dosadašnjih radova na sanaciji oštećenih dijelova i dogradnji novog dijela potpornih zona obavljena su pedesetdva (52) ispitivanja.

Dobivene vrijednosti **prostorne težine u vlažnom stanju** su sljedeće:

Lijevi kraj uzvodno: $\bar{\gamma}_v=22.49$ (kN/m³), min. $\gamma_v=21.09$ (kN/m³), max. $\gamma_v=24.03$ (kN/m³)

Lijevi kraj nizvodno: $\bar{\gamma}_v=22.41$ (kN/m³), min. $\gamma_v=21.13$ (kN/m³), max. $\gamma_v=24.17$ (kN/m³)

Desni kraj uzvodno: $\bar{\gamma}_v=20.53$ (kN/m³), min. $\gamma_v=19.61$ (kN/m³), max. $\gamma_v=23.93$ (kN/m³)

Desni kraj nizvodno: $\bar{\gamma}_v=22.19$ (kN/m³), min. $\gamma_v=20.94$ (kN/m³), max. $\gamma_v=23.92$ (kN/m³)

Proširnje nizvodne potporne zone:

$\bar{\gamma}_v=22.41$ (kN/m³), min. $\gamma_v=19.26$ (kN/m³), max. $\gamma_v=24.23$ (kN/m³)

Dobivene vrijednosti **prostorne težine u suhom stanju** su sljedeće:

Lijevi kraj uzvodno: $\bar{\gamma}_d=21.79$ (kN/m³), min. $\gamma_d=20.34$ (kN/m³), max. $\gamma_d=23.84$ (kN/m³)

Lijevi kraj nizvodno: $\bar{\gamma}_d=21.53$ (kN/m³), min. $\gamma_d=20.47$ (kN/m³), max. $\gamma_d=22.98$ (kN/m³)

Desni kraj uzvodno: $\bar{\gamma}_d=21.32$ (kN/m³), min. $\gamma_d=19.63$ (kN/m³), max. $\gamma_d=23.93$ (kN/m³)

Desni kraj nizvodno: $\bar{\gamma}_d=21.23$ (kN/m³), min. $\gamma_d=20.08$ (kN/m³), max. $\gamma_d=22.78$ (kN/m³)

Proširenje nizvodne potporne zone:

$\bar{\gamma}_d=21.54$ (kN/m³), min. $\gamma_d=19.64$ (kN/m³), max. $\gamma_d=23.53$ (kN/m³)

Pregledom navedenih podataka vidljivo je da su slojevi potpornih zona kvalitetno nabijeni.

Vlažnost

Uvažavajući zahtjeve iz projekta uvjeta nastojalo se uvijek slojeve vlažiti sa 100 l vode po metru kubnom ugrađenog materijala. Iznimke su bile: izuzetno kišna razdoblja, kada je dodatno vlaženje bilo suvišno i sušna razdoblja, ljetni period, kada je ponekad bilo teško osigurati tražene količine vode.

Vlažnost uzoraka na mjestu ugradnje određivana je u skladu sa standardom U.B1.012. Određivanje vlažnosti služi za ocjenu zasićenosti kamenog nasipa vodom, s ciljem da se kameni materijal što kvalitetnije nabije.

Za uzorke tla s pozicija uzorkovanja dobivene su slijedeće **prosječne vrijednosti vlažnosti** na mjestu ugradnje:

Lijevi kraj uzvodno: $\bar{W}_O=4.33(\%)$, min $W_O=2.68(\%)$, max. $W_O=5.32(\%)$

Lijevi kraj nizvodno: $\bar{W}_O=4.05(\%)$, min $W_O=3.25(\%)$, max. $W_O=5.62(\%)$

Desni kraj uzvodno: $\bar{W}_O=4.20(\%)$, min $W_O=2.61(\%)$, max. $W_O=5.24(\%)$

Desni kraj nizvodno: $\bar{W}_O=4.55(\%)$, min $W_O=3.76(\%)$, max. $W_O=6.14(\%)$

Prolirenje nizvodne potporne zone: $W_O=4.00(\%)$, min $W_O=2.77(\%)$, max. $W_O=6.83(\%)$

ZAKLJUČAK

Na osnovi statističke obrade 167 uzoraka ugrađene gline u rujnu 1994 godine, te 148 uzoraka ugrađene gline u svibnju 1995 godine može se zaključiti da su zadovoljeni zahtjevi postavljeni u projektu.

Kontrola ugradnje filteraskog materijala provedena na 270 uzoraka pokazala je, da su filteraski slojevi izvedeni također prema projektnim zahtjevima.

Materijal ugrađen u potporne zone kontroliran je na 52 uzorka. Rezultati su pokazali, da zapreminska težina niti jednog uzorka nije bila manja od projektom propisane u veličini od 20 kN/m³.

INJEKTIRANJE JEZGRE BRANE

Doc.dr.sc. JOSIP RUPČIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj projekta

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d.

ZAGREB

SAŽETAK

Osnovna svrha injektiranja jezgre bila je zapunjavanje pukotina i šupljina u glini nastalih kao posljedica miniranja brane, a u cilju sprječavanja gubitka isplake i urušavanja stranica rova za izvedbu dijafragme.

Injektiranje je provedeno cementno-bentonitom suspenzijom, koje su reološka svojstva i tlak injektiranja odabrani takvi, da se konsolidira što veći dio oštećene glinene jezgre.

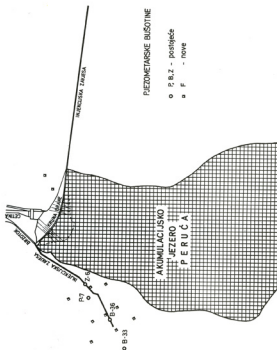
Rezultati injektiranja potvrdili su pretpostavku, da su najveća oštećenja nastala na središnjem dijelu brane, a uz to i pokazali njihovu veliku disperziju, nepovezanost i lokalni karakter kako uzduž tako i po visini jezgre brane. Time je potvrđena ispravnost usvojenog rješenja sanacije izvedbom dijafragme od plastičnog betona kao vododrživog elementa brane na dijelu, gdje se brana potpuno ili djelomično ne rekonstruira.

Injektiranje jezgre u potpunosti je ispunilo svoju svrhu budući je dijafragma izvedena bez poteškoća u odnosu na stabilnost stranica prilikom iskopa rova.

Jezgra je injektiranjem konsolidirana, te će zajedno sa dijafragmom predstavljati kako vododrživi tako i statički element brane u smislu prijenosa opterećenja na nizvodnu potpornu zonu.

SVRHA INJEKTIRANJA

Prema usvojenom rješenju sanacije dijafragmom izvedenoj u oštećenoj glinenoj jezgri uspostavlja se vododrživost brane na njezinom središnjem dijelu dužine 261,15 m, odnosno na oko 59% ukupne dužine. Dubina dijafragme varira od 12,9 do 51,5 m, debljina iznosi 1 m, a površina 8.505 m².



Slika 1. Situacija brane

Kako se stabilnost stranica iskopa za dijafragmu osigurava isplakom, postojala je realna opasnost da kroz pukotine u glinenoj jezgri, koje su nastale kao posljedica miniranja brane, dođe tijekom radova do gubitka isplake i urušavanja iskopa. Radi toga je bilo predviđeno na dijelu brane na kojem se izvodi dijafragma injektiranjem zapuniti pukotine cementno-bentonitnom suspenzijom, te na taj način konsolidirati taj dio glinene jezgre u smislu smanjenja opasnosti od gubitaka isplake, te povećanja otpornosti na smicanje, a time i povećanja sigurnosti izvedbe dijafragme.

Injektiranje jezgre bilo je predviđeno izvesti na dužini od oko 204 m, odnosno na oko 78% dužine dijafragme, sl. 1 i 2. Na lijevom i desnom kraju, dužine oko 27 odnosno 30 m nije bilo predviđeno injektiranje radi toga, što se na tim dionicama brana sanira iskopom i ponovnim nasipavanjem, tako da se na polovici površine dijafragma izvodi u novo izgrađenoj jezgri brane.

Nadalje, na osnovi analize rezultata opažanja slijeganja brane bilo je moguće zaključiti, da se brana nalazi u stanju sekundarne konsolidacije. Slijeganje na lijevom kraju dijafragme u zadnja tri mjeseca opažanja iznosilo je 2 do 3 mm, odnosno svega oko 0,005% visine brane, dok na desnom kraju slijeganje brane u tom razdoblju nije zabilježeno. U odnosu na ove podatke moglo se pretpostaviti da na ovim dionicama u jezgri brane nema većih pukotina, a time niti opasnosti od značajnijeg naglog gubitka isplake, odnosno da bi se izvedba dijafragme trebala odvijati u normalnim okolnostima.



Foto 1. Glinena jezgra na najnižem dijelu iskopa lijevog kraja brane s razrušenom galerijom

Nakon provedenog iskopa na lijevom i desnom kraju brane u svrhu njezine rekonstrukcije, ova pretpostavka je i potvrđena, budući su vanjske, vidljive površine jezgre bile kompaktne i na njima nisu primjećene pukotine kroz koje bi moglo doći do gubitka isplake, foto 1.

KARAKTERISTIKE INJEKCIJSKE SUSPENZIJE I TLAK INJEKTIRANJA

Stabilna injekcijska suspenzija ima svojstva Bingham-ove tekućine, kod koje doseg injektiranja ne ovisi samo o širini pukotine i tlaku injektiranja već i o početnom tangencijalnom otporu suspenzije " τ_0 " kojeg valja savladati, da bi se tekućina pokrenula. Pri tome protok suspenzije ovisi o njezinom dinamičkom koeficijentu viskoznosti " η ".

Budući je svrha injektiranja bila konsolidacija jezgre, reološka svojstva suspenzije trebala su biti takva, da doseg injektiranja obuhvati što veći dio jezgre pri tlaku koji približno odgovara efektivnim vertikalnim naprezanjima u jezgri brane. Ovaj tlak injektiranja odabran je radi toga što je postojala bojazan, da se većim tlakom ne naruši nakon miniranja postignuta ravnoteža dezintegrirane glinene jezgre. Osim toga, veći tlak injektiranja mogao je prouzročiti prodiranje suspenzije kroz veće pukotine jezgre u filtrarske slojeve i potpune zone brane izgrađene od kamenog materijala, što bi predstavljalo poteškoće u definiranju završetka injektiranja prema uobičajenim kriterijima: utrošak suspenzije kod određenog tlaka kroz određeno vrijeme.

Za injektiranje je bila predviđena suspenzija sastavljena od 80% cementa i 20% bentonita razrijeđena s vodom u težinskim omjerima suhe tvari prema vodi od 1:2,5 do 1:2.

Za sastav suspenzije upotrebljen je portland cement slijedećih karakteristika:

gustoća	$\rho = 3,12 \text{ kg/dm}^3$
specifična površina po Blaine-u:	3508 cm^2/g
početak vezivanja	140 min
kraj vezanja	220 min
tlakna čvrstoća nakon 28 dana	44,8 MPa

Karakteristike upotrebljenog bentonita su slijedeće:

gustoća	$\rho = 2,587 \text{ kg/dm}^3$
granica tečenja	$W_L [\%] = 514$
granica plastičnosti	$W_P [\%] = 41,55$
indeks plastičnosti	$I_p = 472,45$



Foto 2. Izvedba injektiranja

Laboratorijskim ispitivanjima reoloških i fizikalno-mehaničkih svojstva suspenzije s omjerima suhe tvari prema vodi od 1:2,5 i 1:2 dobiveni su slijedeći rezultati:

suha tvar : voda		1:2,5	1:2
viskoznost po Marshu [s]	ϕ 4 mm	42	∞
	ϕ 10 mm	7,8	16,6
dinamička viskoznost po Fannellu	η [mPas]	8	18,0
početni tangencijalni otpor	τ_0 [Pa]	16,5	57,0
jačina gela [Pa]	nakon 10 s	8,5	22,5
	nakon 10 min.	12,5	30,0
dekantacijski volumen	nakon 5 min	0	0
	nakon 240 min	0	0
gustoća	ρ [kg/dm ³]	1,235	1,286

početak vezanja	[sati]	:	18	18
kraj vezanja	[sati]	:	30	27
tlučna čvrstoća nakon 28 dana	[MPa]	:	0,9	1,57

Injektiranje je bilo predviđeno izvesti po dionicama bušotine visine 5 m, pri čemu se najdublja dionica nalazi na dubini od 45 do 50 m. Uz jediničnu težinu materijala jezgre između 16 i 17 kN/m³ efektivno vertikalno naprezanje na ovoj dubini iznosi približno 800 kN/m². Maksimalni polumjer dosegla injekcijske suspenzije izračunat je prema izrazu Wittke-a:

$$\max R = \frac{\sigma}{\tau_0} \rho_{\max} + r_0$$

u kojem su:

$\max R$ [m]	-	maksimalni polumjer dosegla suspenzije
a [m]	-	širina pukotine
τ_0 [Pa]	-	početno tangencijalno naprezanje suspenzije
$\rho_{\max}$ [Pa]	-	maksimalni tlak injektiranja
r_0 [m]	-	polumjer bušotine

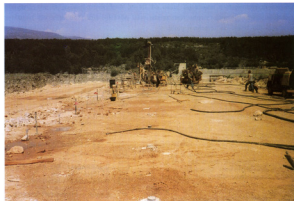


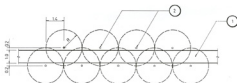
Foto 3. Izvedba injektiranja

Za suspenziju razrijeđenja 1:2,5 za koju je $\tau_0 = 16,5$ Pa, te za širinu pukotine $a = 1 \cdot 10^{-4}$ m, tlak injektiranja $p_{\text{inj}} = 800$ kPa, promjer bušotine 60 mm, maksimalni polumjer dosega injekcijske suspenzije iznosi 4,88 m, a za širinu pukotine $a = 1 \cdot 10^{-3}$ m, 48,51 m. Uz upotrebu najgušće suspenzije omjera suhe tvari prema vodi od 1:2, koje početno tangencijalno naprezanje iznosi $\tau_0 = 57$ Pa, uz isti tlak i polumjer bušotine, a širinu pukotine $a = 1 \cdot 10^{-4}$ m, maksimalni polumjer dosega injektiranja iznosi 1,43 m, dok za širinu pukotine $a = 1 \cdot 10^{-3}$ m, 14,06 m. Budući širina glinene jezgre na tom dijelu brane u temelju iznosi oko 23 m, dobiveni rezultati smatrani su zadovoljavajućim.

Za gornje dionice injekcijskih bušotina na dubini od 1 do 5 m pretpostavljen je tlak injektiranja od približno 100 kN/m^2 , pri kojem maksimalni polumjer dosega injekcijske suspenzije razrijeđenja 1:2,5 za širinu pukotina $a = 1 \cdot 10^{-4}$ m iznosi 0,61 m, a za širinu pukotine $a = 1 \cdot 10^{-3}$ m, 6,11 m.

I ovi rezultati smatrani su prihvatljivim, iako širina jezgre na toj visini iznosi oko 8 m. Međutim, os dijafragme postavljena je 4 m uzvodno od osi brane, pa je doseg injekcijske suspenzije uz predviđeni tlak potpuno dovoljan.

Dobiveni su rezultati pokazali, da reološka i fizikalno-mehanička svojstva injekcijske suspenzije predviđenog sastava i odnosa miješanja s vodom uz raspon tlakova injektiranja od $100-800 \text{ kN/m}^2$ zadovoljavaju. Na osnovi ovih podataka određen je trokutni raspored bušotina sa razmakom u smjeru osi brane od 1,4 m, sl. 3, koji odgovara polumjeru dosega injekcijske suspenzije omjera suhe tvari prema vodi od 1:2 i širinu pukotine od $1 \cdot 10^{-4}$ m za najviši dio brane na temeljnoj plohi.



LEGENDA

- ① - DIJAFRAGMA OD PLASTIČNOG BETONA
 - ② - INJEKCIJSKE BUŠOTINE
- R / m / POLUMJER DOSEGA INJEKTIRANJA

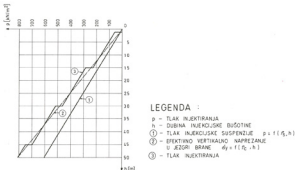
Slika 3. Raspored injekcijskih bušotina

KRITERIJI INJEKTIRANJA

Injektiranje je bilo predviđeno izvesti po dionicama bušotina visine 5 m i to u smjeru odozdo prema gore. Između usvojenih tlakova injektiranja za najviše i najdublje dionice bušotina u veličini od 100 odnosno 800 kN/m², određeni su tlakovi injektiranja za međudionice u odnosu na veličinu efektivnog vertikalnog naprezanja u jezgri, pravac 2, sl. 4, te prema tlaku injekcijske suspenzije razrijeđenja 1:2,5 koje gustoća iznosi 1,235 kg/dm³, pravac 1 sl. 4. To je postignuto na taj način, da je tlak injekcijske suspenzije povećan injekcijskom crpkom i to do dubine bušotine od 15 m za 50 kN/m², nadalje do dubine od 30 m za 100 kN/m², do dubine od 45 m za 150 kN/m², te za dubinu bušotine od 50 m za 200 kN/m², linija 3, sl. 4.

Kriterij završetka injektiranja definiran je tako, da je svaku dionicu trebalo injektirati propisanim tlakom do smanjenja utroška suspenzije na 0 litara kroz 20 minuta, odnosno do potpunog zasićenja, ili ukoliko se ono ne bi moglo postići do utroška suspenzije od najviše 20 litara kroz 20 minuta. U slučaju da se injektiranje završi sa utroškom $\leq$ 20 litara kroz 20 minuta, višu dionicu bušotine trebalo je injektirati tlakom predhodne niže dionice.

Pored primarnih bilo je predviđeno izvesti i sekundarne bušotine. U pomanjkanju bilo kakvih iskustava na takvim radovima, kriteriji za izvedbu sekundarnih bušotina nisu bili propisani, već ih je bilo predviđeno izvesti na onim dijelovima dionice injektiranja na kojima su utrošci injekcijske suspenzije takvi, da postoji sumnja da sve pukotine u jezgri nisu zapunjene.



Slika 4. Tlak injektiranja u funkciji dubine bušotine

ANALIZA REZULTATA INJEKTIRANJA

Na trasi injehtiranja dužine 204 m izvedeno je 147 primarnih bušotina dužine 4927 m i 24 sekundarne bušotine dužine 861 m, odnosno ukupno 171 bušotina dužine 5788 m. Ukupni utrošak injekcijske suspenzije iznosi 591.156 l, a prosječni 102,13 l/m bušotine. Budući da 1 l suspenzije sadrži 0,35 kg suhe tvari, za injehtiranje je utrošeno ukupno oko 207 t cementa i bentonita.

Na osnovi **prosječnih utrošaka injekcijske suspenzije u bušotinama**, V_1 [l/m bušotine] sl. 5, injehtirano područje može se podijeliti na **središnji najviši i preostali dio brane**.

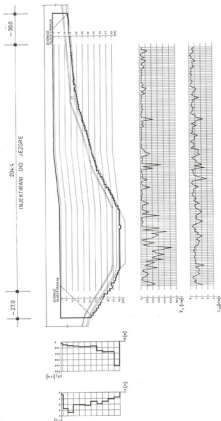
Iako na **središnjem dijelu brane**, dužine oko 50 m, prosječni utrošci injekcijske suspenzije po 1 m bušotine variraju od $V_1 = 13,48$ l do $V_1 = 534,45$ l i ipak prevladavaju utrošci s više od 100 l po metru bušotine, koji su registrirani na oko 70% bušotina. Koeficijent varijacije utrošaka suspenzije po pojedinim dionicama " c_{v1} " u tim bušotinama iznosi oko 1,0, što ukazuje na relativno ujednačen utrošak suspenzije po bušotinama, a to je i evidentno iz prikaza utrošaka injekcijske suspenzije po dionicama bušotina, sl. 6.

U bušotini s utroškom od $V_1 = 534,45$ l/m utrošci po dionicama variraju od 75 l/m na dubini od 1 do 5 m, do 1291 l/m na dubini od 30 do 35 m, s koeficijentom varijacije $c_{v1} = 0,7$. Ovakvi utrošci posljedica su velikih oštećenja jezgre brane, što potvrđuju i izmjerena slijezanja nakon miniranja, koja su na tom dijelu iznosila oko 1,55 m, odnosno oko 27%visine brane.

U bušotini s najmanjim prosječnim utroškom od $V_1 = 13,48$ l/m utrošci po dionicama variraju od 6 l/m na dubini od 5 do 10 m, do 30 l/m na dubini od 40 do 45 m, dok koeficijent varijacije za ovu bušotinu iznosi svega $c_{v1} = 0,53$. Izmjerena slijezanja na tom dijelu iznosila su oko 0,40 m ili 7%visine brane.

Na **preostalom injehtiranom dijelu jezgre brane** prosječni utrošci po pojedinim bušotinama znatno su manji, pri čemu je prijelaz diskontinuiran. Na samo 12% bušotina prosječni utrošak injekcijske suspenzije je veći od 100 l/m, s najvećim utroškom od $V_1 = 370,24$ l po metru bušotine i koeficijentom varijacije $c_{v1} = 2,24$. Međutim, ovaj prosječni utrošak u bušotini rezultat je izuzetno velikog utroška injekcijske suspenzije na dionici bušotine od 5 do 10 m od 2329 l/m, a to je ujedno i najveći utrošak na jednoj dionici na cijeloj trasi injehtiranja. Budući da se utrošci na preostalih šest dionica ove bušotine kreću između 12 i 35 l/m ovi podaci objašnjavaju i vrijednost koeficijenta varijacije od $c_{v1} = 2,24$.

Ovakva se analiza može u potpunosti primijeniti i na ostale bušotine na cijelom injehtiranom dijelu brane na kojima su registrirani veliki prosječni utrošci injekcijske suspenzije, ali s velikim vrijednostima koeficijenata varijacije. Oni su rezultat izuzetno velikih utrošaka injekcijske suspenzije u samo jednoj ili dvije dionice injehtiranja iste bušotine, dok su u ostalim dionicama znatno manji.



Slika 5. Prosječni utrošci injekcijske suspenzije

Zaključke temeljene na ovoj analizi potvrđuju i podaci o utrošcima injekcijske suspenzije u pojedinim dionicama bušotina koji su prikazani na sl. 6.

Na ovom dijelu trase injektiranja registriran je i najmanji prosječni utrošak injekcijske suspenzije u bušotini u iznosu od $V_1 = 11,33$ l po metru bušotine sa koeficijentom varijacije od $c_{v1} = 1,17$. Vrijednosti prosječnih utrošaka po pojedinim dionicama ove bušotine kreću se od 4 do 63 l/m, s time da je u osam od deset dionica injektiranja utrošak manji od prosječnog.

Na osnovi rezultata injektiranja može se zaključiti da je jezgra brane na ovom dijelu znatno manje oštećena u odnosu na središnji dio. Iako su registrirane dionice sa značajnim utrošcima injekcijske suspenzije one nisu međusobno povezane kao u središnjem dijelu brane. Manja oštećenja jezgre u odnosu na njezin središnji dio potvrđuju i podaci slijezanja, koja su iznosila od 0,03 m ili 1‰ visine brane na krajnjem dijelu do 0,53 m ili 9‰ visine brane na spoju sa središnjim dijelom.

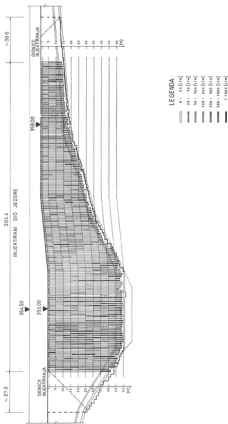
Rezultati analize prosječnog utroška injekcijske suspenzije po dionicama na istim dubinama injektiranja, V_2 [l/m] sl. 5, pokazuju da se utrošak relativno malo mijenja s dubinom za dionice od 1 do 30 m i kreće se od $V_2 = 50$ l/m za gornju dionicu do $V_2 = 80$ l/m za dionicu od 25 do 30 m. Međutim koeficijent varijacije prosječnih utrošaka varira od $c_{v2} = 1,58$ do $c_{v2} = 3,44$. To je posljedica izuzetno velikih utrošaka injekcijske suspenzije u pojedinim dionicama, dok su utrošci u ostalim dionicama na istoj visini injektiranja znatno manji, sl. 6.

Porastom dubine prosječni se utrošci po dionicama visine injektiranja povećavaju i variraju između 155 i 175 l/m za dubine od 30 do 45 m, dok za najdublju dionicu od 45 do 50 m prosječni utrošak iznosi $V_2 = 415,04$ l/m.

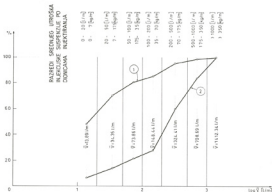
Koeficijenti se varijacije porastom dubine smanjuju, tako da za dionicu injektiranja na dubini od 45 do 50 m iznosi $c_{v2} = 0,86$. To je posljedica sve ujednačenijeg prosječnog utroška injekcijske suspenzije u pojedinim bušotinama.

Iako je na osnovi prosječnih vrijednosti teško donositi generalne zaključke, povećanje prosječnih utrošaka injekcijske suspenzije s porastom dubine injektiranja uz smanjenje koeficijenta varijacije pokazuje, da se oštećenja glinene jezgre brane povećavaju s dubinom, te da su najveća u najdonjem središnjem dijelu brane. To je bilo i za očekivati, jer je na tom dijelu brane u injekcijskoj galeriji vjerojatno i aktivirana najveća količina eksploziva.

Disperziju i stupanj oštećenja jezgre brane na dijelu injektiranja dobro ilustriraju utrošci injekcijske suspenzije po dionicama, koji su razvrstani u razrede po veličini prosječnog utroška, sl. 6, te učešće pojedinih razreda u ukupnoj dužini bušotina, linija 1. sl. 7, i ukupno utrošenoj količini injekcijske suspenzije, linija 2 sl. 7.



Słowa 6. Utrójci Injekcyjnej suspenzji po dionizama bułotina



LEGENDA :

$\bar{V}$ [l/m] SREDNJE VRIJEDNOSTI UTROŠAKA U RAZREDU

- ① SUMARNA LINIJA UČEŠĆA DUŽINE BUŠOTINA POJEDINIH RAZREDA
- ② SUMARNA LINIJA UČEŠĆA UTROŠAKA INJEKCIJSKE SUSPENZIJE POJEDINIH RAZREDA

Slika 7. Sumarne linije dužine bušotina i odgovarajućih utrošaka injekcijske suspenzije razvrstanih u razrede po količini utroška u dionicama injektiranja

Iz dijagrama na sl. 7 proizlazi da je prosječni utrošak na 81% ukupne dužine bušotina bio manji od 100 l/m odnosno 35 kg/m suhe tvari, pri čemu učešće u ukupnoj količini utrošene injekcijske suspenzije iznosi 22%.

Prosječni utrošci od 100-500 l/m odnosno 35-175 kg/m suhe tvari registrirani su na 15% ukupne dužine bušotina, na kojima je utrošeno 38% injekcijske suspenzije.

Na preostalih 4% dužine bušotina s prosječnim utrošcima većim od 500 l/m ili 175 kg/m suhe tvari utrošeno je 40% injekcijske suspenzije.



Foto 4. Detalj rekonstrukcije galerije čeličnim lukovima, mlaznim betonom i injektiranjem

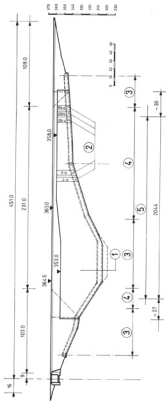
USPJEŠNOST INJEKTIRANJA JEZGRE U ODNOSU NA IZVEDBU DIJAFRAGME

Prilikom izvedbe dijafragme nije bilo ozbiljnijih poteškoća u odnosu na nagli gubitak isplake osim pojave njezinog nešto jačeg procjeđivanja u galeriju na dionicama označenim na sl. 8.

Uzrok ovim pojavama je slijedeći:

Na ovim je dionicama rekonstrukcija galerije predviđena podgrađivanjem stare raspucane betonske obloge čeličnim lukovima, izvedbom sloja mlaznog betona dvostrano armiranog čeličnim mrežama, te injektiranjem cementno-bentonitnom suspenzijom iza betonske obloge u svrhu popunjavanja pukotina i šupljina u oblozi i postizanja vododrživog spoja između obloge i gline jezgre odnosno temeljne stijene, foto 4.

U vrijeme početka izvedbe dijafragme od navedenih radova na rekonstrukciji galerije nije provedeno injektiranje iza obloge galerije, te su pukotine i šupljine u staroj betonskoj oblozi bile popunjene samo djelomično s unutrašnje strane galerije izvedbom sloja mlaznog betona.



LEGENDA

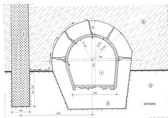
1. DUMFRAGMA
2. MJEŠTA PROČJEĐIVANJA ISPLAKE U GALERIJU
3. REKONSTRUKCIJA GALERIJE NOVOM BETONSKOM OBILOGOM
4. REKONSTRUKCIJA GALERIJE ČELIČNIM LUKOVIMA, MUZAZIM BETONOM I INJEKCIJAMA
5. INJEKCIJE DO JEZGARE

Slika 8. Dioneice pročišćivanja isplake u galeriju

Kako je do prodiranja isplake došlo prilikom iskopa rova za dijafragmu u temeljnoj stijeni, na osnovi analize do tada izvedenih radova na rekonstrukciji galerije pretpostavljeno je, da je uzrok tome djelovanje dinamičkog opterećenja hidrauličkog rezača, kojim se obavlja iskop rova za dijafragmu na temeljnu stijenu i djelomično izvedena obnova betonske obloge galerije. Uslijed rada hidrauličkog rezača oštećena je stijena, temeljna spojnica stijene i glinene jezgre, a ponovno su se otvorile i pukotine u betonskoj oblozi galerije, koje su bile samo djelomično zatvorene mlaznim betonom.

Hidrostatski tlak isplake u rovu za dijafragmu bio je dovoljno velik, da uzrokuje njezino procjeđivanje u galeriju kroz kontaktne plohe između stijene i glinene jezgre, zatim betonske obloge galerije i stijene odnosno glinene jezgre, te kroz ponovno otvorene pukotine i šupljine u betonskoj oblozi galerije, sl. 9.

U skladu s navedenom pretpostavkom prišlo se injektiranju iza betonske obloge galerije kako bi se potpuno zapunile pukotine i šupljine i ostvario vododrživi spoj betona galerije po cijelom vanjskom opsegu s glinenom jezgrom i temeljnom stijenom.



LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. ISPLAKA
3. GLINENA JEZGRA
4. STARI BETON
5. TEMELJNA STIJENA

Slika 9. Procjeđivanje isplake u djelomično obnovljenu injekcijsku galeriju

Nakon provedenog injektiranja obloge galerije iskop rova za dijafragmu odvijao se bez poteškoća u odnosu na gubitke isplake. Na taj je način potvrđena pretpostavka u uzroku prodiranja isplake u galeriju.

Kako tijekom izvedbe nije primijećeno niti urušavanje stranica rova, može se zaključiti, da je injektiranje jezgre brane na dijelu gdje se izvodi dijafragma u potpunosti ispunilo svoju svrhu i to kako u smislu sprečavanja gubitka isplake, tako i u smislu povećanja stabilnosti stranica iskopa.

ZAKLJUČAK

Rezultati injektiranja potvrdili su pretpostavku postavljenu na osnovi opažanja slijeganja, da su najveća oštećenja jezgre brane uslijed miniranja nastala na njezinom središnjem dijelu.

Međutim, dobiveni podaci o utrošku injekcijske suspenzije pokazali su veliku disperziju, nepovezanost i lokalni karakter oštećenja kako uzduž tako i po visini brane.

To se posebno odnosi na desni dio injektiranog područja u kojem su registrirani izuzetno veliki utrošci injekcijske suspenzije u dionicama bušotina u okolini kojih su utrošci bili značajno manji ne samo u susjednim bušotinama nego čak u dionicama iste bušotine koje se nalaze neposredno ispod ili iznad.

Ova činjenica potvrđuje ispravnost usvojenog rješenja sanacije izvedbom dijafragme od plastičnog betona kao novog vododrživog elementa brane na dijelu, gdje se brana djelomično ili potpuno ne rekonstruira.

Budući da je dijafragma izvedena bez značajnijih poteškoća u vezi gubitaka isplake, a praktično nikakvih u odnosu na stabilnost stranica rova u smislu urušavanja, injektiranje jezgre u potpunosti je ispunilo svoju svrhu.

Nadalje, injektiranjem je konsolidirana i jezgra, koja će zajedno s dijafragmom predstavljati pouzdani kako vododrživi tako i statički element brane u smislu prijenosa opterećenja na nizvodnu potpornu zonu.

LITERATURA

- [1] "Filling materials for watertight cut-off walls", ICOLD Bulletin 51, International commission on Large Dams, Paris, France, 1985
- [2] Lombardi, G., "Grouting design and control using the GIN principle", Water Power & Dam construction, June 1993
- [3] Novčević, E., "Injektiranje, teorija i praksa", Školska knjiga Zagreb, 1989

IZVOĐENJE DIJAFRAGME OD PLASTIČNOG BETONA

DALIBOR BOJANIĆ, dipl.Ing.građ.

Nadzorni inženjer

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.

SPLIT

ZVONIMIR ŠEPAC, dipl.Ing.građ.

Voditelj građenja

"GEOTEHNIKA" d.d.

ZAGREB

SAŽETAK

Dijafragma od plastičnog betona izvedena je u glinenoj jezgri brane Peruća na dužini od 261,15 m. Deblina dijafragme varira između 12,9 i 51,5 m, a ukupna površina iznosi 8.505 m².

Projektom propisane mehaničke karakteristike plastičnog betona bile su: tlačna čvrstoća nakon 28 dana ≥ 1 MN/m², a Youngov modul elastičnosti ≤ 400 MN/m². Darcyev koeficijent filtracije trebao je biti manji od 10⁻⁸ m/s. Ove karakteristike zadovoljio je slijedeći sastav 1m³ plastičnog betona; 112 kg cementa, 35,6 kg bentonita, 102 kg kamenog brašna, 1527 kg agregata promjera zrna 0-4 mm i 337 l vode.

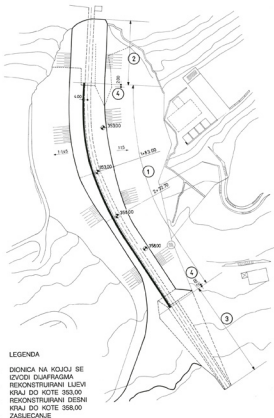
Rov za dijafragmu iskopan je grablicom i hidrauličkim rezačem, a betoniranje izvedeno metodom potvodnog betoniranja s kontraktor cijevima.

Dijafragma je izvedena za četiri mjeseca.

UVOD

U okviru sanacije brane Peruća predviđena je izgradnja dijafragme od plastičnog betona u središnjem dijelu brane, sa svrhom preuzimanja funkcije vododrživosti brane umjesto oštećene glinene jezgre. Dijafragma se izvodi od stac. 0+87,70 do 3+44,00 mjereno po osi brane.

Spoj između rekonstruiranih dijelova brane na lijevom i desnom kraju i dijela brane na kojem se izvodi dijafragma kao vododrživi element predviđen je tako, da se dijafragma izvede u glinenoj jezgri rekonstruiranih dijelova na dužini od najmanje 2 m. Budući da je



Slika 1. Situacija brane s položajem dijafragme

spoj rekonstruiranih i središnjeg dijela brane predviđen u pokosu s nagibom 1:1 navedeni kriterij odnosi se na najniže dijelove rekonstruiranih dijelova.

U smjeru okomito na os brane, os dijafragme smještena je 4,0 m uzvodno od osi injekcijske galerije. Debljina dijafragme iznosi 1,0 m.

Maksimalna projektirana dubina dijafragme iznosi 50,4 m, a minimalna 12,90 m. Predviđeno je, da se dijafragma u temeljnu stijenu, odnosno u betonsku ploču u središnjem dijelu brane, zasiječe minimalno 2 m, sl. 3.

Na temelju proračuna ponašanja dijafragme u uvjetima različitih opterećenja, projektom su određene slijedeće mehaničke karakteristike materijala iz kojeg se izvodi dijafragma:

- tlačna čvrstoća mora biti veća od 1 MN/m^2
- Youngov modul elastičnosti mora biti manji od 400 MN/m^2
- koeficijent vodopropusnosti mora biti manji od 10^{-6} m/sec .

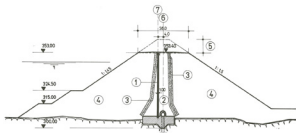
Na dijelu brane koji se uklanja u visini od 10 m, dijafragma se izvodi sa radnog platoa na koti 353,40, a na dijelu gdje se uklanja u visini od 5 m, sa platoa na koti 358,40 m n.m. Na dijelu pejelazne rampe između kota 353,40 m n.m. i 358,40 m n.m. dijafragma se izvodi stepenasto, sa stepenicama visine 1 m, sl. 1 i 2.

Radni je plato izveden od sloja nabijenog kamenog materijala debljine 40 cm. U svrhu zaštite glinena je jezgra geotekstilom odvojena od šljunčanog sloja.

Uvodnice, koje služe kao vodilice za stroj kojim se obavlja iskop, izvede se od armiranog betona debljine 25 cm i visine 1,25 m. Nakon izvedene dijafragme, predviđeno je da uvednice trajno ostanu ugrađene u tijelo brane, sl. 4.

Iskop za dijafragmu izvodi se najvećim dijelom u oštećenoj glinenoj jezgri brane, a u gornjih nekoliko metara iskop na pojedinim dijelovima uzduž trase dijafragme zahvaća uzvodni filterni sloj brane. Da bi se spriječio gubitak isplake u toku iskopa kroz pukotine u jezgri, predviđeno je prije početka iskopa provesti konsolidacijsko injektiranje uzduž trase dijafragme.

Radi osiguranja kontakta dijafragme i temeljne stijene, u cilju postizanja što bolje vodonepropusnosti, predviđeno je injektiranje spoja dijafragme s temeljnom stijenom betonom galerije i povezivanje sa postojećom injekcijskom zavjesom. Injektiranje je predviđeno izvesti iz obnovljene kontrolne galerije.



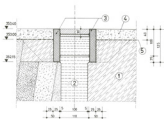
LEGENDA

1. DIJAFRAGMA
2. GLINENA JEZGRA
3. FILTARSKI SLOJEVI
4. KAMENI NABAČAJ
5. DIO KRILNE BRANE KOJI SE REKONSTRUIRA
6. OŠ BRANE
7. OŠ DIJAFRAGME

Slika 3. Karakteristični poprečni presjek brane s položajem dijafragme

LEGENDA

1. GLINENA JEZGRA
2. DIJAFRAGMA
3. UVODNICE
4. RADNI PLATO
5. GEOTEKSTIL



Slika 4. Detalj vrha dijafragme s uvodnicama

U okviru kontrole kvalitete radova predviđena su slijedeća ispitivanja:

- prethodna ispitivanja komponentnih materijala isplake i ispunje: cementa, bentonita, vode, pijeska, šljunka, zatim isplake, sježeg i očvrsg plastinog betona, se betona za uvodnice,
- ispitivanja tijekom izvođenja radova: kontrola vertikalnosti iskopa, vlažnosti agregata, doziranja materijala u betonari, tlačne čvrstoće plastinog betona nakon 7,28 i 90 dana, zatim ispitivanja konzistencije, vodonepropusnosti, erodibilnosti i betona uvodaica; za potrebe ovih ispitivanja uzimaju se uzorci na određenom količini ugrađenog materijala dijafragme.
- ispitivanje izvedene dijafragme u dvije faze.
 - u prvoj se fazi ispituje integritet izvedene dijafragme: geometrijske karakteristike, homogenost ugrađenog materijala, kvalitet spojeva elemenata te mehaničke karakteristike ugrađenog materijala: čvrstoća na pritisak i vodonepropusnost. U tu svrhu izvode se bušotine u tijelu dijafragme iz kojih se vade uzorci za ispitivanje.
 - u drugoj će se fazi ispitati vododrživost dijafragme u uvjetima kad brana dođe pod puni hidrostatski pritisak i to pomoću sustava za stalno praćenje vododrživosti brane.

Projekt "Vodonepropasna dijafragma" izradio je "Elektroprojekt" Zagreb 1994. god.

PRELIMINARNA ISPITIVANJA I KONAČNI IZBOR POSTUPKA IZVEDBE I SASTAVA MATERIJALA DIJAFRAGME

Projektom dijafragme predviđeno je da Izvoditelj radova u Tehnološkom projektu izvođenja odabere postupak izvedbe, dvofazni ili jednofazni te sastav materijala dijafragme, glinobeton za dvofazni ili samostvrdnjavajuću cementno-bentonitu isplaku za jednofazni.

Za Izvoditelja radova odabrana je zajednička tvrtka "Geotechnika-Bauer" d.o.o., osnovana isključivo zbog radova na brani Peruća od "Geotechnike" Zagreb i "Bauer Spezialtiefbau" Schrobenuhausen, Njemačka.

Izvoditelj je odabrao dvofazni postupak izvođenja dijafragme: iskop, pa betoniranje glinobetonom, u svrhu postizanja projektom zahtjevanih mehaničkih karakteristika materijala dijafragme.

Jednofazni postupak, naime, predviđa iskop sa samostvrđnjavajućom isplakom, koja teško može zadržati dovoljnu viskoznost tijekom iskopu elemenata, koji može trajati i do 3 dana, a da bi nakon stvrđnjavanja zadovoljila zahtjeve kvalitete iz projekta.

Sva prethodna laboratorijska ispitivanja kvalitete komponentnih materijala i određivanje optimalnog sastava plastičnog betona dijafagne provedena su od strane "Geoexperta-IGM" Zagreb, uz stručnu pomoć i suradnju predstavnika "Bauer Spezialtiefbau". U okviru prethodnih ispitivanja izvršena su ispitivanja slijedećih komponentnih materijala: cementa PC 30x 45 S "Dalmacijacement", drobljenog agregata i kamenog brašna iz kamenoloma "Srinjine", betonita "Bernoplast" od proizvođača "Ina-Petrokemija" Kutina, te uzoraka vode iz rijeke Cetine.

Svi ispitani komponentni materijali bili su pogodni za izradu plastičnog betona.

Za izradu isplake, odabrana je 11,1 %-tna betonitna suspenzija, sa težinskim omjerom miješanja bentonita i vode 1:8.

Prethodna ispitivanja plastičnog betona dala su optimalan odnos pojedinih komponentnih materijala. U tu svrhu ispitane su mješavine s različitim doziranjem cementa, bentonita i agregata. Na sedam različitih mješavina ispitana je konzistencija svježe mase, te tlačna čvrstoća nakon 7 i 28 dana, volumenska masa, modul elastičnosti, vodonepropusnost i erodibilnost, sl. 5.

tema	1	2	3	4	5	6	7
tema 1: introducere							
1.1.1.1.1.1.1	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.2	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.3	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.4	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.5	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.6	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.7	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.8	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.9	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.10	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.11	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.12	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.13	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.14	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.15	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.16	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.17	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.18	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.19	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.20	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.21	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.22	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.23	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.24	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.25	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.26	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.27	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.28	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.29	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.30	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.31	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.32	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.33	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.34	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.35	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.36	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.37	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.38	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.39	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.40	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.41	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.42	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.43	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.44	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.45	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.46	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.47	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.48	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.49	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.50	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.51	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.52	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.53	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.54	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.55	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.56	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.57	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.58	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.59	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.60	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.61	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.62	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.63	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.64	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.65	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.66	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.67	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.68	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.69	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.70	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.71	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.72	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.73	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.74	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.75	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.76	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.77	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.78	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.79	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.80	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.81	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.82	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.83	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.84	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.85	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.86	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.87	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.88	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.89	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.90	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.91	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.92	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.93	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.94	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.95	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.96	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.97	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.98	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.99	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.100	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.101	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.102	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.103	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.104	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.105	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.106	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.107	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.108	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.109	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.110	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.111	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.112	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.113	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.114	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.115	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.116	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.117	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.118	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.119	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.120	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.121	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.122	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.123	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.124	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.125	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.126	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.127	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.128	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.129	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.130	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.131	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.132	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.133	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.134	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.135	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.136	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.137	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.138	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.139	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.140	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.141	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.142	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.143	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.144	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.145	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.146	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.147	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.148	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.149	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.150	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.151	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.152	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.153	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.154	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.155	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.156	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1.1.1.157	10	100	100	100	100	100	100
1.1.1.1							

Slika 5. Tabelarni pregled receptura i rezultata ispitivanja

Na temelju ispitivanja svježe i očvršle smjese, odabrana je slijedeća receptura 1 m³ plastičnog betona, receptura br. 2 iz tabelarnog pregleda:

cement	112 kg
bentonit	35,6 kg
kameno brašno	102 kg
agregat 0-4 (mm)	1527 kg
voda	337 l
vodocementni faktor	3,01
konzistencija svježe mase rasprostiranjem	52-60 cm

Kod izrade smjese na gradilištu potrebno je korigirati doziranje komponenti, prilagođavajući se karakteristikama materijala i vremenskim uvjetima.

ORGANIZACIJA GRADILIŠTA

Glavnina proizvodnih pogona za proizvodnju isplake i plastičnog betona locirana je na platou na koti 358,0, uzvodno od osi brane na desnom boku. Tu je montirano postrojenje za proizvodnju isplake, sa skladištem bentonita, postrojenje za pročišćavanje isplake sa bazenima za svjež, radnu i otpadnu isplaku, te pumpa za transport isplake do mjesta iskopa.

U postrojenju za izradu isplake miješala se i bentonitna suspenzija za plastični beton, odakle se cjevovodom vodila do agitatora, a odatle u betonaru. Plastični beton za dijafragmu spravljan je u betonari kapaciteta 60 m³/h, poduzeća "Konstruktor" Split.

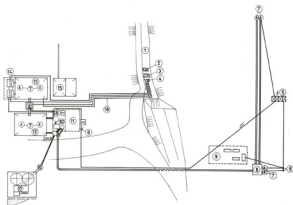
Pogoni za proizvodnju i pročišćavanje isplake povezani su cjevovodima za transport isplake, postavljenim po brani do mjesta iskopa, odnosno betoniranja dijafragme, koji su sa napredovanjem radova produžavani.

Na mjestu iskopa za dijafragmu radili su hidraulički rezač, grabilica i dizalica-gusjeničar. Materijal iskopan grabilicom u prediskopu transportiran je kamionima na privremenu deponiju na desnoj obali, isto kao i kruti materijal iz procesa pročišćavanja radne isplake.

Voda za proizvodnju isplake i betona zahvaćena je pumpama u koritu Cetine nizvodno od strejanice do rezervoara, te odatle do proizvodnih pogona.

Opskrba električnom energijom omogućena je sa glavnog transformatora gradilišta, sl. 6.

Napredovanje radova na dijafragmi bilo je sa desnog prema lijevom kraju brane.



Slika 6. Organizacija gradilišta

LEGENDA

- | | |
|--------------------------------|---|
| 1. RADNI PLATO NA BRANI | 10. POSTROJENJE ZA IZRADU ISPLAKE |
| 2. GRABILICA C-50 | 11. SKLADIŠTE BENTONITA |
| 3. HIDRAULIČKI REZAČ BG-30 | 12. BAZEN ZA SVJEŽU ISPLAKU |
| 4. DIZALICA BS-108 | 13. BAZEN ZA RADNU ISPLAKU |
| 5. GLAVNA TRAFOSTANICA 630 kVA | 14. POSTROJENJE ZA PROČIŠĆAVANJE ISPLAKE |
| 6. ELEKTRIČNI ORMARIĆ | 15. BAZEN ZA OTPADNU ISPLAKU S ODVODOM |
| 7. PUMPE I VODOOPSKRBNI SUSTAV | 16. AGITATOR ZA BENTONITNU SUSPENZIJU |
| 8. REZERVOAR ZA VODU | 17. BETONARA KAPACITETA 60 M3 BETONA NA SAT |
| 9. UPRAVA GRADILIŠTA | 18. CJEVOVODI ZA TRANSPORT ISPLAKE |

ISKOP ZA DIJAFRAGMU

Strojevi za iskop

Za radove na iskopu dijafragme korištene su dvije vrste strojeva: grabilica sa krutom šipkom i hidraulički rezač.

Grabilica s krutom šipkom KRC2 na gusjeničaru C-50 korištena je isključivo za prediskop elemenata dijafragme do dubine od 3-4 m, iznimno do 10 m, kako bi se stvorio prostor za cirkulaciju isplake prilikom iskopa hidrauličkim rezačem i dubina potrebna za uranjanje centrifugalne pumpe rezača za odstranjivanje iskopanog materijala. Grablicom se nije kopalo dublje zbog nemogućnosti održavanja i kontrole vertikalnosti iskopa u većim dubinama.

Glavnina iskopa se dakle vršila pomoću hidrauličkog rezača BC 30 na gusjeničaru HS 870, sa sistemom vitla za kabele i cjevovod, HDS 80, proizvođač "Bauer", foto 1. Njegovi osnovni dijelovi su kran-gusjeničar i rezač (kopač).

Kran-gusjeničar posebno je konstruiran za opsluživanje rezača, sa vlastitim hidrauličkim diesel motorom snage 430 kW. Kran je postavljen tako, da se kreće paralelno sa rovom za dijafragmu, sl. 7.

Rezač se sastoji od teškog čeličnog okvira visine 15,4 m, dužine 2,8 m i širine do 2,4 m, dva hidraulička motora koji pokreću dva kotača sa zubima, glodalice, te centrifugalne pumpe sa cjevovodom za odstranjivanje iskopanog materijala. Rezač je težak 32 tone. Hidraulički motori okreću kotače rezača u suprotnim smjerovima, koji kopaju i rahle materijal, te ga miješaju sa bentonitnom isplakom koja se nalazi u rovu. Centrifugalna pumpa usisava mješavinu isplake i iskopanog materijala, te ga cjevovodom transportira u pogon za pročišćavanje isplake, sl. 8.

Učinak rezača ovisi o njegovoj snazi koja proizlazi iz njegove težine (sila potiska) i momenta okretanja kotača, 2x81 kNm. Ove komponente su međuovisne, pa ako je njihov kvocijent H/V (H-horizontalna; V-vertikalna komponenta) velik, kotači će se okretati, ali neće prodirati dublje. U slučaju niskog kvocijenta H/V zubi kotača će se zabiti u stijenu, tlo, ali se neće pomicati, sl. 9. Rezač BC-30 postiže optimalno djelovanje, kontrolirajući odnos H/V na vrlo osjetljiv način.

Rezač može mrviti materijal stijene do veličine od 30-40 mm. Posebni uređaji sa dinamičkim efektima potrebni su da bi slomili stijenu u komadiće dovoljno male da prođu kroz usni otvor pumpe. Zbog toga se brzina rotacije kotača može povećati do 45 okretaja u minuti. Specijalni elastični amortizeri ugrađeni su u kotače da bi zaštitili zube od oštećenja.

LEGENDA

- 1 KRAN
- 2 REZAČ
- 3 VITLA S
KABELIMA I CJEVIMA

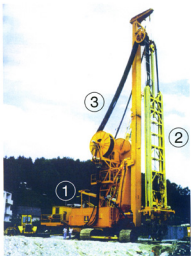
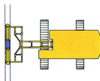


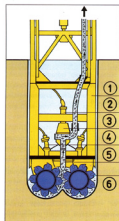
Foto 7. Hidraulički rezač BC-30

Da ne bi dao iskopanog rova ostalo izbrazdano, upotrebljavaju se zubi koji su zakrenuti u stranu, tako da se dno rova kompletno uklanja, sl. 9.

Vertikalnost rova osiguravaju dva neovisna uređaja za vertikalno podešavanje: grubo podešavanje vrši se pomoću hidrauličkog vitla na osnovnom kranu, a fino podešavanje pomoću hidrauličkog pritiskog cilindra smještenog unutar rezača. Tako se opterećenje na zube rezača može precizno kontrolirati.



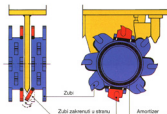
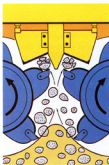
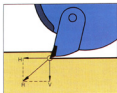
Slika 7. Položaj i kretanje rezača u toku iskopa



LEGENDA

- | | |
|---|---------------------|
| 1 | ČELIČNI OKVIR |
| 2 | HIDRAULIČNI MOTOR |
| 3 | CENTRIFUGALNA CRPKA |
| 4 | HIDRAULIČNI MOTORI |
| 5 | USISNI OTVOR |
| 6 | KOTAČI SA ZUBIMA |

Slika 8. Dijelovi rezača

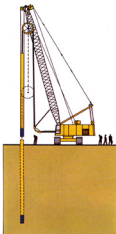


Slika 9. Detalj kotača s zubima

Da bi se postigla vertikalnost rova, rezač je ovješten na takav način, da ne stvara sile koje bi mogle utjecati na iskop rova. U tu svrhu služe automatski kontrolirani kabeli i cijevi, koji cijelo vrijeme održavaju vertikalnost rezultante svih sila koje djeluju na rezač. Osim toga, rezač je opremljen elektroničkim inklinometrima koji kontroliraju odstupanje rezača od vertikalne osi u dva okomita smjera do 0,2 %, sl. 10.

Slika 10.

Način vješanja rezača



Sustav za proizvodnja, transport i pročišćavanje isplake:

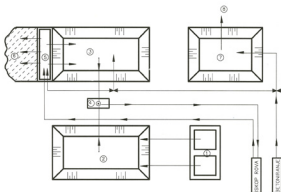
Betonitna isplaka ima dvostruku ulogu prilikom iskopa za dijafragmu. Prva joj je funkcija održavanje stabilnosti, odnosno onemogućavanje urušavanja materijala stijenski rova, te gubitka i zarobljavanja opreme i zastoja radova. Druga joj je funkcija hidraulički transport iskopanog i razmrvljenog materijala sa mjesta iskopa do postrojenja za odvajanje iskopanog materijala od isplake.

Sustav za proizvodnja, transport i pročišćavanje isplake prikazan je na slici 11.

Postrojenje za izradu isplake 1 sastoji se od dvije garniture za miješanje betonita i vode (BM 1000 i BM 3000) ukupnog kapaciteta mješalica 4.000 l. Odatle se spravljena isplaka

cijevima odvodi u bazen za svježu isplaku 2 opremljen sa pumpama, kako bi isplaka u bazenu cirkulirala. Iz bazena se svježa isplaka glavnom pumpom 4 transportira u rov u kojem se obavlja iskop za dijafragmu. Isplaka se iz rova, zasićena materijalom iz iskopa, glinom i komadićima stijena i betona, centrifugalnom pumpom na rezaču vraća cjevovodom do postrojenja za pročišćavanje isplake 5, tipa BE 500, kapaciteta prerade 500 m³/h. U postrojenju se odvaja kruti materijal iz iskopa 6 i odlaže privremeno uz uređaj, te kamionima odvodi dalje na gradilišni deponij, dok se pročišćena isplaka, obogaćena česticama gline iz iskopa, odvodi u bazen za radnu isplaku 3. Odatle se ponovo pumpa u cjevovod i transportira u iskopni rov. Radna isplaka se stalno obogaćuje svježom isplakom prepumpavanjem iz bazena 2, kako bi zadržala potrebna svojstva.

Prilikom betoniranja dijafragme, beton se prvo ugrađuje u dno rova, te se postupnim rastom visine betona, isplaka, koja se nalazi u rovu, istiskuje na površinu, odakle se pumpa kroz cjevovod natrag na pročišćavanje i u bazen 3. Nakon određenog broja ciklusa, isplaka gubi propisana svojstva, onečišćuje se glinenim česticama i sastojcima betona. Takva se isplaka nakon betoniranja transportira u bazen za otpadnu isplaku 7, odakle se odvodnom cijevi 8 odvodi iz sustava.

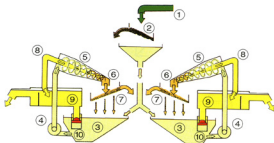


Slika 11. Sustav za proizvodnju, transport i pročišćavanje isplake

Postrojenje za pročišćavanje isplake, sl. 12 i foto 2, sastoji se od dvije identične jedinice, koje funkcioniraju kao jedinstvena cjelina.

Zasićena isplaka sa materijalom iz iskopa, glinom, komadićima stijene i betona, dolazi u dovodnu cijev **1** na vibrirajuće sito **2** koje odvaja krupne frakcije stijene veće od 5 mm i komade gline. Prosjkana isplaka odvaja se u dvije identične jedinice za pročišćavanje, kako bi se povećao kapacitet pročišćavanja. Isplaka dolazi u rezervoar **3** odakle je pumpa **4** odvodi u ciklon **5**, gdje se odvajaju fine čestice od isplake. One se kroz ispušnik ciklona **6** spuštaju na vibrirajuće sito **7**, koje ih odvaja od preostale isplake.

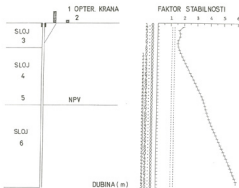
Pročišćena se isplaka iz ciklona odvodi preko preljeva **8** u rezervoar **9** i odatle u bazen za radnu isplaku. Automatski plovak **10** regulira nivo isplake u rezervoaru, tako da on bude stalan za vrijeme procesa pročišćavanja.



Sl. 12. Shema rada postrojenja



Foto 2. Postrojenje za pročišćavanje isplake BE 500
s bazenom za radnu isplaku



Slika 13. Faktori stabilnosti rova

PRILOG 7.5.

OBJEKT: BRANA PERUĆA-OLIMPIJANA

R E Z U L T A T I

ISPITIVANJA RADNE ISPLAKE (TISKON ILI/RT) PROJEKTOG DIZAJNA:

90% i više u kg BENTONITA

DATA ISPITIVANJA	q^0 PRIVLAČNOST BENTONITA	RELATIVNA VLAŽNOST	pH VODIKOV INDIKATOR	TEMPERATURA [°C]	GUSTOĆA [kg/m ³]	VEŠTOČIT DO VLAŽNOSTI [g + 100,0]	POSLA POSLA [g]	POSLA POSLA [kg/m ²]
30.11.09.	3=012	25 ⁰⁰	12,1	20,1	1,0498	29,9	1,3	12,44
30.11.09.	3=012	25 ⁰⁰	12,2	20,2	1,0498	30,0	1,6	12,59
1.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	11,2	9,5	1,0505	20,05	0,25	9,71
1.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	11,3	9,8	1,0508	21,55	0,5	12,40
1.12.09.	3=017	10 ⁰⁰	10,3	12,0	1,0509	31,22	0,25	12,31
2.12.09.	3=017	10 ⁰⁰	10,5	11,8	1,0512	32,08	0,5	12,29
3.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	10,3	10,3	1,0503	31,5	1,0	12,2
4.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	11,7	7,8	1,0502	34,25	0,5	12,40
4.12.09.	3=014	3 ⁰⁰	11,8	7,7	1,0507	36,2	0,5	12,39
4.12.09.	3=011	10 ⁰⁰	8,3	13,8	1,0506	29,8	0,25	12,43
7.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	8,7	13,5	1,0508	31,75	0,5	12,51
7.12.09.	3=015	10 ⁰⁰	8,8	13,1	1,0507	32,02	0,5	12,42
7.12.09.	3=015	10 ⁰⁰	8,5	13,0	1,0505	36,87	0,5	12,44
8.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	10,1	13,3	1,0502	31,50	0,5	12,51
8.12.09.	3=011	25 ⁰⁰	12,4	11,0	1,0501	30,2	0,25	12,50
9.12.09.	3=010	20 ⁰⁰	10,6	11,2	1,0508	30,72	0,5	12,51
9.12.09.	3=010	25 ⁰⁰	10,5	12,8	1,0501	32,35	1,0	12,72
12.12.09.	3=015	10 ⁰⁰	11,7	12,6	1,0507	31,55	0,25	12,50
13.12.09.	3=015	10 ⁰⁰	11,7	12,2	1,0505	30,97	0,5	12,50
13.12.09.	3=017	10 ⁰⁰	11,7	12,0	1,0501	31,4	0,25	12,50
13.12.09.	3=017	10 ⁰⁰	11,6	11,8	1,0509	31,58	0,5	12,50
14.12.09.	3=018	25 ⁰⁰	11,6	10,3	1,0501	31,69	0,5	12,50

Slika 14. Rezultati ispitivanja radne isplake

Stabilnost iskopa i kontrola kvalitete isplake

Izvođač radova na iskopa za dijafragmu imao je obvezu garantirati stabilnost stijeni iskopanog rova, kako bi dijafragma bila izvedena sa projektiranim geometrijskim karakteristikama i kako ne bi došlo do urušavanja iskopanog rova, a time se ugrozila oprema i rok završetka radova. U Tehnološkom projektu za izvedbu dijafragme Izvođač je računski dokazao stabilnost iskopa i predložio sastav zaštitne isplake, kao i način dokazivanja propisane kvalitete isplake.

Račun stabilnosti je pomoću kompjuterskog programa izveden za maksimalnu dužinu iskopanog rova od 7,5 m i za maksimalnu dubinu rova od 50 m.

Faktor stabilnosti stranica rova određen je odnosom između hidrostatskog pritiska isplake i pritiska tla uvećanog za pokretno opterećenje uzrokovano radom hidrauličkog rezača.

Faktor stabilnosti je proračunat za svaki metar dubine do dna rova, a rezultati pokazuju da je u svim slojevima faktor veći od zahtjevanog, 1,10, sl. 13.

Iz slike je vidljivo da je minimalni faktor stabilnosti na dubini od 6,0 metara od vrha rova, gdje iznosi 1,541, a maksimalni na dnu rova, 6,098.

Na prijedlog Izvođača radova, odabrana je slijedeća mješavina isplake:

bentonit		.40 kg
voda		985 l
gustoća isplake		$\rho = 1,05 \text{ g/cm}^3$

U toku izvođenja radova kontinuirano je kontrolirana kvaliteta isplake prilikom iskopa i neposredno prije betoniranja dijafragme, kako bi se izmjenom radne isplake održavala propisna svojstva. Kontrola je obuhvatila laboratorijska ispitivanja temperature isplake, gustoće, pH vrijednosti, viskoziteta po Marshu, granice točenja i sadržaja pijeska (%), sl. 14.

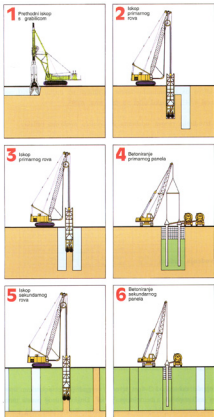
Postupak izvođenja radova

Prva faza u toku izvođenja radova na dijafragmi bila je izrada radnog platoa s kojeg se obavlja iskop rezačem. Plato širine 10-12 m izveden je od nabijenog kamenog materijala debljine 40 cm iznad glinene jezgre brane zaštićene geotekstilom.

Sa platoa je izveden i iskop uvodnog kanala i betoniranje uvodnice. Uvodni kanal ima funkciju vodilice za rezač kojim se obavlja iskop po trasi dijafragme i služi kao kanal za cirkulaciju radne isplake. Uvodnice su izvedene od armiranog betona visine 1,25 m i debljine 0,25 m, te su imale i funkciju stabiliziranja otvorenog rova na njegova vrhu.

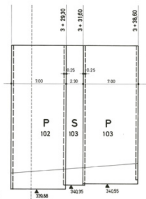
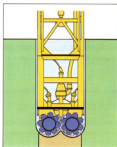
Postupak izvođenja radova prikazan je na slici 15.

Prethodni iskop do dubine od 3-4 m izvodio se grabilicom sa krutom šipkom. Osnovni element iskopa je "kampada", a betoniranja "panel". Dužina jednog panela može se sastojati od jedne ili više kampada. Odabrana je maksimalna dužina primarnog panela od 7,0 m iz razloga stabilnosti rova, te zbog najmanjeg mogućeg broja spojeva panela, što je u funkciji vododrživosti dijafragme.



Slika 15. Postupak izvođenja dijafragme

Slika 16. Izvedba sekundarnog panela kao spoja panela



Slika 17.
Dužine primarnih i sekundarnih panela sa zasjecanjem

Panel : 0242		Time 07:49		Datum 04.11.98	
Depth at Startpoint :	1			1,2 m	
Depth at Endpoint :	1			59,9 m	
Total Millingtime :	1			4:00 h	
Total Regeneration Time :	1			0:12 h	
Z	Depth	X-Deviation	Y-Deviation	Millingtime	Flaps
Z	(m)	(mm)	(mm)	(sec)	(N°)
1	0	1	1	0	1
2	1	1	1	1	1
3	2	1	1	1	1
4	3	1	1	1	1
5	4	1	1	1	1
6	5	1	1	1	1
7	6	1	1	1	1
8	7	1	1	1	1
9	8	1	1	1	1
10	9	1	1	1	1
11	10	1	1	1	1
12	11	1	1	1	1
13	12	1	1	1	1
14	13	1	1	1	1
15	14	1	1	1	1
16	15	1	1	1	1
17	16	1	1	1	1
18	17	1	1	1	1
19	18	1	1	1	1
20	19	1	1	1	1
21	20	1	1	1	1
22	21	1	1	1	1
23	22	1	1	1	1
24	23	1	1	1	1
25	24	1	1	1	1
26	25	1	1	1	1
27	26	1	1	1	1
28	27	1	1	1	1
29	28	1	1	1	1
30	29	1	1	1	1
31	30	1	1	1	1
32	31	1	1	1	1
33	32	1	1	1	1
34	33	1	1	1	1
35	34	1	1	1	1
36	35	1	1	1	1
37	36	1	1	1	1
38	37	1	1	1	1
39	38	1	1	1	1
40	39	1	1	1	1
41	40	1	1	1	1
42	41	1	1	1	1
43	42	1	1	1	1
44	43	1	1	1	1
45	44	1	1	1	1
46	45	1	1	1	1
47	46	1	1	1	1
48	47	1	1	1	1
49	48	1	1	1	1
50	49	1	1	1	1
51	50	1	1	1	1
52	51	1	1	1	1
53	52	1	1	1	1
54	53	1	1	1	1
55	54	1	1	1	1
56	55	1	1	1	1
57	56	1	1	1	1
58	57	1	1	1	1
59	58	1	1	1	1
60	59	1	1	1	1
61	60	1	1	1	1
62	61	1	1	1	1
63	62	1	1	1	1
64	63	1	1	1	1
65	64	1	1	1	1
66	65	1	1	1	1
67	66	1	1	1	1
68	67	1	1	1	1
69	68	1	1	1	1
70	69	1	1	1	1
71	70	1	1	1	1
72	71	1	1	1	1
73	72	1	1	1	1
74	73	1	1	1	1
75	74	1	1	1	1
76	75	1	1	1	1
77	76	1	1	1	1
78	77	1	1	1	1
79	78	1	1	1	1
80	79	1	1	1	1
81	80	1	1	1	1
82	81	1	1	1	1
83	82	1	1	1	1
84	83	1	1	1	1
85	84	1	1	1	1
86	85	1	1	1	1
87	86	1	1	1	1
88	87	1	1	1	1
89	88	1	1	1	1
90	89	1	1	1	1
91	90	1	1	1	1
92	91	1	1	1	1
93	92	1	1	1	1
94	93	1	1	1	1
95	94	1	1	1	1
96	95	1	1	1	1
97	96	1	1	1	1
98	97	1	1	1	1
99	98	1	1	1	1
100	99	1	1	1	1
101	100	1	1	1	1
102	101	1	1	1	1
103	102	1	1	1	1
104	103	1	1	1	1
105	104	1	1	1	1
106	105	1	1	1	1
107	106	1	1	1	1
108	107	1	1	1	1
109	108	1	1	1	1
110	109	1	1	1	1
111	110	1	1	1	1
112	111	1	1	1	1
113	112	1	1	1	1
114	113	1	1	1	1
115	114	1	1	1	1
116	115	1	1	1	1
117	116	1	1	1	1
118	117	1	1	1	1
119	118	1	1	1	1
120	119	1	1	1	1
121	120	1	1	1	1
122	121	1	1	1	1
123	122	1	1	1	1
124	123	1	1	1	1
125	124	1	1	1	1
126	125	1	1	1	1
127	126	1	1	1	1
128	127	1	1	1	1
129	128	1	1	1	1
130	129	1	1	1	1
131	130	1	1	1	1
132	131	1	1	1	1
133	132	1	1	1	1
134	133	1	1	1	1
135	134	1	1	1	1
136	135	1	1	1	1
137	136	1	1	1	1
138	137	1	1	1	1
139	138	1	1	1	1
140	139	1	1	1	1
141	140	1	1	1	1
142	141	1	1	1	1
143	142	1	1	1	1
144	143	1	1	1	1
145	144	1	1	1	1
146	145	1	1	1	1
147	146	1	1	1	1
148	147	1	1	1	1
149	148	1	1	1	1
150	149	1	1	1	1
151	150	1	1	1	1
152	151	1	1	1	1
153	152	1	1	1	1
154	153	1	1	1	1
155	154	1	1	1	1
156	155	1	1	1	1
157	156	1	1	1	1
158	157	1	1	1	1
159	158	1	1	1	1
160	159	1	1	1	1
161	160	1	1	1	1
162	161	1	1	1	1
163	162	1	1	1	1
164	163	1	1	1	1
165	164	1	1	1	1
166	165	1	1	1	1
167	166	1	1	1	1
168	167	1	1	1	1
169	168	1	1	1	1
170	169	1	1	1	1
171	170	1	1	1	1
172	171	1	1	1	1
173	172	1	1	1	1
174	173	1	1	1	1
175	174	1	1	1	1
176	175	1	1	1	1
177	176	1	1	1	1
178	177	1	1	1	1
179	178	1	1	1	1
180	179	1	1	1	1
181	180	1	1	1	1
182	181	1	1	1	1
183	182	1	1	1	1
184	183	1	1	1	1
185	184	1	1	1	1
186	185	1	1	1	1
187	186	1	1	1	1
188	187	1	1	1	1
189	188	1	1	1	1
190	189	1	1	1	1
191	190	1	1	1	1
192	191	1	1	1	1
193	192	1	1	1	1
194	193	1	1	1	1
195	194	1	1	1	1
196	195	1	1	1	1
197	196	1	1	1	1
198	197	1	1	1	1
199	198	1	1	1	1
200	199	1	1	1	1
201	200	1	1	1	1
202	201	1	1	1	1
203	202	1	1	1	1
204	203	1	1	1	1
205	204	1	1	1	1
206	205	1	1	1	1
207	206	1	1	1	1
208	207	1	1	1	1
209	208	1	1	1	1
210	209	1	1	1	1
211	210	1	1	1	1
212	211	1	1	1	1
213	212	1	1	1	1
214	213	1	1	1	1
215	214	1	1	1	1
216	215	1	1	1	1
217	216	1	1	1	1
218	217	1	1	1	1
219	218	1	1	1	1
220	219	1	1	1	1
221	220	1	1	1	1
222	221	1	1	1	1
223	222	1	1	1	1
224	223	1	1	1	1
225	224	1	1	1	1
226	225	1	1	1	1
227	226	1	1	1	1
228	227	1	1	1	1
229	228	1	1	1	1
230	229	1	1	1	1
231	230	1	1	1	1
232	231	1	1	1	1
233	232	1	1	1	1
234	233	1	1	1	1
235	234	1	1	1	1
236	235	1	1	1	1
237	236	1	1	1	1
238	237	1	1	1	1
239	238	1	1	1	1
240	239	1	1	1	1
241	240	1	1	1	1
242	241	1	1	1	1
243	242	1	1	1	1
244	243	1	1	1	1
245	244	1	1	1	1
246	245	1	1	1	1
247	246	1	1	1	1
248	247	1	1	1	1
249	248	1	1	1	1
250	249	1	1	1	1
251	250	1	1	1	1
252	251	1	1	1	1
253	252	1	1	1	1
254	253	1	1	1	1
255	254	1	1	1	1
256	255	1	1	1	1
257	256	1	1	1	1
258	257	1	1	1	1
259	258	1	1	1	1
260	259	1	1	1	1
261	260	1	1	1	1
262	261	1	1	1	1
263	262	1	1	1	1
264	263	1	1	1	1
265	264	1	1	1	1
266	265	1	1	1	1
267	266	1	1	1	1
268	267	1	1	1	1
269	268	1	1	1	1

To je omogućio digitalni sustav sa inklinometrima na samom rezaču, koji je pokazivao odstupanja od obje osi u toku iskopa, kao i stvarnu dubinu iskopa. Nakon završetka iskopa svake kampade pojedinog panela, izlistan je kompjuterski zapis (printing) sa svim relevantnim podacima u toku iskopa: vrijeme početka iskopa, dubina na početku i na kraju iskopa u (m), ukupno vrijeme trajanja iskopa, vrijeme regeneracije isplake, odklon od vertikale u x i y smjera (cm) za svaki metar dubine, te vrijeme iskopa u (min) za svaki metar dubine, sl. 18.

Na osnovi ovih zapisa, verificirana je stvarna dubina svakog iskopanog panela, prije odobrenja za njegovo betoniranje.

Nakon završenog iskopa, centrifugalna pumpa na rezaču, koji se nalazio na dnu rova, ispumavala bi radnu isplaku sa dna, a ona bi se zamijenila svježom isplakom. Na taj se način ispunjavao uvjet da dno rova treba biti čisto prije početka betoniranja, t.j. da na njemu nema taloga iz isplake korištene u toku iskopa. U svrhu kontrole čistoće temeljne spojnice, prije betoniranja panela uzimao se uzorak pročišćene isplake sa dna rova i kontrolirao sadržaj krutog materijala, pijeska, u isplaci. Granična dozvoljena količina bila je 7 %, a najviša zabilježena količina iznosila je 3 %.

BETONIRANJE DIJAFRAGME

Prethodnim ispitivanjima određen je sastav plastičnog betona dijafragme (glinobetona), kao i konzistencija svježeg betona primjerena načinu transporta i tehnologiji ugradnje.

Imajući u vidu da se betoniranje jednog panela dijafragme vrši kontinuirano i da nisu dozvoljeni prekidi betoniranja, beton se pripremao u betonari lociranoj u neposrednoj blizini mjesta ugradnje. Transport betona do mjesta ugradnje obavljao se auto-mikserima kapaciteta 6 m³.

Betoniranje dijafragme bio je najdelikatniji dio radova na dijafragmi, s obzirom na to, da svaka pogreška može izazvati velika oštećenja objekta i ugroziti njegovu osnovnu funkciju, vododrživost.

Na izvođenju dijafragme primijenjena je tehnologija podvodnog betoniranja pomoću kontraktor cijevi. Osnovna karakteristika ovog načina je sposobnost kompaktiranja betona vlastitom težinom, a ne vibriranjem.

Radi toga beton, pored mehaničkih svojstava propisanih projektom, mora biti fluidan, imati sposobnost istjecanja i zbijanja vlastitom težinom, otporan na segregaciju i ispiranje, te polagano vezati. Fluidnost mora biti dovoljna da beton može zapuniti sve šupljine za

vrijeme uzdizanja pod djelovanjem pritiska do kojeg dolazi zbog razlike nivoa u kontraktor cijevi i u rovu. Prevelika količina vode u betonu dovodi do segregacije cementne suspenzije i agregata, odnosno ispiranja, a segregacija uzrokuje gnijezda u tijelu dijafragme, posljedica koje je porozni beton, osjetljiv na tokove vode. Betoniranje kontraktor cijevima zahtijeva sporije vezivanje betona, zbog mogućih smetnji i zastoja u procesa betoniranja.

Kontraktor cijev upravo ima zadatak da spriječi ispiranje, segregaciju i onečišćavanje betona, vodeći ga do dna iskopanog panela i održavajući kontinuiranu dobavu novog u masu već ugrađenog betona.

Kontraktor cijev je iznutra glatka, debljine stijenke od 8 mm, opskrbljena efikasnim priborom za brzu montažu i demontažu segmenata od kojih je sastavljena. Dužina segmenata cijevi je 4 m. Na vrhu cijevi je lijevak u formi krnjeg stošca u koji se ubacuje beton direktno iz miksera tako, da je visina slobodnog pada betona manja od 2,0 m. Ugradnja betona u iskopani panel treba se obaviti u što kraćem vremenu nakon završetka iskopa da ne dođe do urušavanja materijala stijenci rova. Prije početka betoniranja dno rova treba biti očišćeno regeneracijom radne isplake.

Kontraktor cijev se prije betoniranja spušta na dno iskopanog rova. Za betoniranje primarnih panela koristile su se dvije cijevi, a za sekundarne panele jedna cijev. Za pridržavanje cijevi u toku betoniranja, te za montažu i demontažu njenih segmenata koristio se kran-gusjeničar BS 108 B, foto 3.



Foto 3. Betoniranje panela

Ukoliko cijev ne stoji na dnu rova, može doći do ispiranja i onečišćavanja isplakom prvih količina ugrađenog betona, koje se tijekom betoniranja ne podižu u cjelosti do površine panela, te dijelom prekrivaju dno i bočne zidove rova. Takvim se betonom ne mogu ostvariti kvalitetne plohe sa temeljnom stijenom i bočnim panelima, radi čega je neophodno potrebno prije betoniranja očistiti dno rova. Nakon početka betoniranja, beton istječe na donjem kraju cijevi, istiskuje isplaku iznad sebe i podiže se u rovu. Kompaktira se vlastitom težinom. Ako se prekine dotjecanje betona, uspostavlja se ravnoteža između betona u cijevi i rovu. Nivo betona u cijevi se stabilizira iznad onoga u rovu zbog trenja između betona i unutrašnje stijenske cijevi. Svako novo dodavanje betona u lijevak izaziva novo podizanje u rovu.

Napredovanjem betoniranja razlika se nivoa betona u cijevi i panelu povećava zbog povećanja trenja i dovodi do toga, da beton više ne može silaziti niz cijev. Tada se konstruktor cijev podiže do izvjesne visine, te se demontira jedan njen segment na vrhu, odmah ispod lijevka. Međutim obavezno je, da određena dužina cijevi, ne manja od 1,5 m, ostane u betonu, kako ne bi došlo do miješanja novog betona sa isplakom i onečišćenim slojem betona na vrhu. Postupak povremenog demontiranja segmenata ponavlja se sve dok beton ne zapuni rov do vrha.

Panel se betonira do 30-tak cm ispod vrha ulaznog kanala tako, da preostala visina ostane slobodna za cirkuliranje isplake.

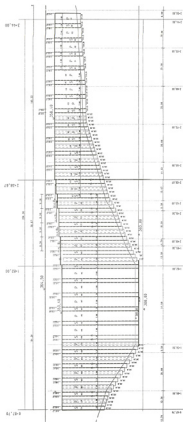
Da bi se izbjegle inkluzije isplake i urušenog materijala u betonu, treba paziti da dodavanje betona u cijev bude kontinuirano, odnosno da ne dolazi do pražnjenja kontaktora cijevi u toku betoniranja, te da ne dolazi do prevelikog pomicanja i vađenja cijevi iz betona. Iz svih ovih razloga striktno je zabranjeno prekidanje betoniranja unutar jednog panela.

Kao što je naprijed navedeno, najprije se betoniraju primarni paneli, i to nekoliko u nizu, a zatim se, nakon iskopa, betoniraju sekundarni paneli između betoniranih primarnih. Na vrhu stupca betona u toku betoniranja podiže se sloj onečišćenog betona izmiješanog isplakom, koji završetkom betoniranja ostaje na vrhu u debljini od oko 30 cm.

Nakon što se završi sa betoniranjem dijafragme, taj se onečišćeni sloj u čitavoj dužini dijafragme skida pomoću rovokopača, te se ugrađuje novi beton sve do vrha ulaznog kanala.

TIJEK IZVOĐENJA DIJAFRAGME

Radovi za izgradnju vododržive dijafragme ugovoreni su 8. kolovoza 1994. g. sa zajedničkom hrvatsko-njemačkom tvrtkom (joint-venture) "Geotekhnika-Bauer" d.o.o., osnovanom upravo za rad na ovom objektu. Stručno osoblje i strojevi "Bauera" bili su



Slika 19. Podjela dijafraagne na primarne i sekundarne panele

zaduženi za radove na iskopu dijafragme, a oni "Geotehnike" na betoniranju. Ugovoreni rok završetka dijafragme bio je 1. veljače 1995 godine.

Odmah nakon ugovaranja počeli su pripremni radovi, te transport opreme na gradilište. Pripremni radovi na samom gradilištu počeli su 19. rujna 1994 godine: priprema platona, montaža betonare i proizvodnih pogona, te izrada bazena za isplaku.

Prvih desetak metara uvodnica betonirano je 30. rujna 1994 godine.

Prediskop grabilicom, kao i iskop hidrauličkim rezačem počeo je 10. listopada, **da bi 13. listopada bio izbetoniran prvi panel, P1, sta: 303,77-310,77.**

Radovi su počeli na desnom dijelu brane, na kojem je uklonjen njezin gornji dio do kote 358,00 m n.m. radi toga, što u to vrijeme nisu bili završni radovi na nasipavanju lijevog kraja brane do kote 353,00 m n.m. odnosno desnog do 358,00 m n.m.

Iskop dijafragme radi toga je napredovao je od sta: 310,77 prema lijevom kraju, kako bi se u međuvremenu nasuli krajevi brane do planiranih kota. Osim toga, ograničavajući faktori za napredovanje radova na dijafragmi bile su i činjenice, da se u isto vrijeme obavljao iskop i sanacija uruštene galerije na njenom najnižem dijelu i prema lijevom kraju, te da iz istog razloga, nije bilo vremena završiti vezno injektiranje oko obloge galerije. Kako se trasa dijafragme nalazila samo 4,0 m udaljena uzvodno od osi galerije, postojala je mogućnost, da nagli prodor isplake iz iskopanog rova za dijafragmu, kroz eventualne pukotine ili kaverne u glini, ugrozi radnike u galeriji.

Ta mogućnost je umanjena konsolidacijskim injektiranjem uzduž trase dijafragme, u toku kojega nisu nabuđene veće pukotine ili kaverne.

Međutim, prilikom iskopa panela P-7, sta: 247,97-254,97, za vrijeme iskopa druge bočne kampade u stijeni, došlo je do izbijanja isplake u kontrolnoj galeriji na dijelu, gdje je raspucana primarna betonska obloga sanirana mlaznim betonom. Uslijed naglog smanjenja nivoa isplake u rovu, došlo je i do manjeg odronjavanja stijenki rova neposredno ispod uvodnica. Kako su bočne kampade panela praktično već bile iskopane, odlučeno je da se panel betonira, a srednja, neiskopana kampada da se iskopa naknadno i betonira kao sekundarni panel.

Izbijanje isplake u kontrolnoj galeriji ponovilo se i kod iskopa panela P-6, te dvaju panela na desnom kraju brane. Kako su okolnosti pri gubitku isplake uvijek bile iste, izbijanje u galeriju djelovalo se za vrijeme iskopa u stijeni, te na dijelovima galerije sanirane mlaznim betonom preko stare obloge, došlo se do zaključka, da isplaka iz rova prolazi kroz spojnici stijene i glinene jezgre, te se procjeđuje u galeriju kroz pukotine na staroj betonskoj oblozi galerije nastale uslijed eksplozije. Spojnica stijene i glinene jezgre vjerojatno je bila oštećena eksplozijom, ali i dinamičkim udarima rezača za vrijeme iskopa u stijeni, uslijed kojih su se ponovno otvorile i pukotine u betonu galerije.

Iz svih ovih razloga hitno se počelo sa veznim injektiranjem betonske obloge galerije na dijelu ispred samog iskopa za dijafragmu, kako bi se zapunile šupljine između jezgre i obloge. Nakon izvršenog veznog injektiranja, nije više zabilježeno istjecanje isplake u galeriju.

U međuvremenu je završeno nasipanje desnog kraja brane, pa je na tom dijelu brane izvedena dijafragma, a nastavljeno je napredovanje prema lijevom kraju brane.

Krajem studenog 1994 godine uspješno je završena sanacija kontrolne galerije, a zatim i nasipavanje lijevog kraja brane do kote 353,00 m n.m., pa su stvoreni uvjeti za završetak dijafragme na lijevom kraju brane.

Posljednji metri uvođnica završeni su 16. prosinca 1994 godine, te je počelo izvođenje dijafragme na novom nasutom dijelu brane na lijevom kraju. Kako se iskop za dijafragmu u prvih nekoliko metara obavljao kroz novonasuti sloj uzvodnog filtra, došlo je prilikom iskopa panela P-24 do gubitka isplake kroz filter. Iskop te kampade je završen uz stalno dodavanje isplake u rov, te je betonirana kao skraćeni primarni panel, dužine 2,8 m.

Uz nekoliko manjih kvarova na hidrauličkom rezaču, iskop za dijafragmu završen je 10. siječnja 1995 godine, kada je i betoniran posljednji panel. Čišćenje vrha dijafragme i betoniranje do vrha uvođnice završeno je 12. siječnja 1995 godine. Time je ugovoreni rok za završetak radova skraćen za gotovo mjesec dana.

Za ispitivanje mehaničkih karakteristika plastičnog betona dijafragme u toku izvođenja radova, Izvoditelj je angažirao IGH-Split za sljedeća ispitivanja:

- tlačna čvrstoća: na svakih 25 m³ glinobetona dijafragme uzimao se jedan probni valjak; od tih uzoraka 20 % se ispitalo na 7-dnevnu čvrstoću, 75 % na 28-dnevnu, a 5 % na 90-dnevnu tlačnu čvrstoću.
- konzistencija rasprostiranjem u toku svakog betoniranja panela,
- vodonepropusnost: na svakih 50 m³ glinobetona jedan uzorak.

"Geosexpert-IGM" Zagreb bio angažiran je na ispitivanju erodibilnosti (pin-hole test). Na svakih 50 m³ glinobetona uziman je jedan uzorak.

Investitor je za kontrolna ispitivanja kvalitete glinobetona dijafragme angažirao Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Odjel za materijale. Kontrolna ispitivanja obavljena su u obimu od otprilike 10 % količine tekućih ispitivanja glinobetona, koje je obavljao Izvoditelj radova.

Rezultati ispitivanja kvalitete glinobetona dijafragme obrađeni su kao zaseban članak u ovoj knjizi.



Foto 4.
Iskop dijafragme
hidrauličkim rezačem



Foto 5.
Kotači sa zubima
hidrauličkog rezača

OSNOVNI PODACI IZVOĐENJA DIJAFRAGME

Dijafragma je izvedena kao niz od 28 primarnih i 28 sekundarnih panela, sl. 19. Izvedena je u dužini od 261,15 metara i to od sta: 86,82 do 347,97, (stacionaže po osi dijafragme). Projektirana dužina data je po osi brane.

Najveća joj je dubina 51,5 m, na srednjem dijelu, a najmanja 12,9 m na desnom kraju. Na čitavoj dužini ukopana je oko 2,5 m u stijenu, odnosno beton, a na mjestima gdje je temeljna stijena strma, i do 4 m.

Najvažniji brojevi pokazatelji izvedene dijafragme su sljedeći:

- ukupna površina dijafragme	8.505 m ²
- količina iskopa za dijafragmu, uključujući iskop spojnice debljine 25 cm između panela	9.282 m ³
- količina plastičnog betona dijafragme	9.335 m ³
- količina betona uvođenica	172 m ³
- količina plastičnog betona vrha dijafragme	265 m ³

Izvoditelj radova je, osim dnevnika radova, dostavljao i dnevne izvještaje o iskopa i betoniranju panela. Ove "osobne karte" svakog panela sadržavale su oznake i stacionaže kampada, početak i završetak iskopa, dužinu i dubinu iskopa, zastoje u toku iskopa i betoniranja, početak i završetak betoniranja, volumen iskopanog rova i ugrađenog betona, te eventualne ekscese u toku rada, gubici isplake, kvarovi i sl.

Analizom tih izvještaja mogli su se odrediti učinci stroja za iskop dijafragme u glini i stijeni, odnosno betonu, na različitim dubinama iskopa i različitim vrstama iskopa, primarni i sekundarni paneli.

Prosječni ostvareni učinci iskopa u postojećoj glinenoj jezgri:

- bočne kampade primarnih panela, l=2,8 m	22,5 m ³ /h
- srednje kampade primarnih panela, l=1,4 m	22,0 m ³ /h
- sekundarni paneli, l=2,8 m	29,6 m ³ /h

Prosječni učinci iskopa u novonasutoj glini:

- bočne kampade primarnih panela, l=2,8 m	36,2 m ³ /h
- srednje kampade primarnih panela, l=1,4 m	24,3 m ³ /h
- sekundarni paneli l=2,8 m	44,8 m ³ /h

Prosječni učinci iskopa u stijeni odnosno betonu:

- bočne kampade primarnih panela, $l=2,8$ 6,5 m³/h
- srednje kampade primarnih panela, $l=1,4$ m 5,3 m³/h
- sekundarnih panela $l=2,8$ m 7,9 m³/h

Trajanje iskopa u glini i stijeni mijenja se sa dubinom, tako da pri vrhu rova po metru dubine iznosi svega nekoliko minuta, a na dubini od 48 m oko 20 min/m.

Uzevši u obzir ukupno vrijeme trajanja iskopa pojedinog primarnog i sekundarnog panela, ostvareni su slijedeći učinci:

- iskop primarnih panela 18 m³/h
- iskop sekundarnih panela 25 m³/h

Gledano kao učinak iskopa u toku jedne radne smjene (8 sati), dobivamo slijedeće rezultate:

- učinak iskopa postojeće gline po smjeni 176-237 m³
- učinak iskopa stijene po smjeni 42-63 m³



Foto 6. Vrh izvedene dijafragme na desnom kraju

Kad se vremenu trajanja iskopa doda još i vrijeme potrebno za premještanje, centriranje ili izvlačenje stroja s mjesta iskopa, prosječno vrijeme potrebno za iskop najvećih panela bilo je:

- primarni panel, dubine 51 m, volumena 350 m³ 3 smjene
- sekundarni panel, dubine 51 m, volumena 140 m³ 1 smjena

Učinci betoniranja panela ovisili su u prvom redu o kapacitetu betonare, koji je iznosio 60 m³/h, umanjenom za vrijeme potrebno za povremeno izvlačenje i skraćivanje kontraktor cijevi.

Prosječni učinak betoniranja panela iznosio je 36 m³/h, tako da je za betoniranje najvećih panela volumena od 370 m³, bila potrebna jedna produžena smjena odnosno 12 sati.

ZAKLJUČAK

Dijafragma od plastičnog betona izvedena je u glinenoj jezgri brane Peruća u dužini 261,15 m, što predstavlja oko 59% ukupne dužine brane. Sastoji se od 28 primarnih panela dužine 7,0 m i 28 sekundarnih panela dužine 2,8 m. Dubina dijafragme varira od 12,9 m na desnom kraju do 51,5 m na središnjem dijelu brane. Ukupna površina iznosi 8.505 m².

1 m³ plastičnog betona sadržavao je 112 kg cementa, 35,6 kg bentonita, 102 kg kamenog brašna, 1.527 kg kamenog agregata promjera zrna 0-4 mm i 337 l vode, a njegove mehaničke karakteristike bile su slijedeće: tlačna čvrstoća nakon 28 dana 1,67 MN/m², Youngov modul elastičnosti 341 MN/m², gustoće 2 kg/dm³, a Darcyev koeficijent filtracije iznosio je 3×10^{-4} m/s.

Rev za dijafragmu iskopam je grabilicom i hidrauličkim rezačem sa prosječnim učinkom od 22 do 30 m³/sat u glini, odnosno od 5 do 8 m³/sat u stijeni i betonu.

Prosječni učinak betoniranja iznosio je 36 m³/sat.

Dijafragmu je za četiri mjeseca, uključujući i pripremne radove na gradilištu, izvelo zajedničko poduzeće "Geotehnika-Bauer".

LABORATORIJSKA ISPITIVANJA GLINOBETONA DIJAFRAGME

Prof.dr.sc. VELIMIR UKRAINCZYK, dipl.ing.grad.

V. ČALOGOVIĆ, dipl.ing.grad.

V. ŽUGELJ, dipl.ing.grad.

I. BANJAD, dipl.ing.grad.

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU, Odjel za materijale
Doc.dr.sc. DUNJA MIKULIĆ, dipl.ing.fiz.

IGH, ZAGREB, Zavod za betonske i zidane konstrukcije

SAŽETAK

U radu su prezentirani rezultati prethodnih i kontrolnih laboratorijskih ispitivanja glinobetona dijafragme i to u tlačnom i vlačnom naprezanju, zatim je mjerena erodibilnost i vodopropusnost. Izmjerena karakteristična ovisnost naprezanje-relativna deformacija uz nesprječenu lateralnu deformaciju, aproksimirana je metodom nelinearne regresijske analize hiperboličnom funkcijom. Pokazano je, da tlačni modul elastičnosti ovisi o naprezanju i relativnoj deformaciji i da se može temeljem dobijene hiperbolične ovisnosti izračunati samo iz tlačne čvrstoće glinobetona. Ustanovljeno je, da se pri proračunu vlačne čvrstoće kod savijanja, zbog izraženih plastičnih svojstava glinobetona mora uzeti u obzir nelinearnost raspodjele naprezanja po presjeku uzorka. "Pin-hole" test modificiran je prema uvjetima u konstrukciji, te je izrađen vlastiti uređaj za ispitivanje.

UVOD

Zadaća glinobetona dijafragme je osigurati projektiranu kontroliranu razinu procjeđivanja vode tijekom životnog vijeka konstrukcije [1]. Pri tome, ona mora zadovoljiti još i niz drugih uvjeta i kriterija: čvrstoću, deformabilnost i trajnost. Svojstva glinobetona dijafragme u brani Peruća koja je trebalo ispitivati definirana su projektom dijafragme [2], i to:

- Tlačna čvrstoća nakon 28 dana mora biti veća od 1,0 MPa
- 10% uzoraka može imati tlačna čvrstoću nakon 28 dana 10% manju od 1,0 MPa
- Tlačna čvrstoća nakon 7 dana treba biti veća od 65% 28-dnevne
- Youngov modul elastičnosti ne smije biti veći od 400 MPa
- Koeficijent vodopropusnosti ne smije biti veći od 10^{-4} m/s
- 10% uzoraka može imati koeficijent vodopropusnosti između 10^{-4} m/s i 10^{-7} m/s

Nakon provedenih prethodnih laboratorijskih ispitivanja [4] Izvoditelj radova, Geotehnika-Bauer predložio je, a projektant brane prihvatio, sljedeći sastav glinobetonske ispune:

cement	112	kg
bentonit	35,6	kg
kameno brašno	102,0	kg
agregat 0-4 mm	1527,0	kg
voda	337	litara

Unutrašnju kontrolu bentonitne suspenzije za Izvoditelja radova obavljao je gradilišni laboratorij Geoexperta, a unutrašnju kontrolu agregata, konzistencije svježeg glinobetona, proizvedenog glinobetona i glinobetonskih uzoraka iz dijafragme obavljao je IGH, Poslovni centar Split. Kontrola suglasnosti prema ugovoru s Hrvatskom elektroprivredom, Direkcijom za razvoj i inženjering obavljao je Građevinski fakultet iz Zagreba, Odjel za materijale.

Ispitivani su laboratorijski pripremljeni uzorci tijekom spravljanja i ugradnje glinobetona i uzorci izvađeni iz gotovog tijela dijafragme prijenjem tijekom ispitivanja integriteta i vododrživosti cijele dijafragme.

U okviru standardnih prethodnih i kontrolnih ispitivanja uzoraka glinobetona, uočeno je njegovo posebno ponašanje u usporedbi s normalnim betonom, koje vrijedi prezentirati kao pomoć pri budućim sličnim ispitivanjima. Naime, glinobeton ima veću tlačnu čvrstoću od uobičajenih geomehaničkih materijala (glina i sl.), a istovremeno relativno malu čvrstoću usporedivo s tlačnom čvrstoćom normalnih betona. Zato je trebalo prilagoditi većinu postupaka ispitivanja propisanih normama za betone odnosno za gline. U radu su prikazani rezultati laboratorijskih ispitivanja uzoraka za potrebe kontrole suglasnosti napravljenih tijekom izvođenja dijafragme [5, 6, 7].

POSTUPCI ISPITIVANJA

Modul elastičnosti ispitivan je prema ISO preporukama i normi U.M1.025. Uzorci su bili oblika valjka visine 30 cm i promjera 15 cm. Radi sprečavanja pojave nepravilnih koncentriranih naprezanja zbog nepravilne nalijegajuće površine, na bazama uzoraka izrađen je namaz od brzovezujućeg cementa. Ispitivanja modula elastičnosti i čvrstoće provedena su na preši s mjernim područjem do 150 kN, Foto 1 i 2, opremljenoj dodatnim elektronskim mjeracom sile i induktivnim osjetilima (LVDT) za mjerenje deformacije. Brzina promjene naprezanja bila je 1 MPa/min. Naponski signali sile i deformacija su preko AD pretvarača spojeni na kompjutor i time je omogućeno kontinuirano snimanje dijagrama sila-deformacija.



Foto 1.



Foto 2.



Foto 3.

Ispitivanje **gustoće i tlačne čvrstoće** obavljeno je prema normi U.M1.020. Uzorci su njegovani tako, da su bili u stalnoj vlazi (nakon očvršćavanja u kalupu, umotani u mokro flanelsko platno i pohranjeni u polietilenskoj vreći). Ispitivani su valjci ϕ 15cmxh=15cm, ϕ 15xh=30cm i kocke brida 15cm, te brida 10cm. Na valjcima su prethodno bili izrađeni namazi od cementne paste, da bi se postigla zadovoljavajuća ravnost površine. Većina uzoraka ispitana je prema programu ispitivanja, u starosti 28 dana, a manji broj uzoraka ispitani su u starosti od 90 dana i starosti većoj od 6 mjeseci. Na posebnoj seriji ispitani su utjecaj djelomičnoga prosušivanja uzoraka na rezultat ispitivanja. To je provedeno na taj način, da su valjci ϕ 15cmxh=15cm, iz iste šarže betona i u istoj starosti, neposredno prije ispitivanja stajali 4 sata u laboratorijskim klimatskim uvjetima (20°C i 60% relativne vlage).

Vodoprepusnost je ispitana prema normi U.B1.034, po metodi s opadajućim tlakom, Foto 3. Iz uzoraka u obliku kocke ugrađenih tijekom betoniranja dijafragme, nakon njegovanja u trajanju od 28 dana rezane su ploče visine ~4 cm, iz kojih su zatim oblikovani cilindrični uzorci promjera ~10 cm. Većina ispitivanja provedena je tako, da je smjer toka vode bio u smjeru ugradnje glinobetona, kako je to uobičajeno prema citiranom standardu. Radi usporedbe četiri su uzorka pripremljena tako, da je smjer toka vode bio okomit na smjer ugrađivanja uzorka, što više odgovara uvjetima eksploatacije dijafragme.

Eroziбилnost je ispitana prema postupku opisanom u knjizi prof. Norweillera [8] uz izmjene u dogovoru s projektantom, koje su bile potrebne, da bi se postigla brzina tečenja vode od približno 3 m/s, a zatim i 6 m/s. Izrađeni uređaj, Foto 4, je prilagođen ispitivanom materijalu i uvjetima u konstrukciji. Uzorci su njegovani na isti način kao kod svih ispitivanja, a to znači da su stalno omotani mokrim flanelskim platnom i pohranjeni u polietilensku vreću. Uzorak je dimenzija ϕ 10 cm x h=7 cm, u sredini uzorka izbuši se rupica promjera 4 mm (zbog veličine granulata pijeska i brzine protjecanja vode, te slabe kohezivnosti glinobetona). Tada se uzorak stavi u uređaj, pa se kroz njega pušta voda pod tlakom, tako da velikom brzinom struji kroz rupu u uzorku.

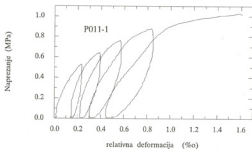
Vlačna čvrstoća betona na savijanje ispitana je prema normi U.M1.010. Uzorci su oblika prizme dimenzija 10 cm x 10 cm x 40 cm.

Uzorci za ispitivanje **ugrađenoga betona** iz glinobetske dijafragme uzimani su u dva navrata: **1.** U početku izvođenja radova, iz panela broj P 003, i to profila 100 mm i profila 60 mm. Uzorci profila 100 mm vadeni su uz suho piljenje rotacijom krune za bušenje, a uzorci profila 60 mm vadeni su uz mokro piljenje rotacijom krune za bušenje; **2.** Tijekom bušenja betona u dijafragmi radi ispitivanja integriteta brane i vododrživosti cijele dijafragme. Veći broj uzoraka trebalo je odbaciti već tijekom pregleda radi uočenih defekata, koji su bili posljedica samoga postupka vađenja uzoraka. Od uzoraka iz tijela dijafragme samo tri, koji su bili profila 60 mm, moglo se ispitati. Svi drugi uzorci, većih profila, poremećeni su toliko tijekom piljenja iz tijela dijafragme, da ih se ne može smatrati reprezentativnim.

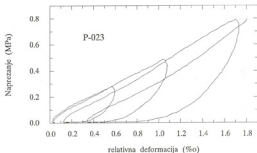


REZULTATI

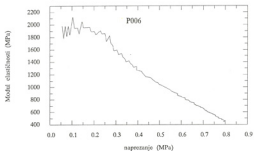
Već preliminarne ispitivanja uzoraka su pokazala, da je ovisnost naprezanja o deformaciji izrazito nelinearna i da se ulazna i silazna linija uzastopnih opterećenja i rasterećenja međusobno razlikuju, sl. 1.



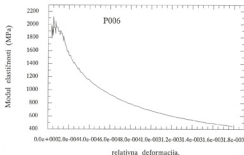
Slika 1. Tipična krivulja naprezanje-relativna deformacija tijekom "treniranja" uzorka



Slika 2. Linije naprezanje-relativna deformacija pri ponovljenim opterećenjima prethodno opterećenog uzorka s preko 60% čvrstoće
Naglašeno je posratno puzanje



Slika 3. Promjene "modula elastičnosti" u funkciji naprezanja



Slika 4. Promjene "modula elastičnosti" u funkciji relativnih deformacija

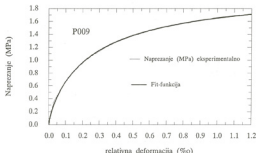
Isto tako je opaženo, da ukoliko se uzorak opterećuje do nekog naprezanja, koje je manje od približno 60% čvrstoće i nakon toga rasterećuje do nule, ponovno opterećenje daje opet nelinearnu ovisnost naprezanje-deformacija. Nasuprot tome, nakon predhodnog opterećivanja iznad 60% čvrstoće dobije se približno linearna ovisnost naprezanje-deformacija, sl. 2. Opaženo je, da ovo približno granično naprezanje raste s porastom čvrstoće uzorka.

Također je uočeno, da se uzorak povratno deformira određeno vrijeme i nakon rasterećenja, sl. 1. Za pretpostaviti je, da se naponsko-deformacijska ovisnost mijenja u vremenu, odnosno da je u funkciji brzine promjene naprezanja u vremenu i trajnog naprezanja. Kako je glavna zadaća tlačnog naponsko-deformacijskog mjerenja bila određivanje modula elastičnosti, odmah se moglo opaziti, da se modul mijenja s naprezanjem, a isto tako i s relativnom deformacijom unutar nekih graničnih vrijednosti, sl. 3 i 4.

Analizom oblika izmjerenih ovisnosti naprezanje-relativna deformacija primjećeno je, da se dobijeni eksperimentalni podaci mogu opisati sljedećom jednostavnom hiperboličnom funkcijom:

$$\sigma = \frac{f_c \cdot \varepsilon^n}{\varepsilon_0 + \varepsilon^n} \quad (1)$$

gdje je σ naprezanje, f_c tlačna čvrstoća, ε relativna deformacija, n eksponent, a ε_0 konstanta deformacije u nuli bez fizikalnog značenja (parametar hiperbole). Metodom nelinearne regresijske analize za mjerene podatke izračunati su koeficijenti f_c , ε_0 i n pojedinačno za svaki uzorak, sl. 5.

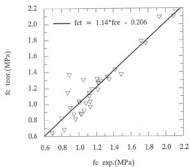


Slika 5. Eksperimentalni podaci i teorijska linija (fit funkcija) naprezanje-relativna deformacija

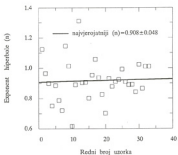
Korelirane eksperimentalne i teorijske vrijednosti tlačnih čvrstoća, prikazane na sl. 6 potvrđuju ispravnost pretpostavljene funkcije (1).

Iz obrađenih podataka za eksponent n od svih uzoraka dobijena je linearnom regresijom srednja vrijednost $n(\text{srednji}) = 0.908$ uz 5% standardne pogreške, sl. 7, pa je n aproksimiran jedinicom, te se relacija (1) mogla svesti na jednostavniji oblik:

$$\sigma = \frac{f_c \cdot \varepsilon}{\varepsilon_0 + \varepsilon} \quad (2)$$

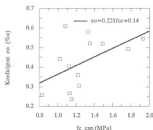


Slika 6. Odnos izmjerene i teorijski izračunate f_c (tlačne čvrstoće)



Slika 7. Srednji eksponent n za sva mjerenja

Za definiranje naprezanja (2) nedostaje konstanta ϵ_0 koja se može korelirati s eksperimentalno dobijenim tlačnim čvrstoćama, sl. 8. Linearnom regresijom ϵ_0 o f_{exp} izračunata je funkcija $\epsilon_0(\%) = 0,2943 f_{exp} + 0,024$. Kako se čvrstoća mijenja u približnim granicama od 1 do 2 MPa, to slijedi, da će se ϵ_0 kretati u intervalu od 0,2 do 0,6 %.



Slika 8. Odnos koeficijenta ϵ_0 i eksperimentalne tlačne čvrstoće

Sada se uvrštavanjem poznatih (izračunatih) koeficijenata f_c i ϵ_0 može naći eksplicitni oblik ovisnosti naprezanja o relativnoj deformaciji, a time i ovisnost modula elastičnosti o naprezanju ili o relativnoj deformaciji:

$$E = \frac{f_c - \sigma}{\epsilon_0} \quad (3)$$

$$E = f(\epsilon) = \frac{f_c \cdot \epsilon_0}{(\epsilon_0 + \epsilon)^2} \quad (\text{tangentni modul}), \quad (4)$$

$$E = f(\epsilon) = \frac{f_c}{\epsilon_0 + \epsilon} \quad (\text{sekantni modul}), \quad (5)$$

Drugim riječima, može se za bilo koju traženu relativnu deformaciju ili naprezanje izračunati pripadajući tlačni modul uz poznate koeficijente f_c i ϵ_0 . Za materijal, kojemu nije izmjerena naponsko-deformacijska krivulja, a poznata je tlačna čvrstoća između 1 i 2 MPa, može se uz prethodno određivanje parametra ϵ_0 , sl. 6, naći funkcija modula prema (3, 4, i 5). Slijedi, da za ispitani materijal ne postoji određena vrijednost za tlačni

modul nego se njegova vrijednost mijenja u ovisnosti o naprezanju ili relativnoj deformaciji unutar dosta velikog intervala (na pr. sl. 3 i 4). Zbog toga bi trebalo, kao uvjet kvalitete glinobetona osim modula elastičnosti (u ovom primjeru $E \leq 400$ MPa) zadati i odgovarajuće naprezanje ili relativnu deformaciju. U danom slučaju, kako je zadan samo maksimalni modul, moguće je pomoću izraza (3, 4 i 5) izračunati za svaki ispitani uzorak pripadajuće naprezanje i relativnu deformaciju, uz uvjet da se zadani maksimalni modul nalazi unutar područja definicije funkcija (3, 4 i 5), a to znači $\sigma_{400} < f_c$ i $\epsilon_{400} < \epsilon_{dmax}$. Tako, uvrštavanjem za $E=400$ MPa (tangenti) u (3 i 4) slijedi:

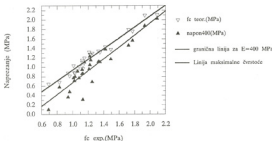
$$\sigma_{400} = f_c - 400 \cdot \epsilon_0 \quad (6)$$

$$\epsilon_{400} = \sqrt{\frac{f_c \cdot \epsilon_0}{400}} - \epsilon_0 \quad (7)$$

ili ako se za $E=400$ MPa sekantni u (5) dobije se:

$$\epsilon_{400} = \frac{f_c}{400} - \epsilon_0 \quad (8)$$

Za uvjet $E \leq 400$ MPa mora biti $\sigma \geq \sigma_{400}$ i $\epsilon \geq \epsilon_{400}$. To znači, da će tlačni modul elastičnosti biti ispod zadane granice od 400 MPa samo za naprezanje veće od σ_{400} i relativnu deformaciju veću od ϵ_{400} , a to je prema grafu na sl. 9. vrlo blizu točki tlačne



Slika 9. Interval naprezanja (između linija) unutar kojeg vrijedi da je modul elastičnosti manji ili jednak 400 MPa

čvrstoće materijala unutar relativno uskog intervala naprezanja, ali zato dosta širokog pojasa relativnih deformacija. Područje između crtkane i pune linije na sl. 9 predočava interval naprezanja, koji iznosi približno oko 0,1 MPa, ispod tlačne čvrstoće unutar kojega vrijedi, da je modul elastičnosti manji ili jednak zadanoj vrijednosti od 400 MPa. Sličnu analizu moglo bi se provesti za relativne deformacije.

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prikazani su u Tablici 1, a radi usporedbe u Tablici 2 navedeni su rezultati unutrašnje kontrole Izvoditelja radova. U Tablici 3 su rezultati ispitivanja valjaka $\phi 59$ mm izvađenih iz glinobetona ugrađenog u dijafragmu.

Dimenzije dana	ϕ 15xh15 28d	ϕ 15xh30 28d	ϕ 15xh15 90d	ϕ 15xh15 mokar	ϕ 15xh15 28d,suh	ϕ 15xh30 >180d
broj uzoraka	30	29	4	5	5	27
aritmetička sredina	1,24	1,11	2,09	1,21	1,37	1,88
stand. devijacija	0,29	0,30	-	-	-	0,43
koef. varijacije	0,23	0,27	-	-	-	0,23
gustoća, t/m ³	2,09	2,10				

Tablica 1. Rezime rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće glinobetona iz kontrole suglasnosti

STATISTIČKI POKAZATELJ	Starost uzoraka		
	7 dana	28 dana	90 dana
Broj uzoraka	67	257	20
Aritmetička sredina, MPa	0,92	1,34	1,76
Standardna devijacija, MPa	0,14	0,219	0,38
Koeficijent varijacije	0,16	0,16	0,22

Tablica 2. Statistički pokazatelji rezultata kontrolnih uzoraka

Panel P-003	gustoća, t/m ³	tlačna čvrstoća, MPa	profil, cm	visina, cm
1	2,28	1,28	5,90	12,2
2	2,25	1,32	5,90	13,1
3	2,20	1,46	5,90	15,9

Tablica 3. Rezultati ispitivanja uzoraka iz dijafragme u starosti 55 dana

Uvjet pojedinačne čvrstoće iz projekta bio je zadovoljen tj. pojedinačne vrijednosti i srednja vrijednost čvrstoće je veća od propisane, a broj podbujaja bio je 10%.

Pri slomu svi su valjci imali tipično vertikalne pakotine po cijeloj visini. Foto 5 i 6, što ukazuje na to, da je trenje između uzorka i ploča prele bilo vrlo malo. Ipak, uzorci veće visine imali su u prosjeku 8% manje čvrstoće (kod običnog betona je to 20%).

Za odnose rezultata ispitivanja uzoraka u prosušenom odnosno vlažnom stanju, ne može se na osnovu broja rezultata govoriti o pouzdanim korelacijama. Međutim, kako su ispitivanja obavljena na paralelnim uzorcima iz istih šarži glinobetona i uz iste uvjete njegovanja, to su indikacije jasne. To vrijedi tim više što se ovi podaci podudaraju s poznatim relacijama, koje vrijede za običan beton. Tako su za uzorke, koji su prije ispitivanja 4 sata bili izloženi sušenju u laboratorijskim klimatskim okolnostima, dakle površinski prosušeni, čvrstoće povećane za 10 do 73%. Čvrstoće kocaka brida 15 cm približno su jednake čvrstoćama valjaka visine 15 cm.

Ispitivanja čvrstoća glinobetona u starostima većim od 28 dana pokazala su prirast čvrstoće uobičajen kod betona s manjim količinama cementa (50-70%).

Rezultati unutrašnje kontrole Izvođačelja radova i kontrole suglasnosti dobro se podudaraju.

Sve pojedinačne gustoće valjaka iz konstrukcije su veće od srednje vrijednosti gustoće laboratorijskih valjaka. Visine valjaka izvađenih iz konstrukcije dva i više puta su veće od promjera, pa ipak su im čvrstoće približno iste kao i čvrstoće laboratorijskih uzoraka. Na osnovu ovih podataka može se pretpostaviti, da se gustoća i čvrstoća glinobetona u konstrukciji povećavaju s dubinom na kojoj se uzorci uzimaju. Radi poteškoća u vadenju uzoraka iz konstrukcije, nije se moglo uspostaviti korelaciju između laboratorijski pripremljenih uzoraka i uzoraka iz konstrukcije.

Rezultati ispitivanja **vlačne čvrstoće savijanjem** prikazani su u Tablici 4. Prema normi U.M1.010 ona se proračunava po formuli:

$$\beta_s = \frac{3 \cdot P \cdot l_s}{2 \cdot b \cdot h^2} \quad (9)$$

gdje je:

β_s vlačna čvrstoća savijanjem (N/mm²)

P sila sloma (N)

l_s raspon (mm)

b širina uzorka (mm)

h visina uzorka (mm)



Foto 5.



Foto 6.

Red. broj	Vzorak	Sila lom (N)	Čvrstoća R_p (N/mm ²)	Max. sila tlaka (N)	Tl. čvrstoća (N/mm ²)	f_{Zem} (N/mm ²)	σ_{Zem} (N/mm ²)	f_{Zem} (N/mm ²)	σ_{Zem} (N/mm ²)	f_{Zem} (N/mm ²)	σ_{Zem} (N/mm ²)
1.	P-010	2250	0,844	25250	2,275	0,374	1,308	0,335	2,009	0,305	4,115
2.	P-012	2681	1,006	34750	3,130	0,445	1,559	0,399	2,594	0,363	4,904
3.	P-009	1427	0,535	15850	1,430	0,257	0,829	0,212	1,274	0,193	2,611
4.	P-011-1	1654	0,620	18350	1,655	0,275	0,961	0,246	1,477	0,224	3,025
5.	P-011-2	1798	0,674	18950	1,710	0,298	1,045	0,267	1,605	0,244	3,289
6.	P-013	1922	0,721	22000	1,985	0,319	1,117	0,286	1,716	0,260	3,516
7.	S-009	1449	0,544	17050	1,535	0,241	0,842	0,216	1,294	0,196	2,651
8.	P-015-1	1668	0,626	20750	1,870	0,277	0,969	0,248	1,489	0,226	3,051
9.	S-012	1304	0,489	19500	1,755	0,217	0,758	0,194	1,164	0,177	2,385
10.	P-017-1	1521	0,571	16250	1,463	0,253	0,884	0,226	1,358	0,206	2,782
11.	P-019-1	1945	0,729	-	-	0,323	1,131	0,289	1,737	0,263	3,558
12.	P-021-1	2541	0,953	-	-	0,422	1,477	0,378	2,269	0,344	4,648

Tablica 4. Rezultati ispitivanja priami 10cm x 10cm x 40cm na savijanje i proračun čvrstoće

Ovako dobivena vlačna čvrstoća savijanjem nije realna, jer stvarna raspodjela naprezanja po visini presjeka nije linearna. Kod materijala kao što je beton, pri porastu opterećenja (prije otvaranja pukotina) dolazi do pomicanja neutralne osi prema tlačnom rubu (naponsko stanje Ia). Tada se može pretpostaviti raspodjelu naprezanja po paraboli (za tlačni dio) i pravokutniku (za vlačni dio). Ova pretpostavka vrijedi i za glinobetone, jer oni imaju još izraženija plastična svojstva od običnog betona. Ispitana su dva slučaja ravnoteže u poprečnom presjeku u trenutku postizanja maksimalne sile. U prvom slučaju pretpostavljeno je, da se neutralna os pomakla za 20% prema tlačnom rubu, a u drugom slučaju za 30%. Rezultati ta dva slučaja se međusobno malo razlikuju, ali se dosta razlikuju u odnosu na proračunatu čvrstoću po formuli (9). Zbog toga i zbog pretpostavljene nelinearne raspodjele naprezanja, u ta dva slučaja dobiveni su realniji rezultati za vlačnu čvrstoću na savijanje, te se može zaključiti, da se vlačna čvrstoća savijanjem nalazi u granicama između ta dva rezultata. Proračun vlačne čvrstoće na savijanje vršimo po formuli:

$$f_t = \frac{M}{h \cdot (h - x)} \cdot z \quad (10)$$

gdje je:

f_t - vlačna čvrstoća savijanjem (N/mm²),

$M = P l_0 / 4$ (Nmm) - max. moment,

h - visina presjeka (mm),

x - visina tlačne zone (mm),

$z = 0.625 \cdot x + 0.5 \cdot (h - x)$ - krak između vlačne i tlačne sile u betonu (mm).

Naprezanje na tlačnom rubu izračuna se po formuli:

$$\sigma_{tc} = \frac{3}{2} \cdot f_t \cdot \frac{h - x}{x} \quad (11)$$

gdje je:

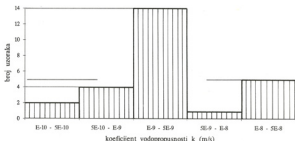
σ_{tc} - naprezanje na tlačnom rubu presjeka (N/mm²)

Naprezanja na tlačnom rubu presjeka računata su za tri položaja neutralne osi i to, ako se neutralna os pomaknula za 20%, 30% i 40% prema tlačnom rubu presjeka. Prema dobivenim rezultatima neutralna os se u trenutku loma pomaknula za 20% do 30% prema tlačnom rubu, kada su se tlačna naprezanja približila tlačnoj čvrstoći. Za daljnje pomicanje neutralne osi bila bi premašena tlačna čvrstoća na tlačnom rubu presjeka, što znači, da bi do sloma došlo zbog dostizanja tlačne čvrstoće što nije točno. To samo dokazuje, da je gornja pretpostavka točna i da se vlačna čvrstoća može računati po formuli (10).

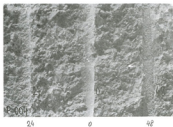
Sumarni rezultati ispitivanja **vodopropusnosti** glinobetona prikazani su u histogramu na sl. 10. Od 30 ispitanih uzoraka 5 ih ima koeficijent vodopropusnosti malo veći od projektom unjetovanoga $k \leq 10^{-8}$ m/s, i to od 1,22 do $5,52 \times 10^{-8}$ m/s. Svi ostali uzorci imaju približno za red veličine manju vodopropusnost.

Uzorci za koje je ispitana vodopropusnost u smjeru okomitom na smjer ugradnje imali su vodopropusnost za red veličine manju od vodopropusnosti glinobetona iz istih uzoraka, ali u smjeru ugradnje. S produljenjem vremena trajanja ispitivanja na istom uzorku vodopropusnost se smanjuje.

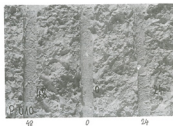
Tijekom ispitivanja **erodibilnosti** glinobetona (pin-hole test) u uobičajenom vremenu od 24 sata nisu primijećene nikakve promjene. Zato je na većem broju uzoraka ispitivanje produženo za jedan ili dva dana, te je mjerena protoka pri istom tlaku. Također, nije izmjerena nikakva promjena u protoci. Ocjena erodirane površine provodi se vizuelno, Foto 7. Na presječenim uzorcima nisu ustanovljene nikakve razlike između rupa kroz koje je voda tekla 1 ili 2 dana, niti između rupa kroz koje je voda tekla brzinom od 3 m/s i rupa kroz koje je voda tekla 6 m/s. Nakon erodiranja nema promjene boje taloga, što bi bio slučaj kod gline, a promjenu težine uzorka je nemoguće korektno pratiti zbog vlažnosti uzorka i slabe kohezivnosti.



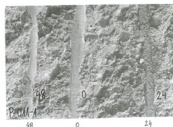
Slika 10. Histogram rezultata koeficijenta vodopropusnosti



P-004



P-010



P-011-1

Foto 7.

LITERATURA

- [1] Filling materials for watertight cut off walls, ICOLD Bulletin 51, Commission Internationale des Grands Barrages, Paris, 1985
- [2] Projekt sanacije brane Peruća, Vodonepropusna dijafragma, Elektroprojekt Zagreb, 1994.
- [3] Program ispitivanja vodonepropusne dijafragme, Elektroprojekt Zagreb, siječanj 1995.
- [4] Izvještaj o prethodnim laboratorijskim ispitivanjima kvalitete komponentnih materijala i određivanja optimalnog sastava bentonitno-betonske ispune dijafragme brane Peruća, Geoexpert - IGM, listopad 1994.
- [5] 1. privremeni izvještaj o ispitivanjima glinobetona dijafragme, Građevinski fakultet u Zagrebu, prosinac 1994
- [6] 2. privremeni izvještaj o ispitivanjima glinobetona dijafragme, Građevinski fakultet u Zagrebu, veljača 1995
- [7] 3. privremeni izvještaj o ispitivanjima glinobetona dijafragme, Građevinski fakultet u Zagrebu, lipanj 1995.
- [8] Nèveiller E., Injektiranje tla, Skripta, Građevinski fakultet u Zagrebu, Zagreb 1969.
- [9] Završno izvješće o kontroli proizvodnje bentonitno-betonske smjese, IGH, Poslovni centar Split, travanj 1995.
- [10] Završno izvješće o ispitivanju uzoraka betona iz dijafragme, IGH, Poslovni centar Split, lipanj 1995.

OŠTEĆENJA I SANACIJA INJEKCIJSKE GALERIJE

ZVONIMIR SEVER, dipl.ing.građ.

Projektant

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d.

ZAGREB

MIJO, ZEC, dipl.ing.građ.

Glavni nadzorni inženjer

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.

SPLIT

SAŽETAK

Sanacija injekcijske galerije brane Peruća predstavlja najteži i u pogledu sigurnosti radnika najriscantniji posao sanacije brane.

Jedna dionica galerije bila je potpuno srušena, a ostatak teško oštećen.

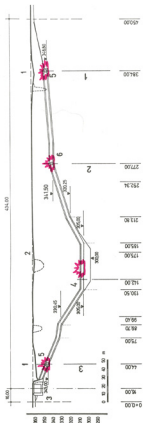
Zbog vrlo skućenog prostora za iskop i utovar uručenog materijala nije bilo moguće primijeniti mehanizaciju, tako da se taj najveći dio radova morao obavljati ručno.

Sanacija injekcijske galerije trajala je ukupno 16 mjeseci.

UVOD

Eksplozija koja je teško oštetila branu Peruća dogodila se u injekcijskoj galeriji, gdje je bio postavljen eksploziv.

Injekcijska galerija u originalnoj brani bila je potkovastog poprečnog presjeka i dužine 384 m. Galerija je izgrađena od nearmiranog betona sa stijenama minimalne debljine u kaloti 80 cm. Galerija je na 85% dužine temeljena na stijeni, dok je na najdubljem dijelu brane, na potezu od 50 m, galerija temeljena na 7-8 m debelom betonskom bloku koji je zamijenio aluvijalne naslage iz korita rijeke Cetine na lokaciji brane. Na većem dijelu dužine, galerija je do visine lancheva svoda ukopana u stijenu tako da se u glinenoj jezgri nalazi samo svod.



LEGENDA

1. KRATERI NA DESNOJ I LIJEVOJ STRANI BRANE
2. ULEGNUĆE KRUNE NA NAJVIŠEM DIJELU BRANE
3. UNÁŠTENÁ MRLJEVÁ GRÁĐEVINA
4. DRENAŽNÍ ODVOD IZ INJEKCIJSKE GALERIJE
5. UNÁŠTENÍ PRISTUPNÍ TUNEL U INJEKCIJSKÚ GÁLERIJU
6. OŠTEĆEN PRISTUPNÍ TUNEL U INJEKCIJSKÚ GÁLERIJU

Slika 1. Uzdutni profil brane Peruća

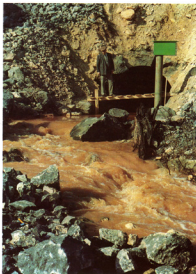


Foto 1. Istjecanje vode kroz teško oštećeni pristupni hodnik br. 2

Za vrijeme izgradnje brane krajem pedesetih godina obavljeno je kontaktno injektiranje spoja betona galerije i temeljne stijene, a 1973. godine, u tijeku eksploatacije brane, obavljeno je dodatno konsolidacijsko injektiranje okolne stijene. Nakon toga praktički nije bilo procjeđivanja vode u galeriju.

Eksplziv, koji su u galeriju postavili i aktivirali srpski pobunjenici, bio je postavljen na četiri mjesta u galeriji, sl. 1. Na osnovi analize seizmograma iz seizmičkih postaja koje su registrirale potres nastao uslijed eksplozije, stručnjaci Geofizičkog zavoda Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu ocijenili su da se u galeriji nalazilo 30 t TNT eksploziva.

Nakon eksplozije i oštećenja brane došlo je na lijevom kraju do jakog procjeđivanja vode u galeriju. Voda je iz galerije kroz drenažnu cijev i vertikalno okno istjecala pod jakim pritiskom na plato rasklopnog postrojenja HE Peruća, iznoseći komade glinene jezgre promjera i do 50 cm. Ovim putem voda je iznijela oko 400-500 m³ materijala glinene jezgre i filtra.

Nakon što se drenažna cijev začepila istjecanje vode nastavljeno je kroz pristupni hodnik br. 2, koji se nalazi na desnom kraju brane, s protokama od oko 500 lit/s. Istjecanje kroz taj hodnik trajalo je do trenutka, dok se voda u akumulacijskom jezeru nije spustila ispod kote 345,00 m n.m.

Rješenjem sanacije brane predviđeno je da se potpuno obnovi i injekcijska galerija. Tema ovog članka je prikaz oštećenja galerije i izvođenje radova na sanaciji injekcijske galerije. Međutim radi lakšeg praćenja materije, u ovom članku je dat i prikaz rješenja sanacije, iako je ta problematika obrađena u ovoj knjizi i u članku "Projekt sanacije brane Peruća".

RJEŠENJE SANACIJE

Polazne pretpostavke

Osnovna poteškoću kod postavljanja rješenja sanacije injekcijske galerije predstavljao je nedostatak podataka o stupnju i naravi oštećenja galerije. Stanje galerije i stupanj oštećenja nije bilo moguće precizno utvrditi zbog toga, što su dva pristupna hodnika u galeriju bila uništena i nepristupačna, a treći, srednji, bio je teško oštećen. Kroz taj hodnik se uz poseban oprez zbog opasnosti od zaostalih mina moglo ući u galeriju na koti 341,50 m n.m. i pregledati njen relativno mali dio, svega oko 50 m, foto 1.

Zbog toga je rješenje sanacije galerije postavljeno na pretpostavkama, koje su se temeljile na uvidu s lica mjesta oko 50 m galerije, praćenja slijezanja krune brane nakon eksplozije, te saznanjima o mjestima i snazi eksplozije. Za potrebe projekta pretpostavljena oštećenja su klasificirana u tri stupnja:

- I stupanj oštećenja

Galerija je ispucala u svodu i zidovima, ali nije deformirana, a svod u statičkom pogledu obavlja svoju funkciju

II stupanj oštećenja

Galerija je jako ispucala, ali nije urušena. Svijetli otvor je deformiran, ali je generalno zadržao svoj oblik. Dijelovi svoda su odlomljeni, ali svod u statičkom pogledu ipak obavlja svoju funkciju s prijetnjom da se djelomično ili potpuno uruši.

III stupanj oštećenja

Galerija je potpuno srušena. Kod toga se misli da su srušeni svod i zidovi galerije, a da je temeljna ploča oštećena.

Osim navedenih oštećenja kod utvrđivanja tehnologije građenja trebalo je uzeti u obzir da je u galeriji nataločena glina visoke plastičnosti, što je posljedica ispiranja jezgre i tečenja vode kroz galeriju. Također je uzeto u obzir da su zidovi galerije potpuno čađavi, što je posljedica vrućih plinova i plamena koji su se pojavili prilikom eksplozije.

Rješenje sanacije

Rješenje sanacije postavljeno je prema pretpostavljenim stupnjevima oštećenja opisanim u prethodnoj točki. Na temelju toga određena su tri tipa sanacije galerije:

a) TIP-1

Primjenjuje se za prvi stupanj oštećenja

Galerija se sanira izvođenjem obloge od mlaznog betona debljine 10 cm dvostruko armiranog čeličnim mrežama, sl. 2. Za ovaj tip sanacije nije bilo predviđeno podgrađivanje.

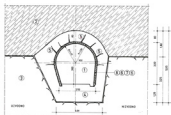
b) TIP-2

Primjenjuje se za drugi stupanj oštećenja.

Galerija se sanira izvođenjem obloge debljine 15 cm od mlaznog betona ojačanim zvonastim lukovima s popustljivom spojnicom, te dvostrukom čeličnom mrežom, sl. 3.

LEGENDA

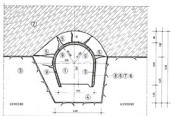
1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. GLINENA JEZGRA
3. TEMELJNA STUJENA
4. POSTOJEĆI BETON
5. PUKOTINE
6. ČELIČNA MREŽA Q-131
7. ČELIČNI LUKOVI
8. MLAŽNI BETON



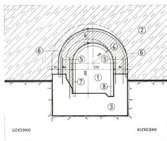
Slika 2. TIP-1 sanacije injekcijske galerije

LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. GLINENA JEZGRA
3. TEMELJNA STUJENA
4. POSTOJEĆI BETON
5. PUKOTINE
6. ČELIČNA MREŽA Q-131
7. ČELIČNI LUKOVI
8. MLAŽNI BETON
9. RAZUPORE ϕ 25



Slika 3. TIP-2 sanacije injekcijske galerije



LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. GUNENA JEZGRA
3. POSTOJEĆI BETON
4. NOVI BETON
5. ANKERI
6. ČELIČNE PLATICE
7. DRVENA OPLATA
8. ZVONASTI LUKOVI

Slika 4. TIP-3 sanacije injekcijske galerije

c) TIP-3

Primjenjuje se za treći stupanj oštećenja

Sanacija se izvodi u dvije faze:

- Najprije se obavlja iskop pod zaštitom čeličnih zvonastih lukova s popustljivom spojnicom i čeličnih platice. Iскоп se obavlja po obodu, dok se ne smjesti čelični luk, a zatim se kopa unutrašnji dio profila.
- Nakon što je osiguran iskop izvodi se betonska obloga debljine 80 cm, sl. 4.

Projektom je također predviđeno da se na isti način obnovi pristupni hodnik na lijevom kraju i pristupni hodnik na desnom kraju brane.

NAČIN IZVOĐENJA SANACIJE

Nakon razmatranja raspoloživih podataka o stupnju i naravi oštećenja galerije, te prilika na terenu odlučeno je, da se radovi na sanaciji injekcijske galerije izvedu u tri faze.

Prva faza sanacije obuhvaća dio galerije od sta: 2+77,00 do sta: 3+42,00. Prilaz u galeriju je kroz pristupni hodnik br. 2, koji je jedini od tri pristupna hodnika bio donekle sačuvan. Radovi se u ovoj fazi izvede u potpunosti tunnelski.

Druga faza obuhvaća dio galerije od sta: 0+40,00 do sta: 1+33,00 uključujući i obnovu pristupaog hodnika br. 3, a počinje nakon uklanjanja lijevog kraja brane djelomično u otvorenom iskopu, od sta: 0+40,00 do sta: 0+89,70, i tunnelski od sta: 0+89,70 do sta: 1+33,00.

Na donošenje ovakve organizacije izvođenja sanacije utjecali su slijedeći faktori:

- radovi na sanaciji injekcijske galerije mogli su početi znatno prije od ostalih radova, budući da je projekt sanacije injekcijske galerije izrađen do kraja srpnja 1993 godine, dok je izrada projekta sanacije brane počela tek krajem kolovoza 1993 godine.
- u periodu od srpnja 1993 godine do veljače 1994 godine događali su se povremeni topnički napadi od strane srpskih pobunjenika na branu i hidroelektranu tako, da se nisu mogli odvijati radovi na uklanjanju krune i krajeva brane, a jedino sigurno mjesto, gdje se moglo pristupiti u galeriju i organizirati gradilište bilo je kod pristupaog hodnika br. 2.

Također u prvoj fazi nije bilo predviđeno da se sanacija od sta: 1+30,50 na ravnom najdubljem dijelu izvodi prema gore, jer je procijenjeno, da postoji opasnost od odrona i klizanja materijala, što bi moglo ugroziti ljudske živote.

U pogledu tehnologije izvođenja bilo je predviđeno da se u galeriju ulazi tako, da se na licu mjesta ocjenjuje stupanj oštećenja i određuje koji tip sanacije treba primijeniti. Tamo gdje je to potrebno paralelno s ulaskom treba osigurati svod galerije od urušavanja postavljanjem zvonastih lukova. S vanjske strane lukova postavlja se armaturna mreža. Lukovi se u uzdužnom smjeru ukružuju čeličnim šipkama ϕ 25 mm, a u poprečnom ukopavanjem u beton galerije. Također, napredovanju kod ulaska trebaju predhoditi ispitivanja da li postoji opasnost od zaostalih nagaznih mina u nataloženoj glini na dnu galerije, a koja trebaju obavljati vojni stručnjaci.

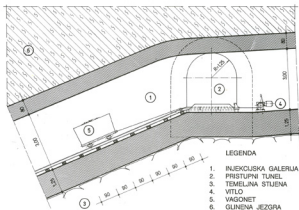




Foto 3. Pruga za vagonete u galeriji



Foto 4. Betonara za potrebe sanacije galerije na radnom platou ispred ulaznog hodnika br. 2

Usporedo s ulaskom u galeriju obavlja se čišćenje glinenog taloga, odnosno iskop urušene gline na mjestima gdje je galerija srušena. Predviđeno je, da se glina iz galerije izvlači pomoću vagoneta s vitlom, sl. 5 i foto 2, dok zbog nepoznatog stanja u samoj galeriji nije bilo moguće unaprijed odrediti kakvu mehanizaciju treba upotrijebiti za čišćenje i iskop gline.

Izvođenje betonske obloge galerije na dionicama na kojima se sanacija izvodi tunelski, slijedi nakon podgrađivanja iskopanog dijela. Kod toga na mjestima gdje je galerija bila potpuno srušena obloga se izvodi neposredno nakon podgrađivanja u dionicama dužine 4-6 m. Stari i novi beton galerije povezuje se sidrima ubušenim u stari beton galerije.

Na mjestima gdje se izvodi obloga unutar galerije potrebno je pjeskarenjem očistiti od čađe postojeći beton galerije, a od gline i prašine očistiti sve pukotine. To je neophodno potrebno učiniti, da bi se osigurala što bolja veza između starog i novog betona. Predviđeno je da se za obloga koristi mlazni beton. Prije ugradnje mlaznog betona treba ugraditi unutarnju armaturnu mrežu.

ORGANIZACIJA GRADILIŠTA

Organizacija gradilišta za obnovu injekcijske galerije prilagođena je tehnološkim zahtjevima sanacijskih radova i specifičnim terenskim uvjetima.

Gradilište je organizirano za izvođenje prve faze sanacije injekcijske galerije koja se je izvodila u cijelosti tunelski s ulazom kroz pristupni hodnik br. 2. Radi toga je ispred pristupnog hodnika br. 2 uređen plato na kojemu su smješteni objekti uprave gradilišta, betonara, ventilatorska i kompresorska stanica, rezervoar za vodu, aparat za mlazni i pumpani beton, foto 4.

Zbog stalne opasnosti od granatiranja rad na gradilištu organiziran je tako, da se što je god moguće manje odvija promet vozila i kretanje ljudi na otvorenom prostoru. U pravilu najveći broj uposlenih trebao se nalaziti u galeriji ili blizu pristupnog hodnika br. 2 tako, da se u slučaju opasnosti od granatiranja u njega može brzo skloniti. Takva situacija je trajala od početka radova 1. kolovoza 1993 godine do travnja 1994 godine kada je sa srpskim pobunjenicima potpisan sporazum o prekidu vatre.

TIJEK RADOVA I PRIKAZ OŠTEĆENJA

Uvod

Radovi na obnovi injekcijske galerije počeli su 1. kolovoza 1993 i trajali su do 24. studenog 1994 godine, odnosno 16 mjeseci.

Radovi su počeli sanacijom prilaznog hodnika br. 2. Prikaz tijeka radova i oštećenja dat je prema fazama izvođenja.

Pristupni hodnik

Najprije se prišlo sanaciji pristupnog hodnika. Izgrađen je novi ulazni portal koji je u eksploziji bio potpuno uništen, foto 5. Oštećena betonska obloga podupeta je čeličnim zvonastim lukovima i čeličnim armaturnim mrežama, foto 8. Prije podgrađivanja iz pristupnog hodnika je očišćen sloj nataložene gline debljine oko 50 cm uz prethodnu provjeru da li se u njemu nalaze zaostale mine. Provjeru su obavili vojni stručnjaci pomoću posebnih detektora.

Ozbiljan problem za graditelje se pojavio na spoju pristupnog hodnika s galerijom na sta: 2+77,00. Na tom mjestu se urušio dio svoda galerije, te ga je bilo potrebno potpuno rekonstruirati. Rekonstrukcija je obavljena tako, da je dio galerije koji se nije urušio poduprt čeličnim lukovima i armaturnim mrežama i zabetoniran mlaznim betonom, foto 9.

Tek nakon što je saniran taj dio moglo se početi s radovima u samoj galeriji lijevo i desno od sta: 2+77,00.



Foto 5. Ulaz u pristupni hodnik br. 2 s uređajem za ventilaciju

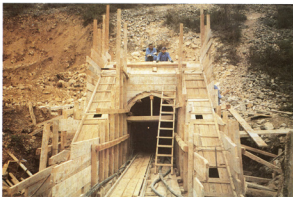


Foto 6. Rad na obnovi ulaznog portala pristupnog hodnika br. 2



Foto 7. Obnovljeni portal u pristupni hodnik br. 2



Foto 8. Pristupni tunel br. 2 nakon osiguranja čeličnim lukovima



Foto 9. Podupiranje oštećenog svoda na spoju galerije
i pristupnog hodnika br. 2

Dio galerije od stac: 2+77,00 prema desnom kraju brane do stac: 3+42,00

Radovi na dijelu galerije od spoja sa pristupnim hodnikom prema desnom kraju brane odvijali su se bez većih problema. Razlog za to leži u tome što taj dio galerije nije strm pa se čišćenje i izvoženje nataložene gline obavljalo relativno brzo.

Na tom dijelu galerija je jako ispucala i prilično se deformirala, ali je generalno zadržala svoj oblik. Cijela galerija je crna od čađe nastale uslijed visoke temperature koja se javila kod eksplozije. Karakteristično na tom potezu je da se nizvodni dio svoda, vjerojatno na kontaktu stijene i glinene jezgre, pomaknuo uslijed eksplozije za 10-20 cm nizvodno, foto 10. Otprilike na 65 m od ulaznog hodnika galerija je urušena, sl. 11.

Na cijelom potezu obavljeno je podupiranje čeličnim lukovima i betoniranje mlaznim betonom po cijeloj dužini, tako da je u konačnici primijenjen TIP-2 sanacije.



Foto 10. Nizvodni pomak svoda galerije od oko 10-20 cm



Foto 11. Urušena galerija na sta: 3+42,00



Foto 12. Nataložena glina u galeriji

**Dio galerije od sta: 2+77,00 prema dnu u
središnjem dijelu brane do sta: 2+00,00**

Radovi od spoja s pristupnim hodnikom prema dnu odvijali su se mnogo teže i sporije nego na dijelu galerije iz prethodne točke. Razlozi za to su sljedeći:

- strm hodnik
- velike količine nataložene gline debljine oko 1,00 m, koja je bila vrlo raskvašena što je posebno otežavalo utovar, foto 12.
- zbog skučenosti prostora nije bilo moguće koristiti nikakvu mehanizaciju osim vagonete s višom za izvlačenje gline, tako da se iskop i utovar gline morao odvijati ručno
- brzina vagoneta je iz sigurnosnih razloga ograničena na 6 m/min, tako da je izvlačenje i spuštanje dugo trajalo.

Stupanj i karakter oštećenja na tom dijelu galerije na potezu u koji se do sada ušlo približno odgovaraju oštećenjima u dijelu galerije na desnom kraju. Također se primjećuje pomak nizvodno lijevog dijela svoda galerije za oko 10-20 cm uz vrlo velike pukotine pretežno u uzdužnom smjeru, foto 13 i 14. Cijela je galerija crna od čađe nastale uslijed visoke temperature, koja se javlja kod eksplozije.

Zbog svega navedenog na cijelom potezu obloga je poduprta čeličnim lukovima i aramturnim mrežama i izveden sloj mlaznog betona, tako da će u konačnici biti primijenjen TIP-2 sanacije, foto 15.

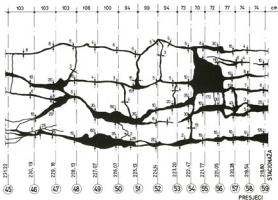
Dio galerije od sta. 2+00,00 do sta: 1+33,00

Na sta: 2+00,00 naišlo se na potpuno srušen svod galerije u koji se urušila jezgra brane, foto 17. Betonski dijelovi svoda se nalaze na dnu, a iznad njih veoma dobro kompaktnirana glina iz jezgre. Svuda se vide ostaci gareži. Takvo stanje galerije bilo je isto do sta: 1+33,00 gdje su završili radovi faze I sanacije galerije.

Radovi na ovom dijelu galerije uključivo i radove na dijelu od sta: 1+14,00 do sta: 1+33,00, gdje je galerija potpuno srušena a obnova se vrši temeljski, predstavlja najteži dio ukupne sanacije brane Peruća.

Na tom potezu obavljen je iskop urušene gline, betonskih blokova i ostalog urušenog materijala, obavljeno podgrađivanje čeličnim lukovima i platicama te izvedena betonska obloga debljine 80 cm u dionicama 4-6 metara, foto 18. Napredovanje radova na ovom dijelu galerije bilo je vrlo sporo, prosječno 40 cm dnevno, s time da se radilo kontinuirano u tri smjene.

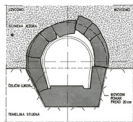
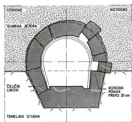
POGLED



OŠTEĆENJA NA OBLOZI GALERIJE

PRESJEK 49

PRESJEK 57



Slika 6. Oštećenja i deformacije betonske obloge galerije

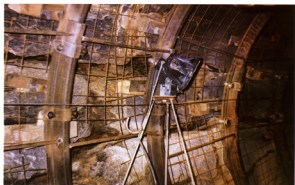


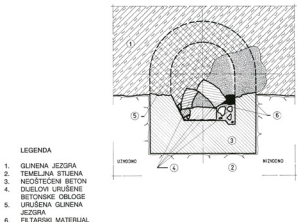
Foto 13. i 14. Oštećenja na oblozi injekcijske galerije u centralnom dijelu



Foto 15. Osiguranje galerije podupiranjem pomoću čeličnih lukova



Foto 16. Obloga od mlaznog betona



Slika 7. Urušeni dio galerije

Osobito težak bio je iskop materijala. Zbog skućenog prostora iskop se morao obavljati isključivo ručno uz povremenu uporabu malih vibracionih čekića s posebnim lopaticama za iskop gline. Kod toga su poseban problem predstavljali urušeni betonski blokovi obloge galerije, koje je trebalo ručno utovarivati u vagonete, foto 20 i 21.

Dodatni problem za tijek radova predstavljala je voda koja se procjeđivala u galeriju i skupljala na dnu iskopa tako, da ju je trebalo pumpama evakuirati.

Uzrok zbog kojega je došlo do procjeđivanja vode u galeriju je držanje nivoa vode u akumulacijskom jezeru na koti 325-330 m n.m. kako bi se omogućio rad HE Peruća. Maksimalni dotok vode iznosio je 130 l/min pri koti vode 330,00 m n.m. u akumulacijskom jezeru. Od toga je oca 50 l/min bilo koncentrirano na koti 321,80 m n.m. Karakteristično je, da se procjeđivanje vode događalo kroz pukotine na oblozi i to na dijelu gdje je obloga temeljena na stijeni. Voda koja se procjeđivala bila je potpuno bistra bez znakova ispiranja materijala što navodi na zaključak da se voda procjeđuje kroz pukotine u temeljnoj stijeni, foto 22.



Foto 17. Osiguranje iskopa pomoću čeličnih lukova i platice
- na slici se vide urušeni betonski blokovi

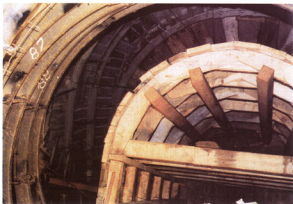


Foto 18. Oplata za betoniranje obloge na potpuno
razrušenom dijelu galerije



Foto 19. Obnovljeni dio potpuno razrušene galerije
betonskom oblogom debljine 80 cm



Foto 20. Iskop urušenog dijela
galerije morao se obavljati ručno



Foto 21. Utovar iskapanog materijala u vagonet

Na sta: 1+95,00 naišlo se na kavernu promjera oko 1,0 m u glinenoj jezgri brane iznad tjemena galerije. Nakon toga je, zbog bojazni da se na čelu iskopa ne naide na kavernu ispunjenu vodom koja ima direktnu vezu s akumulacijskim jezerom, odlučeno, da se prije iskopa svake nove dionice na čelu iskopa izvedu 3 bušotine dubine 10 m. Na taj način nastojalo se otkriti potencijalne kaverne i zaštititi mjesta rada od moguće nesreće.

Osobito velika oštećenja pronađena su na potezu od sta: 1+52,00 do sta: 1+62,00. Na tom potezu zidova galerije uopće nije bilo, teško je oštećeno i dno, a posvuda su bili vidljivi tragovi sprženog betona. Na tom je mjestu najvjerojatnije bio postavljen eksploziv, foto 23.

Na stacioni 1+42,00 pronađen je potpuno zarušen drenažni odvod galerije u dužini 8 m, dok je ostatak drenažnog odvoda očuvan i zatrpan glinom. Zarušeni dio drenažnog odvoda je rekonstruiran, a ostali dio očišćen od nataložene gline.



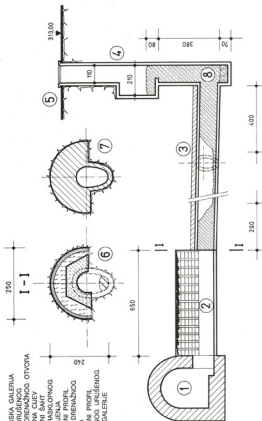
Foto 22. Procjeđivanje vode u galeriju na koti 321,80



Foto 23. Sprženi beton

LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. ISKOP URUŠENOG DUELA DRENAŽNOG OTVORA
3. DRENAŽNA ČUEV
4. DRENAŽNI ŠAHIT
5. PLATO RASKLOPNOG POSTROJENJA
6. POPREČNI PROFIL ISKOPA DRENAŽNOG OTVORA
7. POPREČNI PROFIL SANIRANOG URUŠENOG DUELA GALERIJE



Slika 8. Sanitarni drenažni odvod

Dio galerije od sta: 3+42,00 do sta: 3+84,00

Taj je dio galerije saniran nakon što je uklonjen desni kraj brane, a radovi su počeli 15. srpnja 1995. godine.

Na tom je potezu galerija bila djelomično srušena na sta: 3+42,00, dok je na ostalom potezu bila napakla u svodu, foto 24. Pristupni hodnik br. 1 bio je potpuno srušen.

Na tom potezu obnovljen je svod galerije nearmiranim betonom debljine 80 cm. Svod i stari zidovi galerije povezani su sidrima. Predhodao je ostatak galerije pjeskarenjem očišćen od čađe.

Pristupni hodnik br. 1 obnovljen je u potpunosti, foto 25.

Dio galerije od sta: 0+40,00 do sta: 1+33,00

Radovi na dijelu galerije od sta: 0+44,00 do sta: 1+33,00 počeli su 1. srpnja 1995. godine nakon što je uklonjen lijevi kraj brane i predstavljaja drugu fazu sanacije galerije.

Na dionici koja je iskopana, galerija je bila teško oštećena, tako da se prilikom iskopa srušila, a na samom početku, gdje je bio smješten eksploziv dio galerije i pristupni hodnik br. 3 bili su potpuno uništeni, foto 26 i 27. Na tom dijelu galerija i pristupni hodnik br. 3 obnovljeni su u potpunosti, foto 28 i 29.

Na središnjem dijelu brane, koji nije uklonjen, galerija je od sta: 0+91,50 do sta: 1+16,30 teško oštećena i u potpunosti ispunjena glinom i filtrarskim materijalom. Na tom dijelu primjenjen je TIP-2 sanacije podgrađivanjem i izvođenjem obloge od mlaznog betona, foto 16.

Od sta: 1+16,30 do sta: 1+33,00 galerija je bila potpuno srušena i tu je primjenjen TIP-3 sanacije, podgrađivanje čeličnim lukovima i platicama te izvođenje betonske obloge debljine 80 cm.

Na dionici od sta: 0+91,50 do sta: 1+33,00 graditelji su se sretali s istim problemima kao i na dionici od sta: 2+77,00 do sta: 1+33,00.



Foto 24. Dio djelomično razrušene galerije na desnom kraju brane



Foto 25. Dio obnovljenog pristupnog hodnika br. 1



Foto 26. Srušeni dio galerije na lijevom boku brane

26. lipnja 1995 u potpunosti je završena sanacija galerije do sta: 1+24,00. Nakon toga je počeo iskop s obje strane galerije, s lijeve od sta: 1+24,00 i s desne od sta: 1+33,00. Graditelji su se sreli na sta: 1+28,00 gdje su 6. prosinca 1995 godine spojeni desni i lijevi dio galerije, foto 33. Betoniranje zadnjih dionica završeno je 24. prosinca 1994 godine, foto 35 i 36.

Kontaktno injektiranje

Nakon završene sanacije galerije obavljeno je kontaktno injektiranje čija je svrha bila ostvarivanje kontakta između glinene jezgre i galerije te učvršćivanje ispucale obloge galerije prvenstveno u području svoda. Ta problematika je opširno obrađena u posebnom članku u ovoj knjizi.



Foto 27. Razrušena galerija na lijevom kraju brane



Foto 28. Odnova injekcijske galerije na lijevom kraju brane



Foto 29. Obnova injekcijske galerije na lijevom kraju brane



Foto 30. Djelomično zatrpana obnovljena galerija



Foto 31. i 32. Obnova galerije podgrađivanjem i mlaznim betonom
s lijevog kraja brane



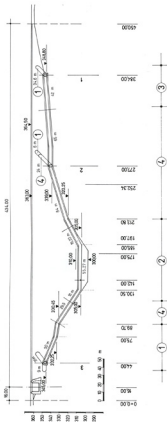
Foto 33. Proboj galerije



Foto 34. Pogled kroz probijenu galeriju na najdublji dio galerije u središnjem dijelu



Foto 35. i 36. Spajanje zadnjih dijonica galerije



LEGENDA

1. OBRNOVLJENO PUMPANIM BETONOM U OTVORENOM ISKOPU 130,60 m
2. OBRNOVLJENO PUMPANIM BETONOM, TUNELSKI TIP-3 87,47 m
3. PUMPANIM BETONOM OBRNOVLJENA KALOTA U OTVORENOM ISKOPU NA DESNOM BOKU BRANE 42,00 m
4. OBRNOVLJENO MLAZNIM BETONOM, TUNELSKI TIP-2 202,90 m

Šifra 9. Prikaz načina sanacije injekcijske galerije po dionicama

KOLIČINE RADOVA

Ukupno je obnovljeno 462,57 m galerije i pristupnih hodnika od toga

- betonom u otvorenom iskopu:	130,60 m
- betonom tunelski TIP-3	87,47 m
- betonom obnovljenog svoda u otvorenom iskopu na desnom kraju	42,00 m
- mlaznim betonom tunelski TIP-2	202,50 m,

Iskopano je i odvećeno iz galerije 1840 m³ različitog materijala; gline, filtrarskog materijala, betonskih blokova itd.

Od čađe je očišćeno 1.566 m² unutrašnjih površina galerije.

Ugrađeno je

- zvonastih čeličnih lukova	4.700 m
- armaturnih mreža Q-131	3.265 m ²
- rebraste armature 400/500	12.800 kg
- betona MB-30	2.100 m ³
- mlaznog betona	1.730 m ²

ZAKLJUČAK

Sanacija injekcijske galerije u brani Peruća predstavljala je najteži i u pogledu sigurnosti radnika najriscantniji posao, koji se odvijao u iznimno teškim uvjetima uz velike napore svih sudionika u poslu i koji je uspješno završen bez ijednog incidenta.

Nakon izvršenog kontaktnog injektiranja praktički nema procjeđivanja u galeriju, a nisu vidljive deformacije, pukotine i sl. što navodi na zaključak da je sanacija galerije uspješna.

INJEKCIJSKI RADOVI KOD SANACIJE BRANE

Doc.dr.sc. JOSIP RUPČIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj projekta

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d.

ZAGREB

NENAD KEZIĆ, dipl.ing.geol.

Nadzorni inženjer

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.

SPLIT

SAŽETAK

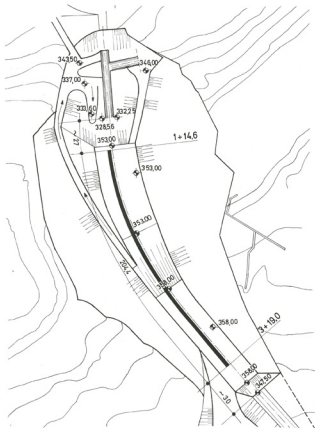
Opisani su injekcijski radovi koji su imali osnovni cilj sanirati eventualno oštećene dijelove injekcijske zavjese ispod brane, zapuniti pukotine i šupljine u raspucaloj betonskoj oblozi galerije, ostvariti vododrživi kontakt između betonske obloge galerije i temeljne stijene odnosno postojeće glinene jezgre, postići kontinuitet dijafragme kao vododrživog elementa brane do injekcijske zavjese, te ostvariti što kvalitetniju vezu između novoizgrađene jezgre i temeljne plohe brane.

Ovi su radovi su uspješno izvedeni, budući količina procjedne vode u injekcijsku galeriju kod vodostaja u jezeru na koti 353 m n.m., što predstavlja 85% najvećeg hidrostatskog pritiska, iznosi oko 0,3 l/s.

UVOD

Svestrana primjena injektiranja kao suvremene građiteljske metode poboljšanja mehaničkih svojstava dijelova građevine ili tla došla je do punog izražaja i na sanacijskim radovima na brani Peruća.

Injektiranje jezgre brane cementno-bentonitnom suspenzijom u cilju smanjenja opasnosti od gubitka isplake, te povećanja otpornosti na smicanje stranica rova prilikom izvedbe vododržive dijafragme obrađeno je u članku "Injektiranje jezgre brane".



Slika 1. Situacija injekcijske zavjese

U ovom se članku stoga obrađuju ostale primjene injektiranja, a to su:

- sanacija postojeće injekcijske zavjese ispod brane i injektiranje kontaktne plohe injekcijske galerije i temeljnog tla
- injektiranje miniranjem dezintegrirane betonske obloge injekcijske galerije i kontakta obloge sa stijenom odnosno glinenom jezgrom
- injektiranje spoja dijafragme i temeljne stijene odnosno injekcijske zavjese

SANACIJA POSTOJEĆE INJEKCIJSKE ZAVJESE ISPOD BRANE

Hidrogeološki odnosi na pregradnom profilu, u cilju ostvarenja akumulacijskog jezera, zahtijevali su izvedbu injekcijske zavjese značajnih dimenzija.

U kanjonu Cetine, ispod brane, izvedena je troredna zavjesa dužine 450 m, dubine 200 m. U produženju pregradnog profila Cetine izvedene su dvoredne i jednoredne zavjese, i to na lijevom krilu dužine 570 m, dubine 150 m, a na desnom dužine 580 m i dubine 100 m, sl. 1. Prema tome ukupna dužina zavjese iznosi 1.600 m, a ukupna površina oko 260.000 m². Za njezinu izvedbu izbušeno je oko 164.000 m bušotina od kojih je 140.000 injektirano. Utrošeno je 51.393 t suhe tvari sastavljene od gline, cementa, bentonita, sode i finog dolomitnog pijeska. Prosječni utrošak injekcijske smjese iznosio je 368 kg na jedan metar injektirane bušotine, odnosno 198 kg po m² injekcijske zavjese.

Kontrola gubitaka vode iz akumulacijskog jezera pokazala je da procjeđivanje iznosi oko 0,7 m³/s, što predstavlja 1,7% srednjeg godišnjeg protoka rijeke Cetine na profilu brane. Na temelju ovog podatka može se zaključiti, da je zavjesa uspješno izvedena, te da je njom ostvarena vododrživost akumulacijskog jezera Peruća.

Prosječni utrošak injekcijske smjese prema klasifikaciji Deera (1976) pripada kategoriji visokih utrošaka karakterističnih za raspucale i vodopropusne stijene. Budući je brana minirana aktiviranjem eksploziva u injekcijskoj galeriji, postojala je opravdana bojazan, da je i integritet zavjese ispod brane narušen, iako je na tom dijelu izvedena troredna zavjesa s razmakom vanjskih redova zavjese od 5,5 m i razmakom bušotina u redovima od 4 m.

S ciljem da se dobije generalni uvid u stanje oštećenja provedena su ispitivanja vodopropusnosti zavjese ispod brane metodom Lugeona u 9 bušotina raspoređenih uzduž injekcijske galerije. Odabrana je dubina bušotina od 25 m kao prva aproksimacija dubine do koje je energija razvijena aktiviranjem eksploziva mogla uzrokovati ponovno otvaranje pukotinskih sustava, koji su injektiranjem prilikom izvedbe zavjese bili zatvoreni. Na sl. 2

prikazan je položaj bušotina uzduž brane i najveće vrijednosti vodopropusnosti izmjerene u pojedinoj bušotini. Rezultati pokazuju da se vodopropusnost zavjese kreće od 0,45 do 1,96 LU, odnosno u granicama kriterija koji je trebalo postići kod izvedbe zavjese, a taj je da vodopropusnost treba biti manja od 2 LU.

Na osnovi dobivenih podataka zaključilo se, da zavjesa generalno nije jače oštećena, ali isto tako da broj podataka ne može biti reprezentativan za cijelu dionicu zavjese dužine 450 m.

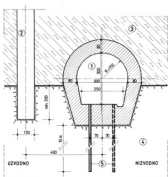
Radi toga se prišlo kontinuiranom injektiranju zavjese na cijeloj dužini brane i to na dubini 10 m od temeljne spojnice dna galerije, odnosno glinene jezgre i stijene na onom dijelu brane na kojem nije izvedena galerija.

Izvedba injektiranja

Injektiranje je provedeno u dva reda, uzvodnom i nizvodnom, postavljenih na međusobnom razmaku 1,4 m. Razmak između bušotina u pojedinom redu iznosi 4 m, ali su raspoređene tako, da njihov izmjenični razmak u redovima iznosi 2 m, sl. 3.

LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. DIAFRAGMA
3. POSTOJEĆA GLINENA JEZGRA
4. TEMELJNA STIJENA
5. INJEKCIJSKE BUŠOTINE



Slika 3. Raspored bušotina

Svaka bušotina injektirana je u dvije etaže dubine od 5 m. Na taj je način injektirano ne samo gornjih 10 m zavjese već i kontakt betonske obloge dna galerije i temeljne stijene, za koji se moglo sa dovoljnom sigurnošću pretpostaviti da je miniranjem oštećen.

Osim toga na desnom kraju brane koji je rekonstruiran injektirana je temeljna spojnica glinene jezgre i stijene, sta: 3+83 do sta: 4+67.

Injekcijski radovi na lijevom kraju brane izvan galerije, uključujući i spoj prelivne građevine s glinenom jezgrom bit će izvedeni nakon završetka rekonstrukcije brane i prelivne građevine.

Za injektiranje je upotrebljena cementno-betonitna suspenzija kod koje se suha tvar sastoji od 96% cementa i 4% bentonita, a početno razrjeđenje suhe tvari i vode u težinskom omjeru iznosi 1:3, što daje gustoću suspenzije od 1,11 kg/dm³.

Injektirano je pod tlakom od 6 bara, što odgovara tlaku najvišeg stupca vode u akumulacijskom jezeru, koji iznosi 61,5 m. Za primjenu većeg tlaka postojala je bojazan od narušavanja integriteta izvedene zavjese uslijed prekoračenja mehaničkih čvrstoća veznog materijala.

Za završetak injektiranja postavljen je kriterij, da utrošak suspenzije pri tlaku od 6 bara mora biti manji od 20 l kroz 20 minuta. Ukoliko se ovaj kriterij ne može postići, potrebno je smanjiti omjer miješanja suhe tvari i vode do 1:0,7.

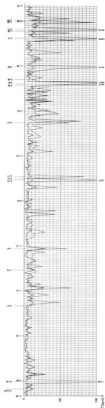
Analiza rezultata injektiranja

Izvedeno je 220 bušotina dužine 2.198 m i utrošeno 60.153 kg cementa i bentonita.

Kriterij završetka injektiranja zadovoljen je na svim bušotinama u obje etaže. Najveći utrošak suspenzije na kraju injektiranja u **donjoj etaži** iznosio je 12 litara kroz 20 minuta i to na bušotini, sta: 4+41, na kojoj je i registriran najveći utrošak suspenzije u donjim etažama od 5.944 litre, odnosno 358 kg suhe tvari po metru bušotine.

Prilikom injektiranja **gornjih etaža** najveći utrošak na kraju injektiranja iznosio je 8 litara kroz 20 minuta i to na bušotini, sta: 3+81, na kojoj je registriran i najveći utrošak suspenzije u gornjim etažama od 9.095 litara, odnosno 959 kg suhe tvari po metru bušotine.

Rezultati injektiranja u obliku srednjih utrošaka suhe tvari T (kg) po metru bušotine, prikazani su na sl. 4 i to posebno za donju odnosno gornju etažu injektiranja, linije 1 i 2.



LEGENDA

1. DIFRAKCIJA
2. INJEKCIJSKA GALERIJA
3. PRISTUPNI TUNEL BROJ 1
4. PRISTUPNI TUNEL BROJ 2
5. PRISTUPNI TUNEL BROJ 3
6. PRELJEVNA GRADEVINA

— DONJA ETAŽA
 --- GORNJA ETAŽA

Slika 4. Sanacija injekcijske zavjese ispod brane

Na donju etažu otpada 1.100 m dužina bušotina i 26.559 kg cementa i bentonita, pa prosječni utrošak suhe tvari iznosi 24,14 kg po metru injektirane donje etaže. Iz dijagrama, sl. 4 linija 1, može se zaključiti da su prosječni utrošci relativno mali i ujednaženi, što potvrđuje rezultate ispitivanja vodopropusnosti, da zavjesa miniranjem nije oštećena.

Iznimka su bušotine na sta: 2+73, 3+81, 3+99, 4+31, 4+41 i 4+49 na kojima su registrirani utrošci jednaki ili veći od 200 kg suhe tvari po metru injektirane etaže s najvećom vrijednošću od 357,83 kg.

Ove vrijednosti uvjetuju i visoku vrijednost koeficijenta varijacije prosječnih utrošaka suhe tvari u donjoj etaži koja iznosi $c_v = 1,92$. Međutim visoka pozitivna vrijednost koeficijenta asimetrije $c_s = 4,91$ pokazuje, da je učestalost prosječnih utrošaka manjih od srednje vrijednosti svih bušotina donje etaže značajna. Ovo je posebno evidentno na dijelu brane na kojem je izvedena galerija s iznimkom etaža na sta: 2+73 i 3+81.

Izrazito povećani utrošak injekcijske suspenzije na sta: 3+81 može se objasniti činjenicom, da je na ovom mjestu brana bila minirana, te je energija razvijena eksplozijom oštetila temeljnu stijenu, a time i zavjesu, razrušila galeriju i uzrokovala formiranje kratera na brani promjera 20-25 m, dubine 6-7 m. Razlog oštećenju temeljnog tla vjerojatno je taj, što je galerija na ovom mjestu ukopana 2-3 m u stijenu, na koju su se prenijeli elastični seizmički valovi inicirani eksplozijom.

Isti efekti nisu registrirani na mjestu miniranja brane na lijevom kraju, sta: - 0+40, jer na tom dijelu galerija nije ukopana u stijenu, te se je energija eksplozije prenijela na tijelo brane kao medij znatno manje krutosti u odnosu na stijenu i uzrokovala formiranje kratera promjera 25-30 m dubine preko 10 m.

Ovo objašnjenje može se primijeniti i za male utroške suspenzije na srednjem najvišem dijelu brane, sta: 1+32 do 1+72, na kojem je u galeriji također aktiviran eksploziv, ali je galerija temeljena na betonskom bloku debljine 7-8 m. Eksplozija je potpuno razrušila bočne strane i svod galerije, a prostor galerije ispunila je glina iz jezgre. Na krani brane efekti eksplozije odrazili su se u obliku inicijalnog slijeganja na dužini oko 50 do 60 m s maksimalnom veličinom oko 2-3 m.

Prosječni utrošci injekcijske suspenzije na dijelu brane na kojem nije izvedena injekcijska galerija, sta: 3+85 do 4+67, uzrokovani su degradacijom stijene prilikom iskopa za temeljenje jezgre brane.

Na gornjoj etaži utrošeno je 33.594 kg cementa i bentonita na 1.098 m bušotina. Prema tome prosječni utrošak suhe tvari iznosi 30,59 kg po injektiranom metru gornje etaže te je za oko 27% veći u odnosu na donja. Ova razlika može se objasniti povećanim

utroškom injekcijske suspenzije na kontaktu temeljne stijene i betonske obloge galerije, koji je miniranjem brane narušen.

Iz dijagrama prosječnih utrošaka injekcijske suspenzije, sl. 4, može se zaključiti da su utrošci u gornjoj etaži, linija 2, manje ujednačeni od utrošaka u donjoj, linija 1, što pokazuje i veća vrijednost koeficijenta varijacije koji iznosi $c_v = 2,40$. Velika vrijednost koeficijenta asimetrije od $a_s = 9,97$ pokazuje veliku učestalost utrošaka manjih od srednje vrijednosti za sve bušotine gornje etaže.

Izrazito veliki prosječni utrošci su na sta: 0+49 i 3+81 sa vrijednostima od 327,86 odnosno 958,51 kg po metru bušotine. Budući je na ovim mjestima aktiviran eksploziv najveći dio ovih količina sigurno otpada na injektiranje kontakta betonske obloge galerije i temeljne stijene, koji je miniranjem ozbiljno oštećen.

Na osnovi ovalovog razmatranja iz dijagrama prosječnih utrošaka injekcijske suspenzije u gornjoj etaži evidentna su mjesta oštećenja kontakta betonske obloge galerije i temeljne stijene, koja su posebno izražena od sta: 1+35 do 1+55, a to je lokacija miniranja središnjeg dijela brane, te na sta: 1+97, 2+77 i 3+37.

Povećani utrošci injekcijske suspenzije na dijelu brane na kojem nije izvedena injekcijska galerija, sta: 3+85 do 4+67, uzrokovani su degradacijom stijene prilikom iskopa za temeljenje jezgre brane, te popunjavanjem šupljina na kontaktu jezgre i temeljne stijene, koje nisu bile ispunjene glinenom prilikom njezine ugradnje.

Zaključak

Rezultati injektiranja pokazali su da injekcijska zavjesa miniranjem brane nije oštećena, a mjesta na kojima je bio narušen kontakt betonske obloge galerije i temeljne stijene uspješno su sanirana.

Međutim, da bi se dobio bolji uvid u stanje zavjese na mjestima povećanih utrošaka predviđeno je provesti dodatno injektiranje na većoj dubini i uz veće tlakove.

Na sta: 2+75 predviđeno je izvesti bušotinu dubine 20 m i injektirati maksimalnim tlakom od 15 bara, a na sta: 3+79, 3+99, 4+31; 4+39 i 4+51, budući je hidrostatski tlak akumulirane vode manji od 14 m vodnog stupca predviđene su bušotine dubine 15 m i maksimalni tlak injektiranja od 10 bara.

INJEKTIRANJE IZA BETONSKE OBLOGE INJEKCIJSKE GALERIJE

Injekcijska galerija obnovljena je od trećeg pristupnog hodnika na lijevom do prvog pristupnog hodnika na desnom kraju brane u dužini oko 365 m, sl. 8.

Generalno su primijenjena dva tipa rekonstrukcije galerije.

Na dijelu na kojem je betonska obloga galerije potpuno uništena izvedena je nova obloga po cijelom opsegu ili je sidrima vezana na ostatke bočnih stranica odnosno donje ploče stare obloge. Na ovaj je način obnovljeno oko 186 m galerije, sl. 5 i 6.

Na dijelu na kojem je betonska obloga popucala, ali je generalno zadržala unutrašnji oblik galerije, rekonstrukcija je provedena podupiranjem čeličnim lukovima na prosječnom razmaku 65 cm, te izvedbom sloja mlaznog betona debljine 15 cm, koji je dvostrano armiran čeličnim mrežama. Na ovaj je način obnovljeno oko 179 m galerije, sl. 7.

Svrha injektiranja

Injektiranjem iza betonske obloge galerije trebalo je ostvariti nepropusni spoj između glinene jezgre, odnosno stijene i betona galerije u cilju spečavanja procjeđivanja vode i razvoja procesa unutrašnje erozije.

U odnosu na primijenjeni tip rekonstrukcije galerije svrha injektiranja bila je dvojaka.

Na dijelu na kojem je galerija rekonstruirana novom betonskom oblogom injektiranjem je trebalo popuniti šupljine između obloge i glinene jezgre koje betonom nisu zapunjene i tako ostvariti što nepropusniji spoj između jezgre i galerije.

Osim toga, na dijelu na kojem je nova obloga vezana na bočne zidove stare galerije, injektiranjem je trebalo ostvariti što bolju vezu stijene sa dijelom stare obloge galerije za koju se pretpostavljalo da je miniranjem narušena.

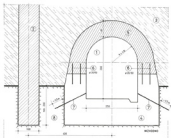
Na dijelu na kojem je galerija rekonstruirana čeličnim lukovima i mlaznim betonom, injektiranjem je trebalo zapuniti pukotine i šupljine u staroj oblozi, ali i ostvariti što nepropusniji spoj betona i glinene jezgre na cijelom opsegu galerije.

Osim na lijevom kraju, na dionici dužine oko 16 m, sta: 0+33 do 0+49, injektiranje je provedeno na cijeloj dužini galerije.

Početna dionica nije injektirana radi toga, što na tom dijelu galerija nije ukopana u stijenu, pa je bilo moguće ugraditi glinu tako, da se postigne dovoljno nepropusan spoj jezgre brane i betona galerije.

LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. DIJAFRAGMA
3. NOVA GLINENA JEZGRA
4. POSTOJEĆI BETON
5. NOVI BETON
6. SIDRA
7. INJEKCIJSKE BUŠOTINE
8. TEMELJNA STIJENA



Slika 5. Raspored injekcijskih bušotina TIP 1
sta: 0+49,00 - 0+91,50 i sta: 3+42,00 - 3+85,00

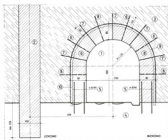
Izvedba injektiranja

Injektiranje iza betonske obloge galerije provedeno je u poprečnim profilima na međusobnom razmaku od 2 m.

Na dionicama od sta: 0+49 do 0+91,5 te od sta: 3+42 do 3+85 na kojima je galerija rekonstruirana izvedbom nove obloge, injektiran je samo spoj stare obloge i stijene kroz dvije bušotine izvedene po jedna na uzvodnoj i nizvodnoj strani galerije, tip 1, sl. 5.

Novi dio betonske obloge nije injektiran, jer je na ovim dionicama brana rekonstruirana ugradnjom nove glinene jezgre, što je omogućilo kvalitetnu izvedbu spoja betona galerije i jezgre brane.

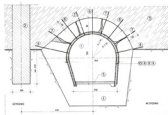
Na dionicama od sta: 0+91,5 do 1+16,3 te od sta: 2+00 do 3+42 na kojima je galerija rekonstruirana čeličnim lukovima i mlaznim betonom, injektiranje je izvedeno kroz pet odnosno šest bušotina raspoređenih po opsegu bočnih stranica i svoda galerije, tip. 2, sl. 7,



LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. DIJAFRAMA
3. POSTOJEĆA GLINENA JEZGRA
4. POSTOJEĆA BETONSKA PLOČA
5. SIDRA ϕ 20/50 cm
6. NOVI BETON GALERIJE
7. INJEKCIJSKE BUŠOTINE
8. INJEKCIJSKE BUŠOTINE U SUSJEDNIM PROFILIMA
9. ČELIČNE PLATICE
10. ČELIČNI LUKOVI

Slika 6. Raspored injeksijskih bušotina TIP 1 sta: 1+16,30 - 2+00,00



LEGENDA

1. INJEKCIJSKA GALERIJA
2. DIJAFRAMA
3. POSTOJEĆA GLINENA JEZGRA
4. POSTOJEĆI BETON GALERIJE
5. RAZUPORA NPI 100
6. INJEKCIJSKE BUŠOTINE
7. INJEKCIJSKE BUŠOTINE U SUSJEDNIM PROFILIMA
8. ČELIČNA MREŽA Q-131
9. ČELIČNI LUKOVI
10. MLAŽNI BETON

Slika 7. Raspored injeksijskih bušotina TIP 2 sta: 2+00,00 - 3+42,00

Isti raspored bušotina primjenjen je i za **injektiranje srednjeg dijela, sta: 1+16,3 do 2+40**, na kojem je galerija rekonstruirana izvedbom nove obloge, tip 2. sl. 6, i to radi toga što je na ovom dijelu trebalo ispuniti sve šupljine između nove obloge i stare glinene jezgre, koje kod betoniranja nisu popunjene. Osim toga, ova se dionica galerije nalazi u području najvećih hidrostatskih pritisaka, te je bilo potrebno ovaj spoj izvesti što kvalitetnije, kako bi se spriječilo procjeđivanje i razvoj procesa unutrašnje erozije.

Injektiranje je izvedeno cementno-bentonitnom suspenzijom, kod koje se suha tvar sastoji od 96% cementa i 4% bentonita, a početno razrjeđenje suhe tvari i vode u težinskom omjeru iznosi 1:2, što daje gustoću suspenzije od 1.16 kg/dm³.

Injektiranje je provedeno pod tlakom od 3 bara. Završni kriterij injektiranja bio je, da utrošak suspenzije pri tlaku od 3 bara mora biti manji od 20 l kroz 20 minuta. Ukoliko se ovaj kriterij ne može postići, potrebno je smanjiti omjer miješanja suhe tvari i vode do 1:0,7.

Analiza rezultata injektiranja

Budući da je svrha injektiranja na pojedinim dionicama bila različita, analiza rezultata provedena je prema tipu obloge kojim je rekonstruirana galerija i rasporedu bušotina u injekcijskim profilima.

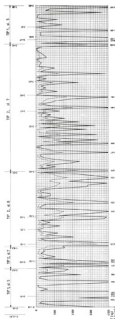
Utrošci suhe tvari T (kg) po profilima injektiranja prikazani su dijagramom na sl. 8.

Na dionicama na kojima je injektiran **kontakt stare obloge i stijene, sta: 0+49 do 0+91,5 i sta: 3+42 do 3+85**, injektiranje je izvedeno na 42 profila. Utrošeno je 102.652 kg cementa i bentonita, pa prosječni utrošak suhe tvari po profilu iznosi 2444,1 kg.

Utrošci po profilima su neujednačeni s tendencijom uštalalih utrošaka manjih od prosječnog. Ovaj zaključak slijedi iz veličina koeficijenta varijacije i asimetrije, koji iznose $c_v = 1,41$ i $q = 2,02$. Najveći utrošak u profilu injektiranja iznosi 16.412 kg na sta: 3+47, a najmanji 21 kg na sta: 3+61.

Uzrok ovako velikim utrošcima je ozbiljno oštećena stijena, pa prema tome i potpuno narušen kontakt između betonske obloge i stijene.

Kriterij završetka injektiranja je na svim bušotinama zadovoljen. Najveći utrošak suspenzije na kraju injektiranja iznosio je 10 l kroz 20 minuta uz progušćenje suspenzije na omjer 1:1,5, a registriran je na profilu sta: 0+61.



LEGENDA

1. DUAIFRAGMA
2. INJEKCIJSKA GALERIJA
3. PRISTUPNI TUNEL BROJ 1
4. PRISTUPNI TUNEL BROJ 2
5. PRISTUPNI TUNEL BROJ 3
6. PRELJEVNA GRAĐEVINA

- UKUPNI UTROŠAK SUHE
TVARI PO PROFILU [kg]
- - - UKUPNI UTROŠAK SUHE
TVARI U PROFILU PO METRU
BUŠOTINA [kg/m]

Slika 8. Injektiranje iz betonske obloge galerije

Na dionicama na kojima je injektirana stara raspucana obloga galerije i njezin kontakt sa postojećom glinenom jezgrom, sta: 0+91,5 do 1+16,3 i sta: 2+00 do 3+42, injektiranje je izvedeno na 86 poprečnih profila. Utrošeno je 111.115 kg cementa i bentonita, pa prosječni utrošak po injektiranom profilu iznosi 1.292,03 kg.

Gotovo dvostruko manji prosječni utrošak po profilu u odnosa na dionice kod kojih je injektiran kontakt stare obloge i stijene može se objasniti zapunjavanjem šupljina u staroj betonskoj oblozi mlaznim betonom prilikom rekonstrukcije galerije.

I na ovim su dionicama utrošci po profilima neujednačeni s tendencijom učestalijih utrošaka manjih od prosječnog, što pokazuju koeficijenti varijacije i asimetrije, koji iznose $c_v = 1,30$ i $\alpha_1 = 2,08$. Najveći utrošak u profilu injektiranja iznosi 6.736 kg na sta: 0+99, a najmanji 33 kg na sta: 2+85.

Kriterij završetka injektiranja zadovoljen je na svim bušotinama. Najveći utrošak suspenzije na kraju injektiranja iznosio je 14 l kroz 20 minuta na sta: 2+67 i to bez proglašavanja suspenzije.

Na srednjem dijelu galerije, na kojem je injektiran kontakt nove obloge i stare glinene jezgre, sta: 1+16,3 do 2+00, injektiranje je izvedeno na 41 profilu uz prosječni utrošak od 1.948,93 kg suhe tvari po profilu. Ukupno je utrošeno 79.906 kg cementa i bentonita.

Razlog za veliki prosječni utrošak po profilu sa šupljine između betona i jezgre, koje prilikom betoniranja nisu popunjene. S obzirom na izuzetno teške uvjete izvođenja betonske obloge ovakvi rezultati injektiranja bili su očekivani.

I na ovoj je dionici injektiranja evidentna neujednačenost utrošaka suspenzije po profilima uz tendenciju učestalijih utrošaka manjih od prosječnog, što pokazuju koeficijenti varijacije i asimetrije, koji iznose $c_v = 1,01$ i $\alpha_1 = 1,94$. Najveći utrošak u profilu registriran je na sta: 1+19 i iznosi 10.270 kg, a najmanji 106 kg na sta: 1+35.

Kriterij završetka injektiranja na svim je bušotinama zadovoljen. Najveći utrošak suspenzije na kraju injektiranja iznosio je 10 l kroz 20 minuta i to bez proglašavanja suspenzije a registriran je na sta: 1+49.

Zaključak

Injektiranje je izvedeno na 169 profila, na 787 bušotina ukupne dužine 393,5 m. Utrošeno je 293.673 kg cementa i bentonita, pa prosječni utrošak po injektiranom profilu iznosi 1.737,41 kg, po bušotini 373,16 kg, a po metru bušotine 746,31 kg.

Za sve injektirane dionice bez obzira na tip obloge kojom je rekonstruirana galerija karakteristični su veliki rasponi između najvećeg i najmanjeg utroška po profilu, varijacije utroška susjednih profila i tendencija učestalijih utroška manjih od prosječnog. Ove su karakteristike praktično jednake za sve injektirane dionice, što proizlazi iz veličina koeficijenta varijacija i asimetrije koji se za pojedine dionice vrlo malo razlikuju.

Veliki rasponi između najvećeg i najmanjeg utroška kao i varijacije utroška između profila injektiranja mogu se objasniti malim razmakom profila, uslijed kojeg je došlo do međusobnog preklapanja dosega injektiranja u susjednim profilima. Na osnovi navedenog moglo bi se zaključiti, da je razmak profila injektiranja mogao biti veći, te bi u tom slučaju varijacije utroška po profilima bile manje, a veličine oštećenja obloge te kontakta obloge i stijene odnosno glinene jezgre uzduž galerije bolje izražene.

INJEKTIRANJA SPOJA DIJAFRAGME I TEMELJNE STIJENE

Budući je miniranjem brane teško oštećena glinena jezgra, rješenjem sanacije predviđeno je na središnjem dijelu brane izvesti u glinenoj jezgri dijafragmu od plastičnog betona. Time dijafragma i glinena jezgra predstavljaju na ovom dijelu vododrživi element brane.

Dijafragma je izvedena od sta: 0+87,70 do 3+48, uzvodno od osi galerije na udaljenosti od 4 m. Dužina dijafragme je 261,15 m, debljina 1 m, a površina 8.505 m². Najveća dubina dijafragme je na središnjem dijelu brane i iznosi 51,5 m, a najmanja na njezinom desnom kraju i iznosi 12,9 m. Minimalna dubina temelja dijafragme u stijeni je 2 m.

Svrha injektiranja

Da bi se postigao kontinuitet dijafragme kao vododrživog elementa brane provedeno je injektiranje stijene između galerije i dijafragme, te ispod temeljne plohe dijafragme.

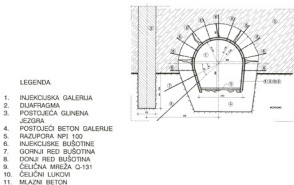
Na taj je način stijena konsolidirana u smislu zatvaranja prirodnih pukotina, ali i onih koje su nastale iskopom rova za dijafragmu hidrauličkim rezačem, te ostvaren vododrživi spoj dijafragme i injekcijske zavjese.

Izvedba injektiranja

Injektiranje je provedeno iz galerije kroz dva reda bušotina, **gornjim i donjim**, koje su pod varijabilnim kutevima, ovisno o dubini temelja dijafragme, nagnute prema horizontali, sl. 9. Razmak bušotina gornjeg i donjeg reda uzduž dijafragme je 2 m.

Injektiranje je provedeno cementno-bentonitom suspenzijom, kod koje se suha tvar sastoji od 96% cementa i 4% bentonita, a početno razrjeđenje suhe tvari i vode u težinskom omjeru iznosi 1:2, što daje gustoću suspenzije od 1,16 kg/dm³.

Gornji red bušotina injektiram je pod tlakom od 4 bara, a donji red pod tlakom od 5 bara.

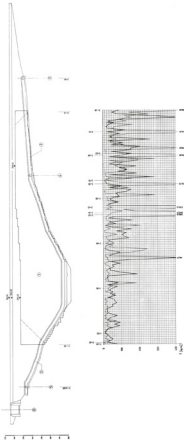


Slika 9. Raspored injektiranih bušotina

Za završetak injektiranja postavljen je kriterij, da utrošak suspenzije pri tlaku od 4 odnosno 5 bara mora biti manji od 20 l kroz 20 minuta. Ukoliko se ovaj kriterij ne može postići, treba smanjiti omjer miješanja suhe tvari i vode do 1:0,7.

Analiza rezultata injektiranja

Injektiranje je provedeno na 131 profilu, pri čemu dužina gornjih bušotina iznosi 163,2 m, a donjih 358,2 m. U gornjim bušotinama utrošeno je 20.708 kg, a u donjim 27.294 kg cementa i bentonita iz čega proizlazi prosječni utrošak suhe tvari po metru gornjih bušotina od 126,89 kg, a donjih 76,2 kg.



LEGENDA

1. DIAFRAGMA
2. INJEKCIJSKA GALERIJA
3. PRISTUPNI TUNEL BROJ 1
4. PRISTUPNI TUNEL BROJ 2
5. PRISTUPNI TUNEL BROJ 3
6. PRELJEVNA GRADEVINA

INJEKCIJSKE BUŠOTINE

— GORNI RED
 --- DONJI RED

Slika 10. Injektiranje spoja dijafragme i temeljne stijene

Povećani utrošci u gornjim bušotinama od 1,67 puta u odnosu na donje mogu se objasniti redoslijedom injektiranja, budući su najprije injektiranje gornje, a zatim donje bušotine, ali i većom raspucalošću temeljne stijene u području gornjih bušotina.

Kriterij završetka injektiranja zadovoljen je na svim bušotinama s time, da je najveći utrošak suspenzije na kraju injektiranja registriran na profilu sta: 2+66 u veličini od 10 l kroz 20 minuta bez progulčenja suspenzije.

Prosječni utrošci suhe tvari T (kg) po metru bušotina gornjeg i donjeg reda prikazani su dijagramom na sl. 10.

Prosječni utrošci po metru bušotine **gornjeg reda** variraju od 7,17 kg na sta: 2+70 do 5.036,4 kg na sta: 2+40. Izuzetno veliki utrošci registrirani su i na profilima sta: 2+32 i 2+34, u iznosu od 2.269,38 i 2.842,33 kg po metru bušotine. Velike varijacije utroška pokazuje i veličina koeficijenta varijacije koji iznosi $c_v = 3,47$. Međutim karakteristično je, da je učestalost utroška manjih od prosječnog značajna, budući je veličina koeficijenta asimetrije izuzetno velika i iznosi $\alpha_3 = 7,40$.

Prosječni utrošci po metru bušotine **donjeg reda** variraju od 3,08 kg na sta: 0+90 do 1584,65 kg na sta: 2+98. Izuzetno veliki utrošci registrirani su i na profilima injektiranja na sta: 2+66, 3+24 i 3+48 u iznosu od 1.330,70; 1.146,30 i 889,95 kg po metru bušotine. Varijacije utroška pokazuje i velika vrijednost koeficijenta varijacije od $c_v = 2,37$, a značajno veliku učestalost utroška manjih od prosječne velika vrijednost koeficijenta asimetrije od $\alpha_3 = 4,98$.

Zaključak

Za oba reda bušotina karakteristična je značajna varijacija prosječnih utroška suhe tvari po metru bušotine s time, da prosječni utrošci imaju tendenciju povećanja od lijevog prema desnom kraju dijafragme. Također je za oba reda bušotina karakteristično, da je učestalost utroška manjih od prosječnog značajna.

Evidentno je, da se ekstremno veliki utrošci u gornjem i donjem redu injektiranja ne podudaraju.

ZAKLJUČAK

Osnovna svrha injekcijskih radova bila je sanirati eventualno oštećene dijelove injekcijske zavjese ispod brane, zapuniti pukotine i šupljine u raspucaloj betonskoj oblozi galerije, ostvariti vododrživi kontakt između betonske obloge galerije i temeljne stijene, odnosno postojeće glinene jezgre, postići kontinuitet dijafragme kao vododrživog elementa brane do injekcijske zavjese, te ostvariti što kvalitetniju vezu između novo izgrađene jezgre i temeljne plohe brane.

Na taj se način sprečava procjeđivanje na kontaktnim ploham različitih materijala, a time i razvoj procesa unutarne erozije, pa je neobično važno da se ovi radovi izvedu što uspješnije u smislu postizanja vododrživih spojeva. Radi toga je najbolji pokazatelj postignutog rezultata količina procjedne vode.

Injekcijska galerija na brani Peruća izvedena je na oko 79% njezine dužine u kruni i to na dijelu, na kojem su hidrostatski pritisci najveći i kreću se od 12,5 do 56,5 m. Radi toga je količina procjedne vode u galeriji kod najvišeg vodostaja u jezeru jedan od najboljih pokazatelja s kojim su uspjehom izvedeni ovi radovi.

Kod vodostaja u jezeru na koti 353 m n.m. ukupne procjedne količine vode u galeriju procijenjene su sa 0,3 l/s. Budući da kod ovog vodostaja hidrostatski pritisak na najnižem dijelu brane iznosi oko 85% najvećeg hidrostatskog pritiska, a na najvišim pristupaćim hodnicima br. 1 i 3, 32% odnosno 45% najvećeg hidrostatskog pritiska, može se sa sigurnošću zaključiti, da je provedenim injekcijskim radovima u potpunosti ostvaren njihov osnovni cilj. Ovo tim više, što je procjedna količina vode u galeriji prije miniranja brane iznosila oko 1 l/s.

LITERATURA

- [1] "Filling materials for watertight cut-off walls", ICOLD Bulletin 51, International commission on Large Dams, Paris, France, 1985
- [2] Lombardi, G., "Grouting design and control using the GEN principle", Water Power & Dam construction, June 1993
- [3] Nonveiller, E., "Injektiranje, teorija i praksa", Školska knjiga Zagreb, 1989

IZVOĐENJE PRELJEVNE GRAĐEVINE I HIDROMECHANİČKA OPREMA

DALIBOR BOJANIĆ, dipl.ing.građ.
Nadzorni inženjer
"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.
SPLIT
Doc.dr.sc. ANTE KRSTULOVIĆ, dipl.ing.
Nadzorni inženjer
EKONERG d.d.
ZAGREB

SAŽETAK

U radu su opisani građevinski radovi na preljevnj gradjevini. Navedeni su razlozi povećanja visine preljevne zapornice. Potom je dan kratki opis sustava hidromehaničke opreme. Ukratko je opisan pristup dimenzioniranju metalne konstrukcije zapornice.

Zahtjevi za velikom točnošću izvedbe i montaže zapornice nametnuli su osobit značaj sustavu osiguranja kvalitete.

IZVOĐENJE PRELJEVNE GRAĐEVINE

Prilikom miniranja brane Peruća 28. siječnja 1993. godine od strane bivše JNA, jedno od pet mjesta aktiviranja eksploziva bilo je neposredno uz desni zid preljevne gradjevine na lijevom kraju brane. Eksplozijom je uništen desni zid preljeva, zapornica i most preko preljeva, a na kruni brane uz preliv formiran je krater promjera 25-30 m, dubine oko 10 m. Učinak eksplozije bio je tako snažan, da su dijelovi bočnog zida preljeva porazbacani u krugu od 50 m, a jedan komad konstrukcije od 12 m³ pronađen je na 30 m od mjesta eksplozije. Most preko preljeva odabačen je na lijevu obalu, gdje je djelomično ostao visiti preko bočnog zida, foto 1.

Preljev je, kao evakuacijski objekt imao protočni kapacitet od 340 m³/s kod uspora na koti 361,20 m n.m. koji je bio reguliran zapornicom veličine 5,0 x 10,0 m.

Tijekom izrade projektne dokumentacije za sanaciju brane, provjerene su karakteristike poplavnih valova rijeke Cetine. Ustanovljeno je da je protočni kapacitet preljeva potrebno

povećati na 427,93 m³/s, kako bi se pri maksimalnom radnom vodostaju u akumulacijskom jezeru mogao evakuirati vodni val 10.000-godišnjeg povratnog razdoblja. Posljedica toga je povišenje poplavnog vodostaja za oko 1,5 m, što je zahtijevalo i povišenje krune brane, te zidova preljevne građevine s kote 363,00 m n.m. na 364,50 m n.m. Iz istog razloga trebalo je povećati visinu zapornice preljeva sa 5,0 na 7,0 m.



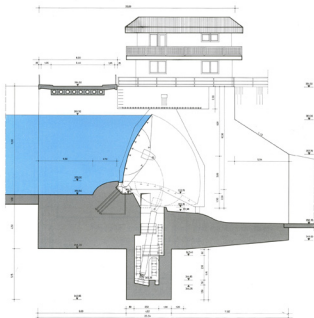
Foto 1. Preljevna građevina nakon miniranja

Projektom uklanjanja krajeva i krune brane bilo je predviđeno rušenje i uklanjanje betonskih dijelova preljevne građevine koji su uništeni eksplozijom.

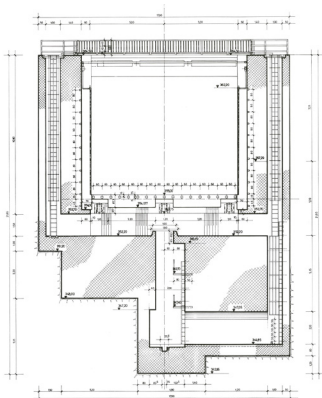
U prvoj fazi izvođenja radova na preljevu, ti su dijelovi uklonjeni. Nakon projektnog definiranja povišenja brane i preljeva, neophodno je bilo ukloniti i ubetonirane bočne štitove preljevne zapornice u desnom i lijevom zidu preljeva. Iz tog je razloga odlučeno da se postojeća betonska preljevna konstrukcija u potpunosti ukloni i izgradi nova u dužini od 25,54 m, zajedno sa novom zatvaračnicom na lijevom platou uz zid preljeva, te novim armirano-betonskim mostom preko preljeva, sl. 1 i 2.

Projekt "Sanacija preljevne građevine" izradio je Elektroprojekt d.d. Zagreb, 1995. godine.

Radovi na uklanjanja postojeće betonske konstrukcije preljeva intenzivirani su u siječnju 1995. godine. Uklanjanje konstrukcije obavljalo se bušenjem pištoljima, miniranjem, rezanjem armature i čeličnih ubetoniranih dijelova, te utovarom i odvozom na gradilišnu deponiju. Nakon uklanjanja betonske konstrukcije, prišlo se iskopu u stijeni okna hidrauličkog cilindra zapornice i ploču preljeva.



Shika 1. Uzdužni presjek preljevne građevine



Slika 2. Poprečni presjek preljevne građevine kroz okno hidrauličkog cilindra i odzračna okna

U travnju 1995. godine završen je iskop i počelo je betoniranje okna cilindra i betonske konstrukcije preljeva, foto 2. Beton preljeva je MB-30 sa rebrastom armaturom RA 400/500. Betoniranje preljeva je podijeljeno u dvije faze: U prvoj se fazi betonira konstrukcija s otvorima za ugradnju hidromehaničke opreme. U ovoj se fazi u otvore ubetoniraju sidra i sidrene pločice na koje se kasnije zavaruje oprema. Druga faza je betoniranje otvora.



Foto 2. Iskopana građevinska jama preljeva i postavljanje armature okna cilindra

Najosjetljiviji dio radova na preljevnoj ploči bilo je postavljanje sidara i sidrenih ploča za ležajevе preljevne klapne, te betoniranje armiranobetonske grede na koju se prenosi opterećenje sa sidara i ležajeva klapne. Propisana tolerancija za ugradnju sidara bila je ± 5 mm. Geodetskom kontrolom prilikom postavljanja sidara, zatim neposredno prije i poslije betoniranja, osigurano je da su sidra ugrađena unutar dopuštenog odstupanja, foto 3.



Foto 3. Sídra i sidrene ploče ležaja preljevne klapne

Nakon završetka betoniranja ploče i praga preljeva, nastavilo se sa betoniranjem zidova preljeva s oknima za odraščivanje preljevnog mlaza. Na desnom zidu na spoju sa glinenom jezgrom brane izveden je betonski zid, da bi se ostvarila bolja veza betona i gline.

Istovremeno, sa napredovanjem radova na desnom zidu preljeva, ugrađivao se materijal u tijelo brane neposredno uz preljevnu građevinu, foto 4.

Do početka rujna 1995. godine završena je ugradnja prve faze betona preljevne građevine, te se prišlo izradi mosta preko preljeva i zatvaračnice. Ujedno su otpočeli radovi na montaži hidromehaničke opreme.

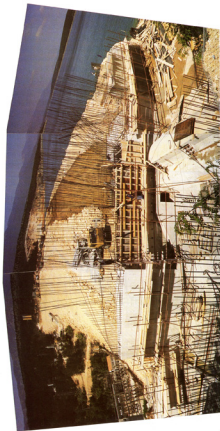


Foto 4. Pogled na desni zid i ploču preljeva sa nasipanjem brane u pozadini

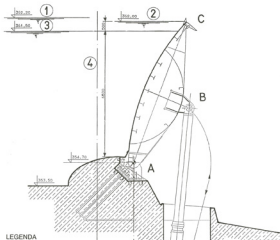
HIDROMEHANIČKA OPREMA

Metalna konstrukcija, kratki opis sustava

Kontrolirano prelijevanje vode iz akumulacijskog jezera omogućeno je sustavom preljevne zapornice.

Metalna zapornica širine 10 m na bokovima je opremljena gumenim betvama koje pritišću po cijeloj visini na bočne metalne stranice ubetonirane u bočne zidove preljevne građevine.

Oblik zapornice diktiran zahtjevima strujanja, ali osobito zahtjevima čvrstoće i krutosti dan je na slici 3.



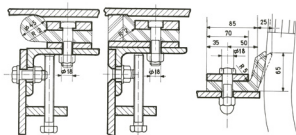
1. MAX. POPLAVNI VODOSTAJ
2. VRH ZAPORNICE
3. MAX. RADNI VODOSTAJ
4. OS KRUNE BRANE

Slika 3. Poprečni presjek zapornice u položaju "zatvoreno"

Rotacijom zapornice oko okretišta A (izvedenog sa tri ležaja duž širine zapornice) spušta se (ili diže) njen vrh C (opremljen sjekačima preljevnog mlaza) preko kojega se voda preljeva iz akumulacijskog jezera.

Rotacija zapornice se izvodi preko hidrauličkog cilindra/klipnjače što djeluje u hibanju B prilikom "dizanja" - zatvaranja zapornice. Spuštanje zapornice se obavlja kontrolirano pod djelovanjem tlaka vode i težine zapornice. Oštri zahtjevi funkcionalnosti u betvjenju (prepuštanje vode u zatvorenom položaju $\leq 0,05$ l/s po metru dužnom britevni površina) pretpostavlja pravilno i ravnomjerno naljezanje britevi po čitavom opsegu britevnog profila.

Karakteristični detalji brtvi na rubovima zapornice dani su na slici 4.

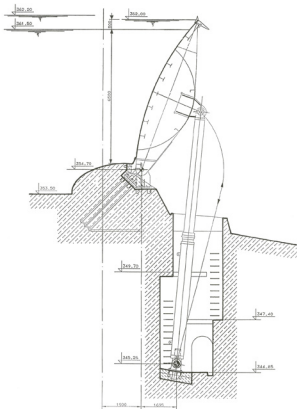


Slika 4. Detalji izvedbe brtvljenja

Spomenuti hidraulički cilindar smješten je u bunaru u simetrali prelijevnog polja iza praga prelijeva, sl. 5.

Osnovni tehnički podaci cilindra/klipnjače su:

Radni hod:	5265 mm
Maksimalna sila:	4030 kN
Masa:	8500 kg
Radni tlak u cilindru:	19 MPa (190 bara)



Slika 5. Prikaz zapornice s hidrauličkim cilindrom

Kontrolirano prelijevanje, odnosno upravljanje hodom klipnjače, izvodi se iz zatvaračnice gdje su smješteni: hidroagregati, elektomotori, pumpe, razvodnici, spremnik ulja, filteri ulja.

U zatvaračnici je i razvodni ormar preko kojeg se napajaju električnom energijom elektomotori, rasvjeta, grijanje/hlađenje, utičnice, signalizacija, mjerni instrumenti, odnosno obavlja se centralno upravljanje i nadzor postrojenja.

Bočni štitovi pecljevine zapornice, izrađeni od nehrđajućeg čelika, po kojima klizi, uz brtvljenje, okretna zapornica, opremljeni su i sustavom za grijanje. Sa unutarnje strane bočnih stranica, neposredno uz bočne štitove, ubetonirani su snopovi cijevi. Te će se cijevi ispuniti tekućinom sa niskom temperaturom leđišta, koja će se pomoću uronjenih grijača zagrijavati. Prijenosom topline na bočne štitove sprejčit će se moguće zaleđivanje, te omogućiti kvalitetno brtvljenje i u zimskim periodima.

Dimenzioniranje

Oprema je dimenzionirana za najnepovoljnije eksploatacijske uvjete. Pritom su korišteni propisi Din 19704 i Din 19705, što obrađuju hidraulične metalne konstrukcije, te propisuju vrste opterećenja i dopuštena naprezanja pojedinih elemenata.

Podlogu za dimenzioniranje su činili najčešće statički proračuni. Za neke su elemente pri proračunu uzeta u obzir dinamička opterećenja, te seizmičke sile. Ovisno o namjeni, korišteni su različiti materijali prema DIN-u ili Europskim normama (najčešće R St 37-2, St 37-3N, 6 Cr Ni Ti 1810).

Kako je glavina opreme u završenoj izvedbi, izvršeni su proračuni zavarenih spojeva.

Pri određivanju opterećenja pretpostavljeno je [1] :

- opterećenje od vlastite težine zapornice povećano je težinom slojeva boje (utjecaj djelovanja vjetro i obraćanja su zanemareni)
- hidrostatska i hidrodinamička opterećenja su određena za slučajeve maksimalnih razina vode; hidrodinamička opterećenja pri različitim položajima zapornice su procijenjena na temelju sličnosti sa modelskim ispitivanjima izvršenim na ranije izgrađenim sličnim zapornicama
- mogući pritisak od leda uzet je u proračun povećanjem površinskog pritiska na zapornicu
- utjecaj potresa uzet je u proračun korištenjem Westergaard teorije
- prirast temperature $\Delta T = 30 \text{ K}$ (zapornica se okreće oko tri ležaja od kojih dva bočna omogućuju uzdužne pomake)

4.

**MONTAŽA
ISPITIVANJE
PREUZIMANJE**

- 4.1 nadzor (pri ispitivanju) ugradnji i montaži opreme
- 4.2 prisustvo završnom pregledu/preuzimanju
- 4.3 prisustvo konačnom preuzimanju sustava
- 4.4 pregled dokumentacije o kvaliteti i izvještaja o ispitivanjima pri montaži, ispitivanju i preuzimanju

5.

ZAVRŠNI IZVJEŠTAJ

ZAKLJUČAK

Temeljem opisa izvođenja prečljepne građevine, te hidromehaničke opreme može se zaključiti:

- Miniranjem uništena prečljepna građevina je zahtijevala uklanjanje betonskih dijelova i metalne konstrukcije te projektiranje i izgradnju nove. Tijekom gradnje osobita je pozornost posvećena točnosti postavljanja sidara za prihvat ležaja okretne zapornice.
- Zapornica je dimenzionirana za najteže eksploatacijske uvjete.
- Brojni strogi zahtjevi, osobito dopušteno propuštanje vode, zahtijevaju stroge tolerancije odnosno veliku točnost pri izradi i montaži. Stoga je osobita pozornost posvećena osiguranju kvalitete kako bi sustav zapornice funkcionirao pouzdano u dugom vijeku trajanja.

LITERATURA

- [1] Statical Calculation, MAN-GHH, Drawing No. 198-4-001907, 1995
- [2] Pristup osiguranju kvalitete pri izgradnji konvencionalnih energetskih objekata, EKONERG, Zagreb, 1993.

SUSTAV ZA TEHNIČKA PROMATRANJA

ZVONIMIR SEVER, dipl.ing.građ.

Projektant

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d.

ZAGREB

SAŽETAK

Na saniranoj brani Peruća koja spada u grupu velikih brana predviđena su opsežna tehnička promatranja. Zbog specifičnosti same građevine, koja je teško oštećena i potom sanirana, predviđeni opseg tehničkih promatranja je nešto opsežniji nego što je to praksa kod sličnih brana koje se grade iznova.

Kod koncipiranja sustava za tehnička promatranja nastojalo se da se što više mjerenja vrši automatski i da se svi mjerni uređaji povežu u jedinstveni sustav s centralnim upravljanjem.

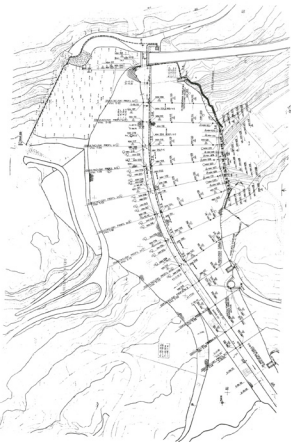
UVOD

Na saniranoj brani Peruća, koja spada u grupu velikih brana, predviđena su opsežna tehnička promatranja tako, da je za tu svrhu projektiran i ugrađen kompleksan sustav instrumenata i uređaja.

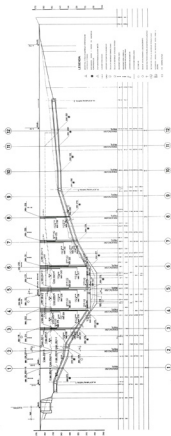
Općenito govoreći postoji više razloga za tehničko promatranje brana, a kao glavne bi mogli izdvojiti javnu sigurnost, racionalno održavanje objekata i prikupljanje iskustava radi unapređenja projektiranja i građenja takvih objekata.

Promatranje brane s gledišta javne sigurnosti ima za svrhu utvrđivanje da li je ponašanje brane u granicama normale, odnosno da li je došlo do deformacija ili pomicanja koji bi mogli biti znak poremećaja u samoj konstrukciji, temeljnom tlu ili okolnom području, a što bi moglo ugroziti stabilnost brane.

Održavanje objekata je također razlog koji upućuje na sistematsko provođenje tehničkog promatranja, zbog toga, što je saniranje ovakvih objekata vrlo osjetljivo i skupo, pa se stoga nameće potreba da se sva oštećenja i nepoželjne promjene pravovremeno uoče i



Slika 1. Raspored mjernih mjesta za tehnička promatranja
na brani Peruća - situacija



Slika 2. Raspored mjernih mjesta u tijelu brane Peruća - uzdužni presjek

otklone dok još nisu uzele maha, jer pojave koje možda na prvi pogled izgledaju da su sporednog značaja mogu često biti začeci kasnijih velikih oštećenja.

Također sistematsko promatranje ovakvih objekata koji se nalaze u eksploataciji i podaci koji se dobivaju mjerenjima, pa čak i samo vizuelnim promatranjem, pružaju veliku mogućnost za korištenje u cilja prikupljanja iskustava radi unapređivanja projektiranja, građenja i korištenja novih brana ove vrste.

Tehnička promatranja obavljana su kontinuirano na brani Peruća i prije miniranja. Međutim sustav instrumenata i uređaja za tehnička promatranja bio je primjeren vremenu u kojem je brana građena i daleko skromniji od sustava koji je sada izgrađen na brani, a sastojao se uglavnom od geodetskih točaka i piezometara. Prilikom miniranja i obnove brane taj sustav je skoro u cijelosti uništen, tako da su od njega u novi sustav uklopljeni jedino stupovi mikrotiangulacijske mreže i letve za mjerenje vodostaja u jezera. Ipak valja reći da su i pomoću tog sustava dobijeni vrlo korisni podaci o ponašanju brane Peruća tijekom godina, koji su bili od izuzetne važnosti kod ocjenjivanja stanja i procjene stupnja oštećenja nakon miniranja brane.

Kod koncipiranja novog sustava nastojalo se, da se što je god moguće više mjerenja obavlja automatski i da se svi uređaji povežu u jedan jedinstveni sustav s centralnim upravljanjem.

VRSTE TEHNIČKOG PROMATRANJA

Uvod

Osnovni kriterij za određivanje opsega i vrste tehničkih promatranja te odabiranja metoda mjerenja bili su konstruktivne karakteristike brane i uvjeti temeljenja.

Također vodilo se računa i o zakonskim propisima koji reguliraju materiju tehničkog promatranja velikih brana. Korištena su također i svjetska iskustva iz tog područja, iako treba istaći da je brana Peruća po načinu kako je oštećena i još više na način kako je sanirana, jedinstven primjer u svijetu.

Kod toga se nastojalo obuhvatiti sve ključne elemente brane koji su bitni za njenu stabilnost. Posebna je pažnja posvećena središnjem dijelu brane u kojemu se izvodi dijafragma kao novi nepropusni element koji preuzima funkciju teško oštećene glinene jezgre.

Zbog specifičnosti same građevine, koja je teško oštećena i potom sanirana, predviđeni opseg tehničkih promatranja je nešto opsežniji nego što je to praksa kod sličnih brana koje se grade iznova.

Prethodene su slijedeće vrste tehničkih promatranja.

- vizuelna promatranja
- geodetska mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka na površini brane
- mjerenje naginjanja i zakretanja betonskih zidova
- mjerenje pritiska porne vode u glinenoj jezgri
- mjerenje totalnih pritiska u glinenoj jezgri
- mjerenje horizontalnih pomaka točaka u tijelu brane
- mjerenje vertikalnih pomaka točaka u tijelu brane, slijeganje
- mjerenje piezometarskih nivoa u nizvodnoj nožici brane
- mjerenje procjeđivanja
- seizmološka promatranja
- mjerenje nivoa vode u akumulacijskom jezeru
- mjerenje deformacije, konvergencije, obloge injekcijske galerije
- mjerenje rastezanja i skupljanja krune brane
- mjerenje piezometarskih nivoa vode uzvodno i nizvodno uz injekcijsku zavjesu
- meteorološka mjerenja

Za spomenuta tehnička promatranja odabrani su i odgovarajući mjerni uređaji. Prilikom odabiranja mjernih uređaja osnovni problem je ležao u činjenici da se krajevi i kruna brane u visini 7-12 m izvode iznova, a najviši središnji dio popravljiva. Zbog toga se za ugradnju uređaja za pojedina mjerenja nisu mogla koristiti uobičajena tehnička rješenja za takve vrste objekata, nego su se morala primijeniti nova. To se prije svega odnosi na mjerenje pornog tlaka u glinenoj jezgri, totalnog pritiska u glinenoj jezgri i vertikalnih pomaka, slijeganja. Tako su uređaji za mjerenje pornog tlaka i totalnog pritiska na lijevom kraju i ispod krune brane koja se gradi iznova, ugrađeni na uobičajan način u jame u otvorenom iskopu, sl. 3-8. Međutim u središnjem dijelu brane koji se ne gradi iznova, uređaje za mjerenje totalnog pritiska bilo je moguće ugraditi u tijelo brane jedino iz galerije i to u oblogu galerije i uz nju. Kod donošenja takvog rješenja Projektant je bio svjestan da će obzirom na okolnosti ugradnje biti upitna vrijednost dobivenih rezultata mjerenja. S druge strane ugradnja uređaja za mjerenje pornog tlaka na središnjem dijelu riješena je mnogo lakše na način, da su ti uređaji uzvodno od dijafragme ugrađeni u zatvorene bušotine, a nizvodno od nje u posebne za tu svrhu konstruirane piezometarske cijevi, sl. 6. Ipak najteži problem bio je način mjerenja slijeganja središnjeg dijela brane koji se ne gradi iznova. Za tu svrhu primijenjeno je rješenje s magnetnim prstenovima koji na sebi imaju krlica, a ugrađuju se u bušotinu, sl. 8.

Vizuelno promatranje

Kao dio promatranja, vizuelno promatranje počinje po dovršetku građevine, odnosno kod prvog punjenja akumulacijskog jezera, a nastavlja se tokom cijelog perioda korištenja brane.

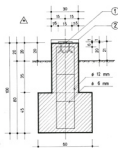
Zadatak vizuelnog promatranja je da se uoče pojave koje bi mogle negativno utjecati na stabilnost brane kao što su deformacije, pukotine, procjednjavanje vode kroz tijelo brane, izviranje vode nizvodno od brane itd.

Kvaliteta i uspješnost vizuelnog promatranja ovisi o sposobnosti uočavanja promjena, o stručnosti osobe koja obavlja promatranja i o učestalosti promatranja.

Geodetska mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka

Pomoću ugrađenih geodetskih kontrolnih točaka određuju se vertikalni i horizontalni pomaci na kruni i nizvodnom pokosu brane te na potpornim zidovima. Geodetska mjerenja se provode geodetskim metodama i instrumentima posebne namjene i odgovarajuće preciznosti. Mjerenje horizontalnih pomaka kontrolnih točaka obavljat će se metodom presijecanja sa stupova mikrotriangulacijske mreže, a mjerenje vertikalnih pomaka metodom geodetskog nivelmana.

Geodetske kontrolne točke raspoređene su na kruni i nizvodnom pokosu brane u 12 oskultacijskih profila, te na potpornom zidu u nišici brane, potpornom zidu kućice zatvarača i mrljevine građevine, sl. 1 i 3.



LEGENDA

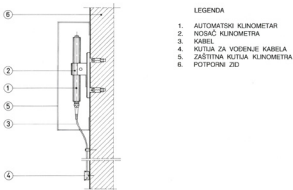
1. POGLOŽNA PLOČA
S VIJKOM ZA
INSTRUMENT WILD T,
2. ZAŠTITNI LIMENI
POKLOPAC

Slika 3. Geodetska točka na brani

Mjerenje naginjanja i zakretanja betonskih zidova

Mjerenje naginjanja odnosno zakretanja oko horizontalne osi predviđeno je na potpornom zidu u nožici brane, potpornom zidu oko kućice pomoćnog zatvarača i prelivnoj građevini.

Na potpornom zidu u nožici brane predviđeno je da se mjerenja naginjanja i zakretanja obavljaju pomoću ugrađenih automatskih površinskih klinometara, sl. 4. Ugrađen je po jedan klinometar na svakoj dionici zida. Kao kontrola automatskih površinskih klinometara predviđeno je mjerenje pomoću prijenosnog klinometra tipa PIZZI, tako da su za tu svrhu ugrađene posebne klinometarske baze.



Slika 4. Automatski klinometar na potpornom zidu u nožici brane



Foto 1 i 2

Ugradnja automatskih
klinometara na potporni zid
u nožici brane



Mjerenje pritisaka porne vode u glinenoj jezgri

Mjerenjem pritisaka porne vode u glinenoj jezgri dobiva se uvid u stanje vodopropusnosti glinene jezgre. Mjerenje je predviđeno uzvodno i nizvodno od dijafragme, na lijevom kraju brane i u gornjem rekonstruiranom dijelu središnjeg dijela brane, sl. 5.

Uzvodno od dijafragme čelija za mjerenje pritiska porne vode ugrađena je u zatvorenu bušotinu, sl. 6a. Nizvodno od dijafragme čelija za mjerenje pritiska porne vode ugrađena je u piezometarske cijevi s mogućnošću njihovog vađenja i kontrole. Tu je predviđeno mjerenje u nivoima razmaknutim 10 m po visini u svakom oskultacijskom profilu, sl. 6b.

U lijevom kraju, gdje se brana izvodi iznova, te gornjem dijelu središnjeg dijela brane čelije za mjerenje pritiska porne vode ugrađene su u otvorenom iskupu zajedno s čelijama za mjerenje totalnog pritiska, foto 3, 4 i 5.

Mjerenje totalnih pritisaka u glinenoj jezgri

Ovim mjerenjima utvrđuje se nivo ukupnih pritisaka na raznim horizontima u glinenoj jezgri.

Čelije za mjerenje totalnih pritisaka ugrađene su u otvorenom iskupu u dijelove brane koji se rade iznova; lijevi kraj i gornji središnji dio, foto 6, 7 i 8.

Radi dobivanja uvida u razvoj totalnih pritisaka u središnjem dijelu brane koji se ne gradi iznova čelije su ugrađene uz i u obloga galerije, jer ih je s te strane bilo jedino moguće ugraditi.

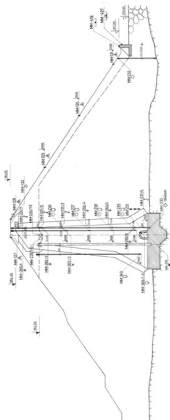
Mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane

Mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane predviđeno je pomoću inklinometara.

Inklinometarske cijevi ugrađene su u bušotine koje se izvode nakon dovršetka sanacije brane.

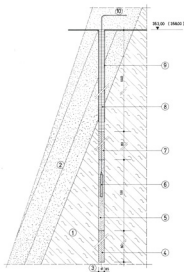
Na oskultacijskim profilima 3-7 predviđeno je kontinuirano mjerenje horizontalnih pomaka pomoću trajno ugrađenih inklinometara. Inklinometri su u inklinometarskoj cijevi raspoređeni tako, da se 3 inklinometra nalaze gledajući od vrha na prvih 30 m i na međusobnoj udaljenosti od 10 m, a jedan na dnu cijevi.

Na oskultacijskim profilima 1, 2 i 8 mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane obavlja se pomoću prenosnog inklinometra, sl. 8.



Slika 5. Raspored mjernih mjesta za tehnička promatranja - oskultacijski profil br. 5

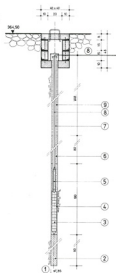
a) Uzvodno od
dijafragme



LEGENDA

1. GLINENA JEZGRA
2. FILTERSKI SLOJEVI
3. BUŠOTINA
4. BENTONITNI ČEP
5. PJEŠČANI FILTER
6. ČELIJA ZA MJERENJE TLAKA PORNE VODE
7. BENTONITNI ČEP
8. INJEKCIJSKA MASA
9. ZAŠITNA CJEV
10. KABEL

b) Nizvodno od
dijafragme



LEGENDA

1. BUŠOTINA
2. BENTONITNI ČEP
3. POROZNI FILTER
4. PJEŠČANI FILTER
5. ČELIJA ZA MJERENJE TLAKA PORNE VODE
6. BENTONITNI ČEP
7. PIEZOMETARSKA CJEV
8. KABEL
9. INJEKCIJSKA MASA

Slika 6. Uređaji za mjerenje pritiska porne vode ugrađeni u bušotini glinene jezgre

Mjerenje vertikalnih pomaka u tijelu brane, slijeganje

Uz inklinometarsku cijev u baštinu su ugrađeni magnetski pesteni s krilima na međusobnom razmaku od 10 m gledajući po visini. Mjerenje pomaka obavlja se povremeno posebnim mjernim uređajima. Ovakvi uređaji za mjerenje slijeganja odabrani su zbog toga, što je jedino njih bilo moguće ugraditi u središnji dio tijela brane koji nije izveden iznova, sl. 8, a za koji je praćenje eventualnog slijeganja od izuzetnog značaja.

Mjerenje piezometarskih nivo voda u nizvodnoj nožici brane

U nizvodnoj nožici brane predviđeno je mjerenje piezometarskih nivoa vode. Za tu svrhu predviđeno je postavljanje cevovanih piezometara. Piezometri su postavljeni na oskultacijskim profilima 1-8, a mjerenje piezometarskog nivoa vode obavlja se pomoću prijenosnih mjerača.



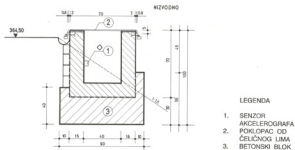
Foto 3. Ugradnja čelija za mjerenje pritiska porne vode i totalnog pritiska na lijevom kraju brane



Foto 4. Priprema čelije za mjerenje pritiska
porne vode prije ugradnje



Foto 5. Ugradnja čelije za mjerenje tlaka
porne vode u glinenu jezgu brane



Slika 7. Ugradnja senzora akceleroграфа на kruni brane



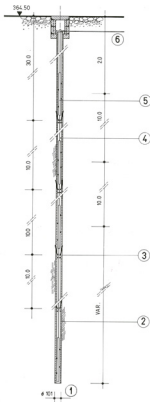
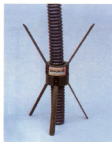
Foto 6. Čelija за mjerenje totalnog pritiska



Foto 7. Jame iskopane u glinenoj jezgri za ugradnju čelija u raznim smjerovima



Foto 8. Ugradnja čelije za mjerenje totalnog pritiska



LEGENDA

1. BUŠOTINA
2. INJEKCIJSKA MASA
3. MAGNETSKI PRSTEN S KRLIMA ZA PRAĆENJE SLIJEGANJA (SVAKIH 10 m)
4. INKLINOMETARSKA CJEV
5. DVAOKSUALNI INKLINOMETAR
6. KABEL

Slika 8. Ugradnja inklinometra, magnetski prsten za praćenje slijeganja

Seizmološka promatranja

Budući da brana Peruća spada u grupu velikih brana potrebno je obavljati i seizmološka promatranja.

Seizmološko promatranje brane općenito se dijeli na promatranje koje ima za cilj praćenje inducirane seizmičnosti i promatranje dinamičkog ponašanja brane kod djelovanja jakih potresa.

Na brani Peruća predviđen je samo instrumentarij za promatranje dinamičkog ponašanja objekta, budući da je obzirom na starost akumulacijskog jezera ocijenjeno, da će eventualna inducirana seizmičnost biti veoma malena i neće imati neki znatniji utjecaj na objekt.

Cilj mjerenja je dobivanje vremenske slike oscilacija akceleracije na osnovi čega se određuju parametri dinamičkog ponašanja objekta.

Za tu svrhu predviđeno je 5 mjernih mjesta i to dva u injekcijskoj galeriji, dva na kruni brane, sl. 7 i jedno u temeljnoj stijeni oko 300 m nizvodno od brane.

U galeriju, na krunu brane i temeljnu stijenu postavlja se samo senzori, dok su akcelerografi smješteni u posebnoj sobi u zatvaračnici na lijevom kraju brane i kabelski povezani sa senzorima.

Broj akcelerografa i raspored mjernih mjesta određen je prema "Pravilniku za seizmičko promatranje visokih brana" - i prema preporukama Međunarodne komisije za velike brane (ICOLD).

Mjerenje procjeđivanja u galeriju brane

Mjerenje procjeđivanja u galeriju brane obavlja se u injekcijskoj galeriji na ulasku u drenažni odvod, gdje je za tu svrhu izgrađen Thompsonov preliv s automatskim mjeračem nivoa vode.

Mjerenje rastezanja i skupljanja krune brane

Mjerenje rastezanja i skupljanja krune brane predviđeno je na dva mjesta na koti 358.0 m n.m.

Za tu svrhu ugrađeno je 10 ekstenzometara svaki s bazom dužine 6 m. Ekstenzometri su grupirani u dva ekstenzometarska lanca sa po 5 ekstenzometara svaki ukupne dužine 30 m, foto 9.



Foto 9. Ugradnja ekstenzometra u krunu brane

Mjerenje nivoa vode u akumulacijskom jezeru

Mjerenje nivoa vode u akumulacijskom jezeru predviđeno je na dva načina

- pomoću mjernih letava
- pomoću automatskog mjerača vodostaja

Mjerne letve su postavljene uz stazu zatvarača dovodnog tunela i pomoću njih se mjerio vodostaj i prije sanacije brane.

Automatski mjerač nivoa vode u jezeru je postavljen uz ulaznu građevinu dovodnog tunela i kabelom je spojen s mjernom centralom u zatvaračnici.

Mjerenje deformacije, konvergencije, obloge injekcijske galerije

Mjerenje konvergencije obavlja se u određenim mjernim profilima 1-12, a mjerit će se konvergencija betonske obloge u vertikalnom, horizontalnom i dijagonalnom smjeru i apsolutni pomak svođa.

Mjerenje konvergencije obavlja se pomoću ekstenzometra s trakom, a za potrebe mjerenja ugrađeni su u betonsku oblogu i odgovarajući reperti, foto 10.

Apsolutni pomak svođa mjeri se geodetskim metodama i standardnim geodetskim instrumentarijom.



Foto 10. Mjerenje konvergencije obloge injekcijske galerije

ORGANIZACIJA MREŽE UREDAJA I MJERNIH TOČAKA ZA TEHNIČKA PROMATRANJA

Mreža mjernih točaka i uređaja sastoji se od uređaja koji su stalno ugrađeni i kontinuirano obavljaju mjerenja, te od mjernih točaka i uređaja na kojima se periodički obavljaju mjerenja.

Svaki mjerni uređaj ili točka predstavljaju jedno mjerno mjesto koje je na nacrtima označeno s oznakom MM. Uz oznaku MM svako mjerno mjesto ima i odgovarajući redni broj, te simbol vrste uređaja ili mjerne točke.

Mjerna mjesta na tijelu brane su grupirana u 12 oskultacijskih profila koji su iz različitih razloga karakteristični, i na njima se obavljaju različite vrste mjerenja, sl. 1 i 2. Na taj način može se lakše na svakom profilu utvrditi međusobna uzročno-posljedična veza različitih pojava na brani.

Osim na spomenutim profilima mjerna mjesta su postavljena na potpornom zidu u nožici brane, na potpornom zidu kućice zatvarača temeljnog ispusta, na brani uz prelivnu građevinu, u akumulacijskom jezeru, prelivnoj građevini, lijevom pristupnom platou (meteorološka stanica) i uz injekcijsku zavjesu.

Svi uređaji na kojima se mjerenja obavljaju automatski spojeni su kabelima s Centrom za tehnička promatranja iz kojeg se upravlja mjerenjima i prikupljaju podaci mjerenja.

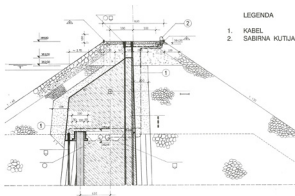
Da bi se izbjeglo gomilanje kabela od mjernih uređaja do Centra, u svakom oskultacijskom profilu te na potpornom zidu u nožici brane i u galeriji postavljene su sabirne kutije. Kod toga je primijenjeno vertikalno vođenje kabela iz tijela brane prema kruni. Kabeli su grupirani i stavljeni u zaštitnu plastičnu savitljivu cijev te kroz nizvodni filter brane dovedeni do krune, sl. 9. Kod toga je prilikom izgradnje osobita pozornost posvećena zaštiti kabela od oštećenja, foto 11.

U sabirne kutije uvode se kabeli iz mjernih uređaja u pripadajućem oskultacijskom profilu, odnosno uređaja smještenih na potpornom zidu i u galeriji. Ukupno je predviđeno 10 sabirnih kutija. Sabirne kutije su povezane posebnim sabirnim kabelom koji ih spaja sa centrom za tehnička promatranja, sl. 10.

Mjerenja na ostalim mjernim mjestima koja nisu povezana u centralni sistem obavljaju se geodetskim instrumentima i ostalim prenosivim mjernim uređajima, te predstavljaju korisnu nadopunu i kontrolu naprijed spomenutih mjerenja. To se odnosi na mjerenje horizontalnih pomaka na oskultacijskim profilima 1, 2 i 8 gdje nisu ugrađeni in-place inklinometri, zatim na mjerenje slijeganja, mjerenje nivoa vode u piezometrima, mjerenje naginjanja prijenosnim mehaničkim klinomerom, mjerenje konvergencije obloge injekcijske galerije i sva geodetska mjerenja. Svi su uređaji marke SISGEO.

POPIS UREĐAJA ZA TEHNIČKA PROMATRANJA NA BRANI PERUĆA

VRSTA MJERNOG UREĐAJA	OZNAKA	UGRAĐENO	
		KOM	m
GEODETSKA TOČKA ZA MJERENJE HORIZONTALNIH I VERTIKALNIH POMAKA		68	
INKLINOMETARSKA CIJEV			367
UGRAĐENI INKLINOMETAR		20	
MAGNETSKI PRSTEN S KRILIMA ZA MJERENJE SLIJEGANJA		38	
PIEZOMETAR		8	102
ČELIJA ZA MJERENJE PRITISKA PORNE VODE		40	
ČELIJA ZA MJERENJE TOTALNOG PRITISKA		41	
REPERI ZA MJERENJE KONVERGENCIJE OBLOGE U INJEKCIJSKOJ GALERJI		48	
EKSTENZOMETRI U KRUNI BRANE		10	60
AUTOMATSKI KLINOMETAR		8	
KLINOMETARSKJE BAZE		16	
UREĐAJ ZA MJERENJE NIVOVA VODE		1	
AKCELEROGRAFI		5	
METEOROLOŠKA STANICA		1	

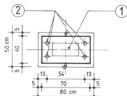


Slika 9. Prikaz vođenja kabela iz mjernih uređaja do sabirne kutije na kruni brane



Foto 11. Zaštita kabela mjernih uređaja za vrijeme gradnje

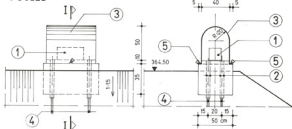
TLOCRT



LEGENDA

1. SABIRNA KUTIJA
2. OTVORI ZA DOVOD KABELA
3. ZAŠTITNI LIM
4. KABLI
5. LOKOT

POGLED



Slika 10. Sabirna kutija

CENTAR ZA TEHNIČKA PROMATRANJA

Centar za tehnička promatranja smješten je u posebnoj prostoriji u zavaračnici na lijevom kraju brane. U njemu je smješten sustav za mjerenje i prikupljanje podataka mjerenja (DATA ACQUISITION SYSTEM) kojim upravlja kompjuter pomoću za tu svrhu specijalističkog programa. Programski se može odrediti u kojim vremenskim intervalima se obavljaju mjerenja te istodobno provoditi odgovarajuće analize.

DATA ACQUISITION SYSTEM je mozak cijelog sustava za tehnička promatranja, a čine ga dva MICRO-10 Datalogger-a na koje su vezani 16/32 Channel Multiplexer jedinice, ukupno 4 kom, i jedinica za napajanje električnom energijom, foto 12.

MICRO-10 Datalogger, marke Campbell Scientific, sastoji se od mikrokompjutora, sata, multimetra, kalibratora, skenera i jedinice za čitanje i kontrolu frekvencije. Svaki MICRO-10 Datalogger može istovremeno skenirati 12 kanala sa senzorima iste vrste ili 6 kanala sa senzorima različite vrste, što znači da cijeli sustav može istovremeno skenirati 24 odnosno 12 kanala. Interval skeniranja svakog kanala može se programirati.

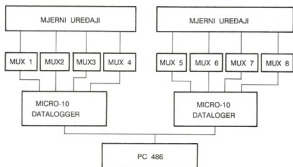
Na svaki MICRO-10 Datalogger priključene su dvije 16/32 channel Multiplexer model 8032 jedinice na koje su kabelima spojeni svi mjerni uređaji.

Broj kanala koji koristi pojedini mjerni uređaj ovisi o vrsti električnog signala svakog uređaja. Cijeli sustav za tehnička promatranja na brani Peruća koristi ukupno 154 kanala.

U centru je smješteno također i svih 5 akcelerografa, foto 13, koji su kabelima vezani sa senzorima smještenim u galeriji, kruni brane i nizvodno u temeljnoj stijeni. Sistem za seizmološka mjerenja je nezavisan u odnosu na sistem koji upravlja ostalim mjerenjima. Akcelerografi su marke SIG tip SMACH-2 - STRONG MOTION, a sastoje se od digitalnog rekordera s memorijskom karticom i zasebnog senzora (triazalnog akcelerometra). Prag aktiviranja akcelerografa je 0,1 g.



Foto 12. Sustav za prikupljanje podataka



NAPOMENA

- MUX 16/32 CHANNEL MULTIPLEXER
- U OVOJ SHEMI NIJE OBUHVAĆEN SUSTAV ZA SEIZMOLOŠKA PROMATRANJA, KOJI JE NEZAVISAN

SHEMATSKI PRIKAZ SUSTAVA ZA TEHNIČKA PROMATRANJA NA BRANI PERUĆA

UČESTALOST PROMATRANJA

Projektom je propisana i učestalost pojedinih promatranja i mjerenja.

Predviđeno je da prvih 5 godina nakon dovršenja sanacije brane učestalost promatranja i mjerenja bude intenzivnija, a ukoliko se pokaže da se brana ponaša u očekivanim okvirima, da se intenzitet promatranja i mjerenja smanji.

Promatranje i mjerenje tijekom prvih 5 godina nakon probnog opterećenja brane

Učestalost promatranja i mjerenja je sljedeća:

- vizuelno promatranje 1 puta dnevno
- geodetska mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka 4 puta godišnje

- mjerenje naginjanja i zakretanja betonskih zidova, automatskim klinometrom kontinuirano
- kontrolna mjerenja naginjanja i zakretanja betonskih zidova prijenosnim klinometrom 4 puta godišnje
- mjerenje pritiska porne vode u glinenoj jezgri kontinuirano
- mjerenje totalnih pritisaka u glinenoj jezgri kontinuirano
- mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane na oskultacijskim profilima 3-7 kontinuirano
- mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane na oskultacijskim profilima 1, 2, 8 4 puta godišnje
- mjerenje vertikalnih pomaka u tijelu brane, slijeganje 4 puta godišnje
- mjerenje piezometarskih nivoa u nizvodnoj nožici brane 1 puta tjedno
- mjerenje procjeđivanja u galeriju 1 puta tjedno
- seizmološka mjerenja kontinuirano
- mjerenja nivoa vode u akumulacijskom jezeru kontinuirano
- mjerenje deformacije, konvergencije, obloge injekcijske galerije i apsolutni pomak svoda 4 puta godišnje
- mjerenje rastezanja i skupljanja krune brane kontinuirano
- hidrometeorološka mjerenja kontinuirano

Mjerenja za koja je navedeno da su kontinuirana vrše se automatski i njima upravlja kompjuter preko centralnog sistema za prikupljanje podataka. Učestalost mjerenja, mjerenje i vremenski razmak, koja će se obavljati automatski, odredit će Projektant naknadno.

Promatranje i mjerenje tijekom normalnog korištenja brane

Ukoliko se nakon prvih 5 godina od završetka gradnje ustanovi na temelju rezultata mjerenja da nije potrebno provoditi istu dinamiku mjerenja kao u prvih 5 godina, učestalost promatranja i mjerenja će biti sljedeća:

- vizuelno promatranje 1 puta dnevno
- geodetska mjerenja horizontalnih i vertikalnih pomaka 2 puta godišnje
- mjerenje naginjanja i zakretanja betonskih zidova, automatskim klinometrom kontinuirano
- kontrolna mjerenja naginjanja i zakretanja betonskih zidova prijenosnim klinometrom 2 puta godišnje
- mjerenje pritiska porne vode u glinenoj jezgri kontinuirano

- mjerenje totalnih pritisa u glinenoj jezgri kontinuirano
- mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane
na oskultacijskim profilima 3-7 kontinuirano
- mjerenje horizontalnih pomaka u tijelu brane
na oskultacijskim profilima 1, 2, 8 2 puta godišnje
- mjerenje vertikalnih pomaka u tijelu brane, slijeganje 2 puta godišnje
- mjerenje piezometarskih nivoa u nizvodnoj nožici brane 1 puta tjedno
- mjerenje procjeđivanja u galeriju 1 puta tjedno
- seizmološka mjerenja kontinuirano
- mjerenja nivoa vode u akumulacijskom jezeru kontinuirano
- mjerenje deformacije, konvergencije, obloge injekcijske galerije
i apsolutni pomak svoda vertikalnih pomaka u tijelu brane,
slijeganje 2 puta godišnje
- mjerenja rastezanja i skupljanja krune brane kontinuirano
- hidrometeorološka mjerenja kontinuirano



Foto 11. Akceleroграф SMACH 2-SIG

ZAKLJUČAK

Nakon završetka sanacije brana Peruća ide u eksploataciju, što znači da može ovisno o prilikama, biti dovedena u uvjete ekstremnih opterećenja predviđenih u projektu.

Sustav za tehnička promatranja sanirane brane Peruća koncipiram je tako, da obuhvati sve ključne konstruktivne elemente brane te omogućiti praćenje ponašanja brane tijekom njenog korištenja. Redovito tehničko promatranje brane je jedini način da se tijekom njenog korištenja kontrolira njena stabilnost i sigurnost, a samim time i provjeri ispravnost rješenja primjenjenih prilikom njene sanacije. S druge strane time se otvara mogućnost da se u slučaju potrebe može na vrijeme bez težih posljedica intervenirati na brani.

**STRUČNI TIM ZA SANACIJU BRANE PERUĆA,
NADZORNI INŽENJERI
PROJEKTANTI I IZVODITELJI RADOVA**



Marin VILOVIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj tima za sanaciju brane

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.



Mijo ZEC, dipl.ing.građ.

Glavni nadzorni inženjer

"HRVATSKA ELEKTROPRIVREDA" d.d.



Doc.dr.sc. Josip RUPČIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj projekta

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d. - Zagreb



Zvonimir SEVER, dipl.ing.građ.

Projektant

ELEKTROPROJEKT inženjering d.d. - Zagreb



DALIMBOR BOJANIĆ, dipl.ing.građ.

Nadzorni inženjer za:

- plastično-betonsku dijafragmu
- prelivnu građevinu

"HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA" d.d.



Josip RAOS, dipl.ing.građ.

Nadzorni inženjer za:

- uklanjanje i građenje tijela brane
- potporni zid na nizvodnoj nožici brane

"HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA" d.d.



Stjepan BRKUŠIĆ, ing.građ.

Nadzorni inženjer za:

- injekcijsku galeriju
- potporni zid oko kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta

"HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA" d.d.



Nenad KEZIĆ, dipl.ing.geol.

Nadzorni inženjer za:

- injekcijske radove

"HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA" d.d.



Maksim PERAČIĆ, građ.teh.

Suradnik nadzornim inženjerima

"HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA" d.d.



Tomo PELIVAN, dipl.ing.građ.

- imovinsko pravni odnosi
- zaštita nizvodnog pokosa

“HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA” d.d.



Sanja MUSULIN, dipl.ing.građ.

Praćenje radova na sanaciji

“HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA” d.d.



Željko KOREN, dipl.ing.str.

Nadzorni inženjer za:

- hidromehaničku opremu prelivne građevine

“HRVATSKA ELEKTORPRIVREDA” d.d.



Mate TOMIĆ, geometar

- geodetske podloge
- iskolčenja
- kontrola

Geodetski zavod - Split



Zlatko BRŠČIĆ, dipl.ing.građ.

Nadzorni inženjer za:

- kontrolu ugradnje materijala u tijelo brane

GeoKon - Zagreb



Krešimir SEVER, ing.geoteh.

Nadzorni inženjer za:

- istražne radove na nalazištima materijala
- kontrolu ugradnje materijala u tijelo brane

GeoKon - Zagreb



Miroslav IVOŠ, ing.geoteh.

Nadzorni inženjer za:

- kontrolu ugradnje materijala u tijelo brane
- kontrolu plastičnog betona dijafragme

GeoKon - Zagreb



prof.dr. Velimir UKRAINCZYK, dipl.ing.građ.

- kontrolna ispitivanja plastičnog betona dijafragme

GRAĐEVINSKI FAKULTET SVEUČILIŠTA U ZAGREBU



Nedjeljko AKRAP, dipl.ing.građ.

- tekuća ispitivanja betona
- tekuća ispitivanja plastičnog betona dijafragme

Institut građevinarstva Hrvatske - PC Split



Ivo BARBALIĆ, dipl.ing.građ.

- tekuća ispitivanja ugrađenog materijala u tijelo brane

Institut građevinarstva Hrvatske - PC Split



Vjekoslav JURKO, tehn.građ.mat.

- tekuća ispitivanja ugrađenog materijala u tijelo brane

Institut građevinarstva Hrvatske - PC Split



Ivo OZRETIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj građenja za:

- injekcijsku galeriju
- potporni zid na nizvodnoj nožici brane i oko kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta
- uklanjanje i gradnju tijela brane
- prelivnu građevinu

Konstruktor - Inženjering d.d. - Split



Božo BORZIĆ, građ.teh.

Voditelj radova za:

- injekcijsku galeriju
- potporni zid oko kućice pomoćnog zatvarača temeljnog ispusta
- prelivnu građevinu

Konstruktor - Inženjering d.d. - Split



Milan RADELJAK, dipl.ing.građ.

Voditelj radova za:

- potporni zid na nizvodnoj nožici brane
- uklanjanje i gradnju tijela brane

Konstruktor - Inženjering d.d. - Split



Marko ZORIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj radova:

- uređenje korita Cetine
- uređenje nizvodnog pokosa brane

JVP Cetina - Sinj



Ante BARAČ, ing.geotech.

Voditelj radova:

- istražni radovi
- injekcijski radovi

Geotehnika d.d. - Zagreb



Zvonimir ŠEPAC, dipl.ing.građ.

Voditelj građenja za

- plastičnobetonsku dijafragmu

Geotehnika d.d. - Zagreb



Rudolf HENNING, ing.

Voditelj radova za:

- plastičnobetonsku dijafragmu

Bauer - Schrobenuhausen



Branko BOSANČIĆ, dipl.ing.građ.

Voditelj građenja za

- plastičnobetonsku dijafragmu

Geotehnika d.d. - Zagreb

STRUČNI KOLEGIJ ZA SANACIJU BRANE PERUĆA

1. Marin VELOVIĆ, dipl.ing.građ. - predsjednik, Hrvatska elektroprivreda d.d.
2. Mijo ZEC, dipl.ing.građ. - tajnik, Hrvatska elektroprivreda d.d.
3. Dalibor BOJANIĆ, dipl.ing.građ. - član, Hrvatska elektroprivreda d.d.
4. Prof.dr.sc. Dobroslav ZNIDARČIĆ, dipl.ing.građ. - član
5. Doc.dr.sc. Josip RUPČIĆ, dipl.ing.građ. . . . - voditelj projekta, Elektroprojekt d.d.
6. Zvonimir SEVER, dipl.ing.građ. - projektant, Elektroprojekt d.d.
7. Prof.dr.sc. Ervin NONVEILLER, dipl.ing.građ. - član
8. Prof.dr.sc. Antun SZAVITS-NOSSAN, dipl.ing.građ. - član, Građevinski fakultet Zagreb
9. Prof.dr.sc. Franjo VERIĆ, dipl.ing.građ. . . . - član, Građevinski fakultet Zagreb
10. Prof.dr.sc. Petar STOJIC, dipl.ing.građ. - član, Građevinski fakultet Split
11. Mr.sc. Zdravko LINARIĆ, dipl.ing.građ. . . . - član, Građevinski fakultet Zagreb
12. Zlatko BRŠČIĆ, dipl.ing.građ. - član, GeoKon - Zagreb



Jedan dio radnika Konstruktor - Inženjeringa na obnovi injekcijske galerije





1895 **STOLJEĆE** 1995 **HRVATSKE ELEKTROPRIVREDE**

HOTEL "ESPLANADE"
ZAGREB
GARAJE I TRGOVINSKI
CENTAR



IZRADA POTPORNOG
SKLOPA ARMIRANO
BETONSKOM
DIJAFRAGMOM I
GEOTEHNIČKIM SIDRIMA



Geolehnika d.d.

KUPSKA 2, ZAGREB, CROATIA

TEL. 385 1 611 32 66, 611 28 11 FAX 53 50 76 TLX 21373 GEOI

DJELATNOSTI U DOMOVINI I INOZEMSTVU

- PILOTI
- DIJAFRAGME
- PREDNAPETE KONSTRUKCIJE
- IZRADA ZDENACA
- BUŠOTINE ZA SVE NAMJENE
- TERENSKI ISTRAŽNI RADOVI

- KONSOLIDACIJSKI I INJEKCIJSKI RADOVI
- PRSKANI BETON, HIDROIZOLACIJE, BRTVLJENJA
- RUDARSKI I MINERSKI RADOVI
- METALO-KONSTRUKTERSKI RADOVI
- PROJEKTIRANJA, STUDIJE, NADZOR

HIDROELEKTRANA
PERUČA



ŠANACIJA BRANE
IZRADOM DIJAFRAGME
OD PLASTIČNOG BETONA
KONSOLIDACIJSKOM
INJEKCIJANJEM I
PRSKANIM BETONOM



elektroprojekt inženjering d.d.

Punih 45 godina **elektroprojekt** je vaš partner u Hrvatskoj i u mnogim zemljama svijeta. U stanju je udovoljiti svim izazovima projekata, prirode i ljudi. Preuzeti i obaviti sve zadatke. U svim rokovima **POUZDANO I VRHUNSKA KVALITETE.**

- vodoprivredne osnove
- višenamjensko korištenje voda
- sustavi navodnjavanja i odvodnje
- brane i akumulacije
- hidrotehnički tuneli i podzemna građevine
- hidroelektrane
- termoelektrane
- termoelektrane-toplane
- nuklearne elektrane
- javni i posebni objekti
- toplinske mreže
- industrijska postrojenja
- pumpne stanice
- vodovodi i kanalizacije
- trafostanice i raslopišta
- telekomunikacije
- automatizacija i upravljanje sustavima i procesima
- informacijski sustavi
- ekološki projekti
- nekonvencionalni izvori energije
- racionalizacija potrošnje
- revitalizacija postrojenja
- zbrinjavanje otpada

projektiranje
konzalting
inženjering

elektroprojekt
inženjering d.d.

Ulica grada Vukovara 37
10000 ZAGREB, HRVATSKA
telefon: (01) 612 51 11
telefaks: (01) 53 05 04
(01) 33 45 66
(01) 53 56 99
teleks: 22179 elproiz rh





GeoKon-Zagreb

GEOTEHNIČKE KONSTRUKCIJE d.o.o.

CROATIA, ZAGREB, tel./fax +385-01-530-402, tel. 511-922



- ♦ GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA I ISPITIVANJA ♦
- ♦ PROJEKTIRANJE ♦
- ♦ NADZOR ♦
- ♦ TEHNIČKA PROMATRANJA ♦



PODUZEĆE ZA GEOTEHNIČKA ISTRAŽIVANJA, PROJEKTIRANJE I GRADITELJSTVO



KONSTRUKTOR d.d. Split

58 000 SPLIT, Svačićeva 4/I, CROATIA

KONSTRUKTOR-SPLIT

Split, Svačićeva 4/I
Tel.: (021) 335-144,
Fax: (021) 341-100

KONSTRUKTOR-ZAGREB

Zagreb, Metaljeva 5
Tel.: (01) 339-810,
Fax: (01) 339-815

KONSTRUKTOR-MOSTAR

Ante Zaimića 24
Tel.: (088) 313-068

INFORMACIJE O PODUZEĆU:

PROJEKTIRA: visokogradnje, niskogradnje

PROIZVODI: sve frakcije tehničkog kamena, asfaltna masa, betonske prefabrikate

IZVODI: građevinske dijelove hidroelektrana, betonske i nasute brane, sve vrste podzemnih radova, prometnice, mostove, površinske kopove, otkrivke, komunalne radove, stambene objekte i naselja, industrogradnje i poslovne objekte, objekte turizma, ugostiteljstva i športa, objekte zdravstva, školstva i socijalne skrbi.



Franjevački samostan Gospe
od zdravlja u Splitu



Nadvožnjak na obilaznici
oko Splita



Stambeno naselje "Spinat"
u Splitu



Maslenički most / Maketa



Tunel "Učka"



HE "Djale" na Cetini



HE "Kafue Gorge" - Zambija
(Podzemna strojarnica)



Međunarodno središte
Hrvatskih Sveučilišta

RADOVI U INOZEMSTVU:

Sei Lanka, Zambija, Kolumbija,
Rusija, Češka, Tanzanija, Irak,
SR Njemačka, Luksemburg.



GEODETSKI ZAVOD d.d. SPLIT

ZAVOD ZA PROJEKTIRANJE I IZVOĐENJE GEODETSKIH POSLOVA

21 000 SPLIT, R. BOŠKOVIĆA 20, tel centrala 565-104, direktor 561-325, fax: 561-176 Žiro-račun: 34400-801-7768

Društvo obavlja sljedeće djelatnosti:

- *Geodetsko projektiranje i nadzor*
- *Izvođenje radova triangulacije i nivelmana*
- *Izmjerna zemljišta klasično i aerofotogrametrijska*
- *Mjerenje i animiranje objekata klasično i terestičkom fotogrametrijom*
- *Izvođenje svih radova iz primjenjene-inženjerske geodetije*
- *Izvođenje komasacija, arondacija, izrada parcelacijskih i ostalih agrarnih operata*
- *Trasiranje prometnica, kanala, vodovoda, dalekovoda i dr.*
- *Projektiranje geodetske osnove i praćenje izvođenja kod građevinskih objekata (tunela, mostova i dr.)*
- *Snimanje nadzemnih i podzemnih instalacija i izrada elaborata za iste*
- *Projektiranje planova i nacrti*
- *Fotokopiranje, fotouvećanje i fotoumanjenje svih vrsta dokumentacije*

Društvo obavlja i druge djelatnosti koje pridonose cjelovitijem i potpunijem obavljanju registrirane djelatnosti.

JAVNO VODOPRIVREDNO PODUZEĆE

"CETINA" s p.o. SINJ

21230 SINJ, M. BULJANA b.b. tel centrala: 021/821-528, direktor: 021/821-190, fax: 021/821-877

Djelatnosti JVP "CETINA" SINJ

- *Vodoprivredna djelatnost*
- *Viskogradnja*
- *Niskogradnja i hidrogradnja*
- *Cestovni prijevoz*
- *Obrtničke usluge i popravci*
- *Inženjering*
- *Ekonomске i organizacijske usluge*



BRELA 1995

MEĐUNARODNA KONFERENCIJA SANACIJA BRANE PERUČA



ZBORNİK RADOVA

