

Primljen / Received: 20.9.2014.

Ispravljen / Corrected: 2.4.2015.

Prihvaćen / Accepted: 22.5.2015.

Dostupno online / Available online: 10.6.2015.

Hidroelektrana Ombla - projekt za energetska iskorištenje podzemnih voda u kršu

Autori:



Tomislav Paviša, dipl.ing.građ.
Dubrovnik
Tomislav.Pavisa@hep.hr



Zvonimir Sever, dipl.ing.građ.
Elektroprojekt Zagreb
zvonimir.sever@elektroprojekt.hr

Stručni rad

[Tomislav Paviša, Zvonimir Sever](#)

Hidroelektrana Ombla - projekt za energetska iskorištenje podzemnih voda u kršu

Energetski potencijal površinskih vodotoka na krškom terenu dinarida, koji se u širokom pojasu proteže uz hrvatsku obalu, većim je dijelom iskorišten. Međutim, značajni dio voda koje se akumuliraju u krškom podzemlju ovog velikog prostora nije do danas adekvatno energetska vrednovan. Na osnovi rezultata opsežnih istraživanja izrađen je projekt HE Ombla čija je posebnost da su joj sve građevine smještene u podzemlju te da se koristi voda iz podzemne akumulacije, stvorene izgradnjom podzemne brane.

Ključne riječi:

podzemne vode, krški teren, podzemna brana, energetska potencijal, podzemna akumulacija

Professional paper

[Tomislav Paviša, Zvonimir Sever](#)

Ombla hydropower plant – design for use of groundwater energy in karst

The water power potential of surface watercourses in Dinaric karst areas, spreading in a wide belt along Croatian coast, has for the most part already been put to practical use. However, water power benefits of a significant quantity of water accumulated in the karst underground of this vast area have not so far been adequately exploited. Based on extensive research, the design has been prepared for the Ombla hydropower plant whose specific feature is that all its structures are buried underground, while the water would come from an underground water storage, to be created by construction of an underground dam.

Key words:

ground water, karst terrain, underground dam, water power potential, underground water storage

Fachbericht

[Tomislav Paviša, Zvonimir Sever](#)

Das Wasserkraftwerk Ombla - ein Projekt zur Energienutzung des Grundwassers im Karstgebiet

Energiepotenziale der Oberflächenwasserströme auf dem Karstgebiet der Dinariden, das sich weit entlang der kroatischen Küste ausbreitet, sind größtenteils ausgeschöpft. Ein bedeutender Teil der im Untergrund des Karstgebiets akkumulierten Gewässer ist jedoch bis heute hinsichtlich der Energienutzung nicht entsprechend ausgewertet. Aufgrund von Resultaten ausführlicher Untersuchungen ist das Projekt WKW Ombla entstanden. Es zeichnet sich insbesondere dadurch aus, dass es ausschließlich unterirdische Objekte umfasst und auf der Nutzung eines unterirdischen Stausees beruht, der durch den Bau eines unterirdischen Dammes entstand.

Schlüsselwörter:

Grundwasser, Karstgebiet, unterirdischer Damm, Energiepotenzial, unterirdischer Stausee

1. Uvod

Ideja o mogućnosti izgradnje specifičnog višenamjenskog hidroenergetskog postrojenja HE Ombla ovisila je prije svega o mogućnosti stvaranja podzemne akumulacije, zbog čega su gotovo sva istraživanja bila usmjerena na prostor podzemne akumulacije i na zonu pregradnog profila podzemne brane. Rezultati istraživanja, koji su objedinjeni u više specijalističkih studija [1-10], pokazali su da u ovom prostoru postoji prirodna podzemna retencija koja se prazni na izvoru Omble, te da je moguće stvoriti podzemnu akumulaciju i time omogućiti racionalno gospodarenje vrlo značajnim količinama vode. Izradom idejnog i glavnog projekta HE Ombla [11, 12] te posebno završetkom modelskih ispitivanja na hidrauličkom modelu građevina za odvođenje velikih voda [13], potvrđeno je da su predložena rješenja građevina tehnički ostvariva, a energetske i gospodarske analize pokazuju visoku profitabilnost.

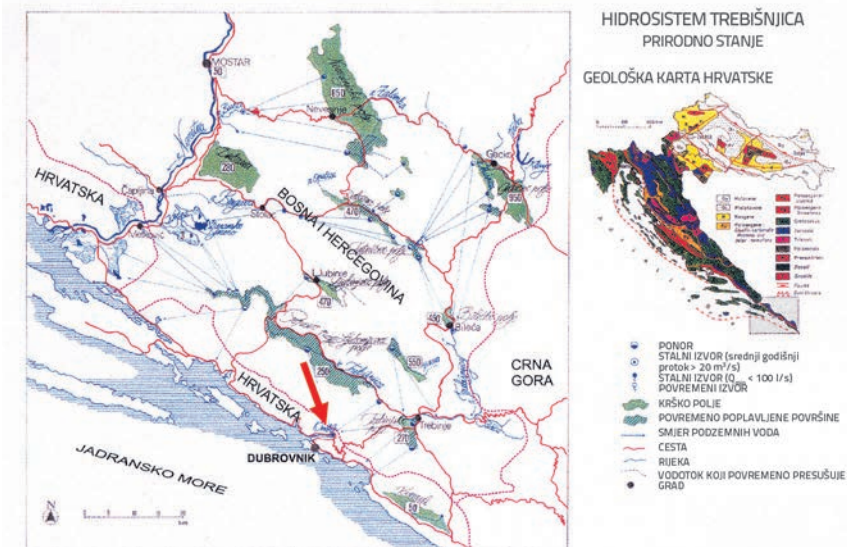
Ovaj sažeti prikaz rezultata istraživanja, odabrane koncepcije i projektnog rješenja hidroelektrane, ima cilj upoznati zainteresirane s ovim specifičnim projektom kojim se u zaleđu velikog kraškog izvora planira izgraditi podzemna brana i stvoriti podzemna akumulacija. Time se dobiva značajan proizvođač električne energije iz obnovljivih izvora, a zadržava se prirodni izgled krajolika izvora i time čuva okoliš. Istovremeno poboljšavaju se uvjeti vodoopskrbe Dubrovnika jer se korištenjem raspoloživog tlaka omogućuje gravitacijski dovod vode u vodospremu. Također sprječavaju se današnja povremena incidentna onečišćenja vode pojavom povećane mutnoće [14].



Slika 1. Izvor Omble u zaljevu Rijeke dubrovačke

2. Značajke slivnog područja

Izvor Omble tipičan je priobalni krški izvor vrlo značajne izdašnosti. U prirodnim uvjetima, prije izgradnje objekata hidroenergetskog sustava na rijeci Trebišnjici, on je funkcionirao

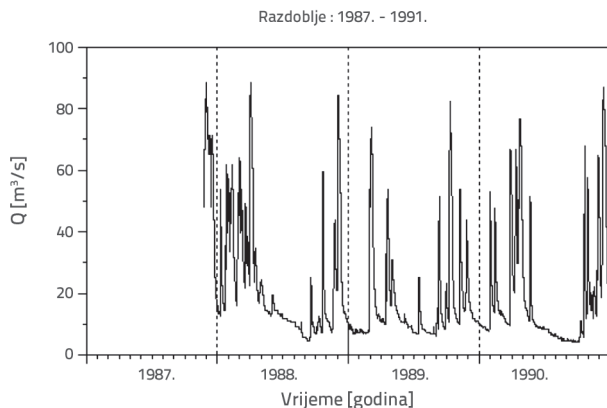


Slika 2. Hidrosustav Trebišnjica i izvor Ombla (označen strelicom) - prirodno stanje

kao drenažni sustav, koji je omogućavao odljev voda vlastitog i posrednog sliva najkraćim putem do mora. Taj izvor, šire promatrano, pripada slivu rijeke Trebišnjice, koji se po bogatstvu prirodnih obilježja ubraja u jedno od najinteresantnijih krških područja u Europi, slika 2.

2.1. Hidrološka obilježja

Izgradnjom hidrotehničkih objekata hidroenergetskog sustava Trebišnjica, vode posrednog sliva Omble zadržavaju se u akumulacijama i tunnelima se usmjeravaju prema nizvodnim hidroelektranama Trebinje I i II, Dubrovnik i Čapljina. Spomenute antropogene intervencije u prostoru izazvale su promjene prirodnog režima istjecanja izvora Omble. Dugogodišnja meteorološka opažanja pokazuju da ovo područje obiluje kišama, te da prosječno godišnje ovdje padne od 1400 mm u priobalju do 2200 mm u planinskom dijelu slivnog područja. Potpuno sušno razdoblje može potrajati i više od 90 dana, a da pritom izvor Omble nikada nije presušio.



Slika 3. Karakteristični hidrogrami dnevnih protoka Omble - današnje stanje

Na osnovi hidroloških analiza [15] utvrđen je današnji režim voda Omble koje dolaze iz njenog vlastitog sliva, koji je nastao nakon završetka izgradnje objekata hidroenergetskog sustava Trebišnjica, slika 3. Smanjenje srednjih protoka sa $Q = 34,2 \text{ m}^3/\text{s}$ na $Q = 23,9 \text{ m}^3/\text{s}$ posljedica je ispuštanja dotoka iz posrednog sliva. Pri tome su maksimalni protoci ostali nepromijenjeni, dok su se male vode povećale. Karakteristične vrijednosti današnjeg režima voda su:

$$Q_{sr} = 23,9 \text{ m}^3/\text{s}, \quad Q_{100 \text{ max}} = 113,0 \text{ m}^3/\text{s}, \quad Q_{100 \text{ min}} = 3,0 \text{ m}^3/\text{s}$$

2.2. Hidrogeološke karakteristike

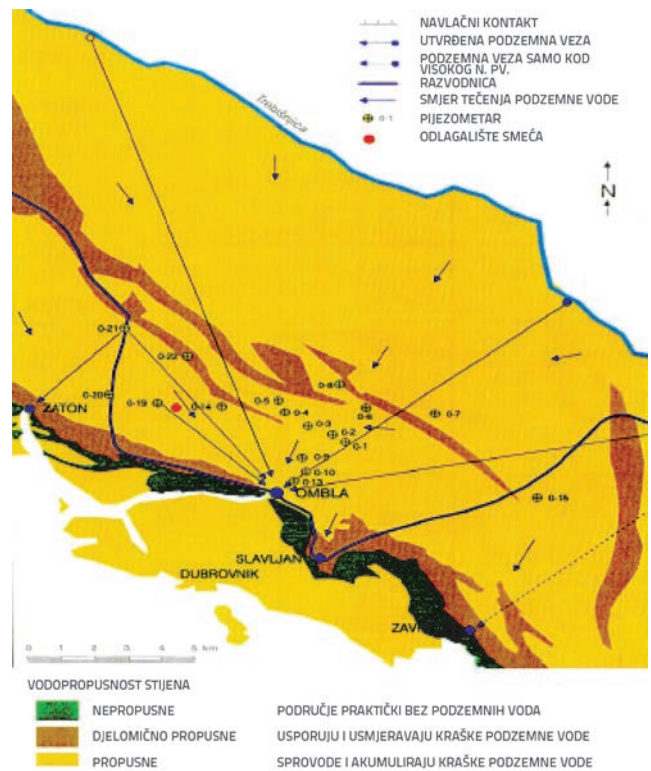
Na slivnom području izvora Omble dominiraju vapnenci i dolomiti, trijaskeske i kredne starosti. Vapnenci su dobro vodopropusne naslage, a dolomiti slabo vodopropusni i imaju hidrogeološku funkciju nepotpune hidrogeološke barijere koja usporava i usmjerava tokove vode u podzemlju. Eocenski sedimenti sastoje se od kompleksa flišnih naslaga u kojem dominiraju glinoviti lapori. Sedimenti kvartara prekrivaju dna kraških polja i vrtača. Osnovne strukturne i litostratigrafske jedinice izdužene su u smjeru pružanja dinarida, a kao posljedica intenzivne neotektonske aktivnosti nastala su izdužena kraška polja, čiji položaj slijedi pružanje osnovnih geoloških struktura. Glavnu i najviše rasprostranjenu litostratigrafsku jedinicu čine okršeni vapnenci (vodopropusne stijene). Znatno manje zastupljeni su dolomiti (slabopropusne do vodonepropusne stijene), dok je najmanje zastupljen fliš (vodonepropusna barijera).

Prema nižim horizontima površinska voda otječe putem brojnih većih ili manjih ponora, čiji je najveći kapacitet preko $50 \text{ m}^3/\text{s}$. Promjene razine podzemne vode vrlo su brze (do 100 m dnevno), a ukupne razlike minimalne i maksimalne razine podzemne vode iznose i do 200 m . Podzemni vodni tokovi od ponora prema izvoru dugački su i do 30 km . Brzine toka kroz špiljske kanale ovisno o hidrološkim prilikama variraju od 2 do 50 cm/s , [2]. Svi osnovni

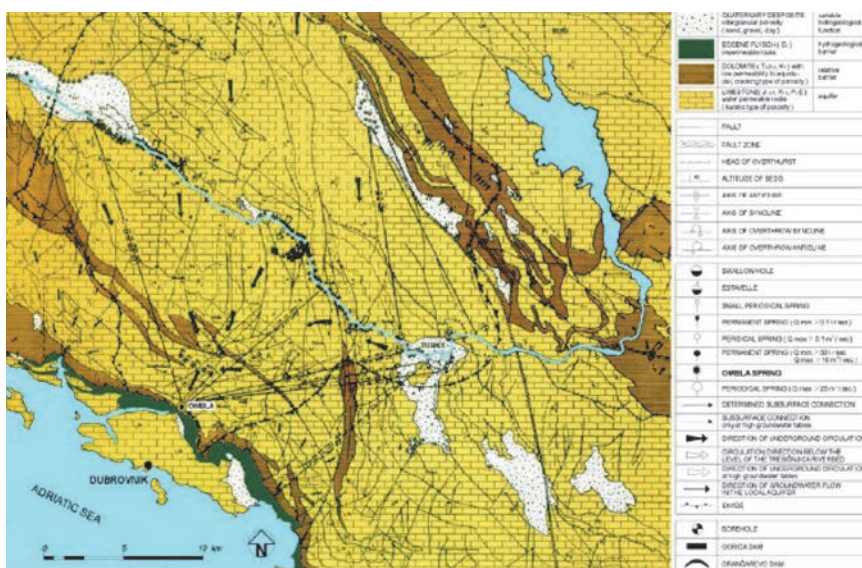
geološki i hidrogeološki čimbenici koji su utjecali na formiranje ovog krškog izvora prikazani su na hidrogeološkoj karti (slika 4.).

3. Istražni radovi

Činjenica da potpuno sušno razdoblje u slivnom području izvora Omble može potrajati i više od 90 dana, a da pritom izvor nikada nije presušio, pokazuje da u zaleđu izvora postoji prirodna retencija.



Slika 5. Dio sliva Omble, položaj piezometara, trasiranje podzemnih tokova

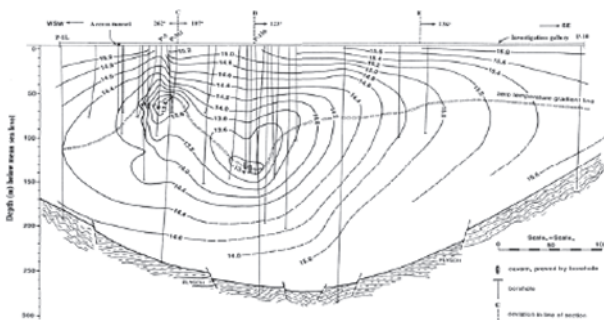


Slika 4. Hidrogeološka karta sliva Omble

Budući da je ocjena o mogućnosti stvaranja podzemne akumulacije vezana na dobro poznavanje hidrogeoloških karakteristika terena, odnosno vododrživost njenih bokova, najveći dio istraživanja bio je usmjeren na što bolje upoznavanje ponašanja prirodne podzemne retencije u zaleđu izvora Omble. Navedeni prostor retencije u zaleđu izvora Omble danas se povremeno aktivira.

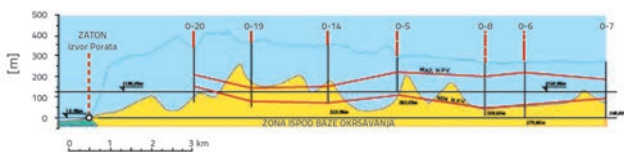
S tim ciljem izrađene su detaljne analize litostratigrafskih, hidrogeoloških [2] i neotektonskih značajki [4] u prostoru planirane podzemne akumulacije Omble i posebno na граниčnim zonama prema slivnim površinama susjednih

izvora Palata u Malom Zatonu i Zavrelje ponad Mlina u Župi dubrovačkoj. Izbušene su 22 piezometarske bušotine prosječne dubine 350 m u karakterističnim zonama podzemne akumulacije na kojima su kontinuirano bilježene satne vrijednosti razine vode. Na izvoru Omble te na susjednim izvorima Palata i Zavrelje, gdje je postojala mogućnost da se u njihov sliv povremeno prelije dio voda iz sliva Omble, kontinuirano su registrirane satne vrijednosti veličine protoka. Dnevne vrijednosti oborina prikupljane su na 6 kišomjernih stanica raspoređenih na čitavom slivnom području. Radi što preciznijeg definiranja podzemne razvodnice slivova Ombla i Palata (Zaton), obavljeno je trasiranje podzemnih tokova iz više karakterističnih bušotina (slika 5.) [7-9]. U zoni buduće podzemne injekcijske zavjese izgrađen je istražni potkop dužine oko 1100 m, te izbušeno 30 bušotina ukupne dužine 3.400 m, koje su raspoređene duž dna i oba boka pregradnog profila, s ciljem da se utvrde zone veće oštećenosti stijenske mase te prostorno lociraju svi aktivni i fosilni špiljski kanali. Mjerenjem vodopropusnosti duž svih bušotina dobiveni su kvantitativni podaci o vodopropusnosti svih slojeva unutar istraživog profila.



Slika 6. Temperaturno polje duž pregradnog profila - položaj glavnog špiljskog dovoda

Termometrijskim mjerenjima u bušotinama na pregradnom profilu utvrđen je položaj glavnog i sporednog špiljskog dovoda, a dobiveno temperaturno polje (slika 6.), uz mjerenje VDP-a na najbolji način pokazuje do koje je dubine karbonatna stijenska masa jače okršena, odnosno do koje dubine treba planirati injekcijsku zavjesu, slike 7. i 8.



Slika 7. Baza okršavanja, minimalne i maksimalne razine podzemne vode

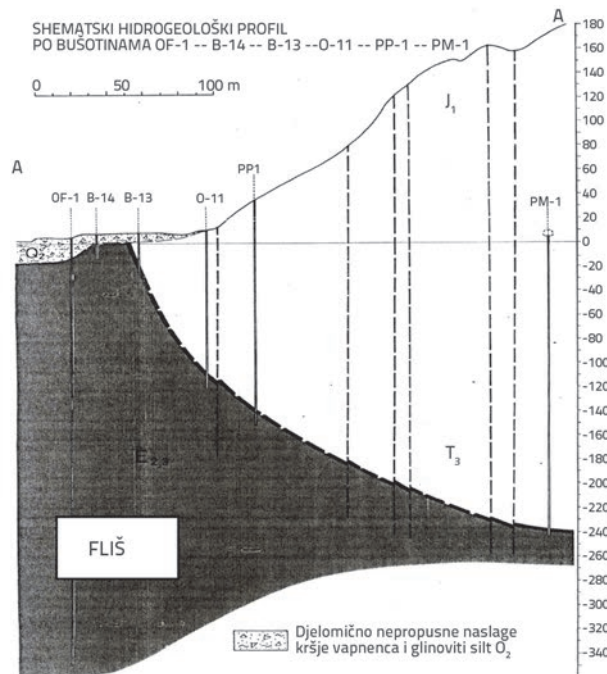


Slika 8. Granica karbonatnog i flišnog kompleksa na padinama bočno od izvora Omble

Detaljnim geološkim i strukturno tektonskim kartiranjem, geofizičkim istražnim radovima, zatim determinacijom bušotina koje su izbušene na površini terena s obje strane izvora i u istražnom potkopu, utvrđeni su strukturni odnosi u zoni budućih građevina i izdvojene su zone rasjeda (slike 9. i 10.). Bušenjem je potvrđeno da je debljina fliša u podini veća od 350 m, dok geofizička ispitivanja pokazuju da je debljina fliša u podini veća od 950 m.

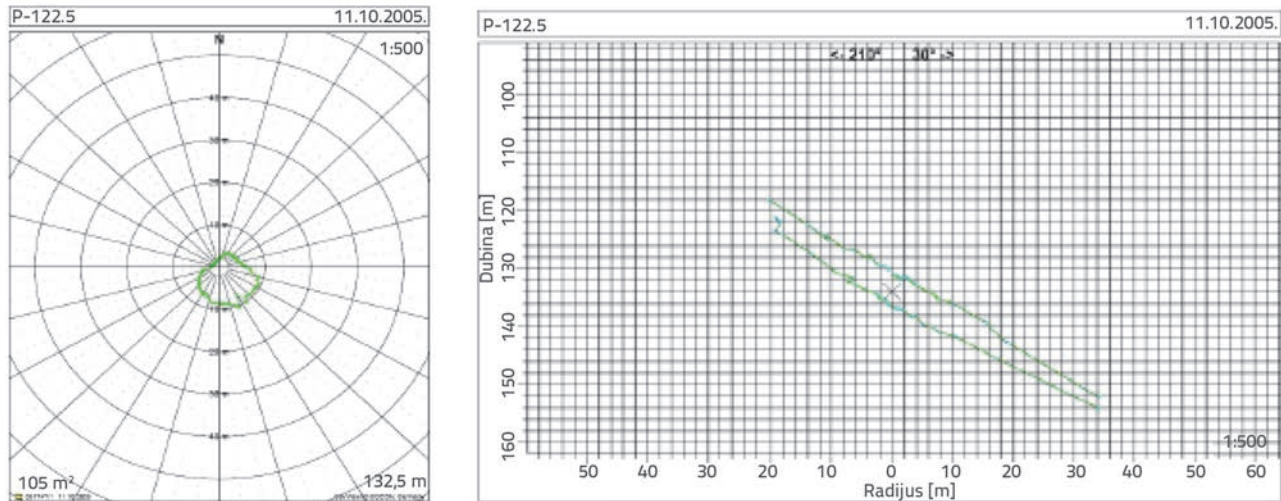


Slika 9 Strukturni odnosi u zoni izvora



Slika 10. Strukturni odnosi u zoni izvora - pregradnog profila, presjek

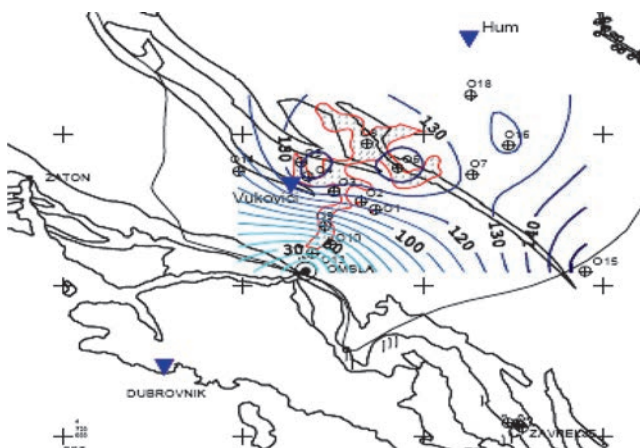
Glavni dovodni kanal snimljen je ultrazvučnom metodom u profilu injekcijske zavjese i uzvodno u izvorskoj špilji. Snimak glavnog dovodnog kanala ultrazvučnim sonarom (slika 11.), [16]. Posebno je važan rezultat istraživanja da bi se moglo koncipirati projektno rješenje za izradu betonskog čepa na dubini od 130 m, što je tehnički najzahtjevniji zahvat na podzemnoj brani.



Slika 11. Horizontalni i uzdužni presjek glavnog špiljskog dovoda u zoni pregradnog profila

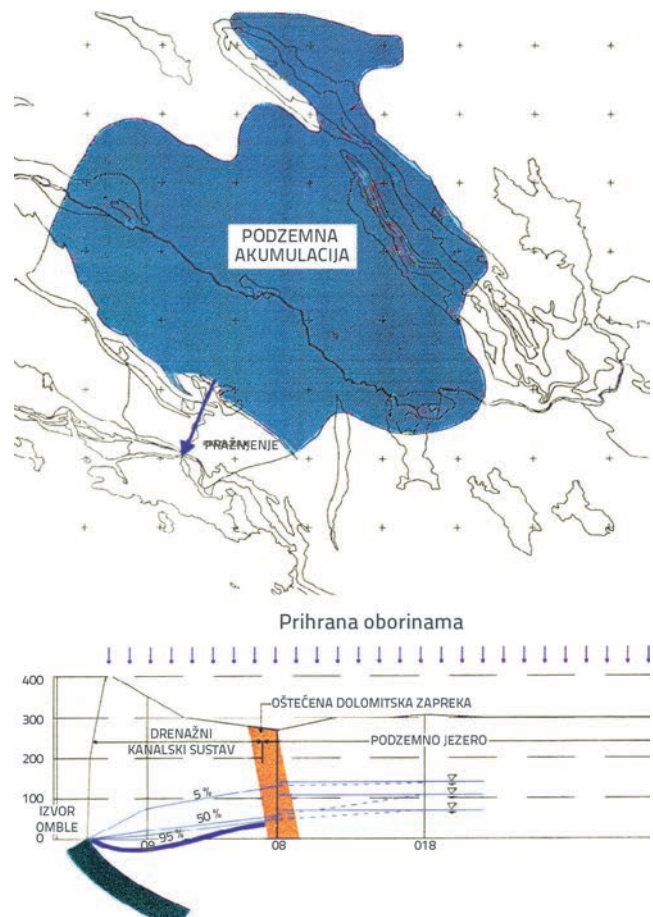
4. Podzemna akumulacija

Današnje i buduće promjene razine vode u podzemnoj akumulaciji i njeno pražnjenje u uvjetima stvaranja uspora na pregradnom profilu buduće injekcijske zavjese originalno se i vrlo detaljno obrađuje u studiji "HE Ombla numerički model ponašanja podzemne akumulacije u prirodnim i projektom definiranim uvjetima" [17].



Slika 12. Strujna slika za velike vode – prirodno stanje

Osnovno istraživanje širega područja prirodne podzemne retencije Ombla provedeno je primjenom geofizičke metode geoelektrično sondiranje. Ista metoda primijenjena je i pri istraživanju vododrživosti lijevog boka akumulacije Bileća. Poznato je da su izgradnjom brane Grančarevo izvori Trebišnjice potopljeni. Time je u zaleđu tog velikog izvora stvorena podzemna akumulacija visine oko 70 metara. Sličan primjer potapanja krških izvora ostvaren je izgradnjom brane Mratinje, odnosno formiranjem akumulacije HE Piva u Republici Crnoj Gori.



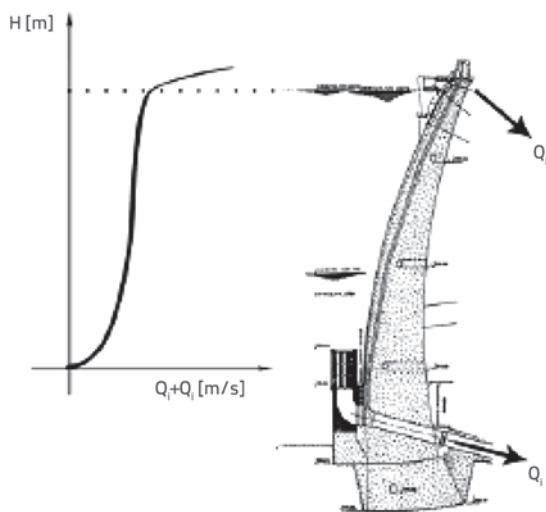
Slika 13. Osnovna shema podzemne retencije

Iskustva koja su tada stečena bila su posebno važna za izradu programa istražnih radova HE Ombla. Analizom rezultata istraživanja strukturnih odnosa, tektonskih oštećenja u zoni nepotpune podzemne dolomitne barijere za vode iz zaleđa,

geoelektričnog sondiranja u zoni akumulacije, te posebno strujnih slika za male, srednje i velike vode (slika 12.) [17], koje su izrađene na osnovi linije trajanja razine vode u piezometrima, stvoren je hidraulički model ponašanja podzemne akumulacije Ombla. Osnovna hidraulička shema ponašanja podzemne retencije sastoji se od dva dijela (slika 13.) [17]. Prvi dio koji je smješten uzvodno od podzemne dolomitne barijere ponaša se kao akumulacija koja se prazni kroz tektonski oštećenu dolomitsku zapreku. Drugi dio, koji je smješten nizvodno od podzemne dolomitne barijere, po površini je znatno manji. I taj se prostor puni vodom nakon svake kiše, ali zbog efektivne vodopropusnosti glavnog drenažnog kanala i postojanja sporednih drenažnih sustava, on se vrlo brzo prazni. U glavnom i sporednim kanalskim drenažnim sustavima odvija se turbulentan tok, dok u zonama pukotina i manjih šupljina prevladava difuzni i laminarni tok.

4.1. Preljevanje prema susjednim slivovima – izbor kote uspora

Krivulja zavisnosti razine vode u akumulaciji i ukupni izlazni protok, koja je prikazana na primjeru istjecanja vode iz neke akumulacije kroz temeljni ispušt brane i preko preljeva na kruni brane (slika 14.) [3], sastoji se od dva karakteristična dijela. Donji dio karakterizira istjecanje pod tlakom, dok gornji pokazuje da je došlo do naglog povećanja protoka, odnosno da se aktivirao preljev. Mjerenjem promjene razina vode u piezometrima na Ombli utvrđen je sličan oblik krivulje istjecanja.



Slika 14. Krivulja ovisnosti razine vode u akumulaciji i ukupni izlazni protoci

Analiza odnosa razine vode u karakterističnim piezometrima O8 i O18 (slika 15.) i ukupni protok Omble i susjednih izvora Palata i Zavrelje (slika 16.) [3], potvrdila je rezultate prethodnih

pokusa trasiranja tokova vode u podzemlju. Tada je dokazano da u današnjim prirodnim uvjetima povremeno dolazi do prelijevanja voda prema Palati i prema Zavrelju. Naime, obojenjem ponora Pridvorci utvrđeno je da se pri velikim vodama traser pojavljuje na Ombli i na Zavrelju, dok se pri malim vodama traser pojavio samo na Ombli [2].

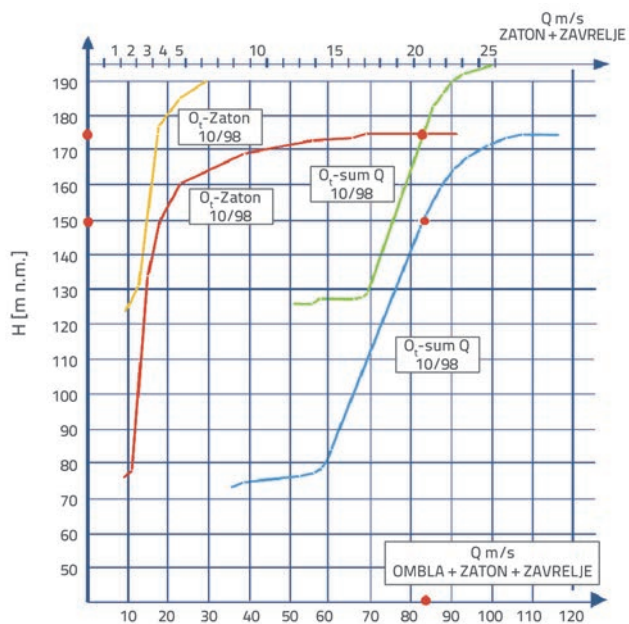


Slika 15. Položaj bušotina O8 u zoni oštećene podzemne dolomitne barijere i O18 u zoni akumulacije

Iako kod svih prethodnih trasiranja ponora u širem slivu Omble nije utvrđen traser na izvoru Palata, do prelijevanja ipak dolazi. Naime, obojenjem bušotine O21 (vidi sliku 5.) boja se pojavila i na Ombli (69,5 %) i na Palati (3,5 %), jer je ulijevanjem oko 150 m³ razina vode u bušotini kratkotrajno dosegla kotu oko 316 m n.m. [9], da bi se brzo vratila i stabilizirala na koti 135 m n.m. Da bi se provjerila vododrživost desnog boka prema izvoru Palata, ispod dolomitske zapreke, trasiranje je izvedeno iz bušotine O19. Razina podzemne vode dosegla je maksimum od 145 m n.m. i traser se pojavio samo na izvoru Ombla (vidi sliku 5.). Važno je istaknuti da kod tog pokusa traser nije registriran na malim izvorima Dračevo selo i Prijedor, koji su smješteni zapadno od Omble na kontaktu fliša i karbonatnih naslaga na koti oko 65 m n.m [9].

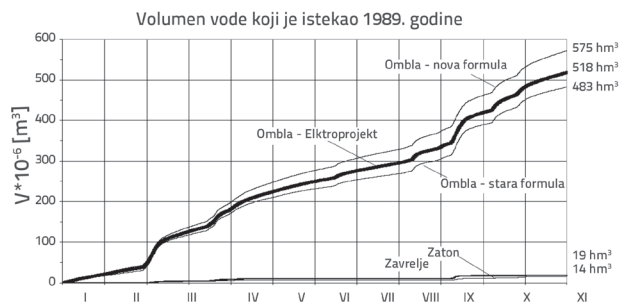
Iz grafičkog prikaza ovisnosti ukupnog protoka Ombla + Palata + Zavrelje i razine podzemne vode u piezometru O8, koji je smješten u zoni nepotpune podzemne dolomitne barijere (vidi sliku 16.) [3], vidljivo je da prelijevanje iz sliva Omble prema susjednim slivovima započinje kada u toj zoni razina vode poraste iznad kote 150 m n.m. U tom trenutku razina podzemne vode u piezometru O18, koji je smješten uzvodno od podzemne dolomitne barijere, u zoni podzemne retencije dosegne kotu 175 m n.m. [3].

U današnjim prirodnim uvjetima prosječna godišnja količina vode koja isteče na izvorima Palata iznosi 19 hm³, a na Zavrelju 14 hm³ (1989.), dok je na izvoru Ombla prema obradi Elektroprojekta isteklo 518 hm³.



Slika 16. Ukupni protok Ombla+Palata+Zavrelje i razine vode u bušotinama O8 i O18

Prema prijašnjim i novijim obradama, istjecanje na izvoru Ombla procjenjuje se u rasponu od 483 do 575 hm³ (slika 17.). Pogreška mjerenja na izvoru Ombla, ovisno o odabranoj protočnoj krivulji više autora, iznosi od 35 do 55 hm³ (slika 17.) [17].



Slika 17. Volumen vode Omble i susjednih izvora Zaton i Zavrelje koji je istekao 1989 god.

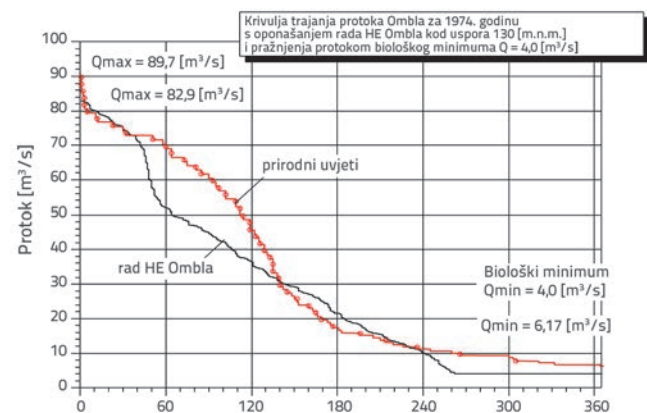
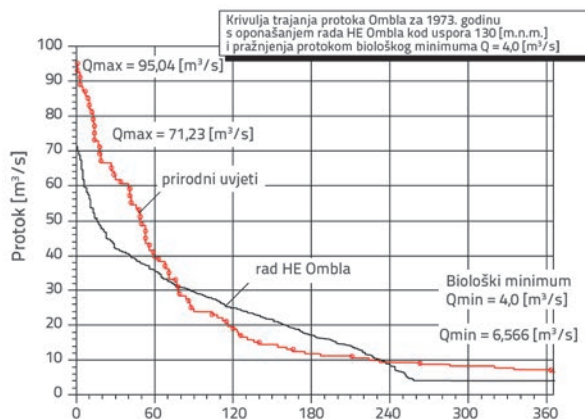
Uzimajući u obzir zaključke da izdizanjem vode iznad navedenih kota započinje punjenje treće etaže špiljskih dovoda Omble, odnosno da se tada stvaraju uvjeti za prelijevanje iz njenog sliva prema susjednim, te posebno da su špiljski kanali ove etaže najbolji put za uklanjanje zraka iz podzemlja prilikom punjenja akumulacije, čije bi eventualno zarobljavanje moglo izazvati poteškoće, kota od 130 m n.m. izabrana je kao prihvatljiva kota uspora za buduću hidroelektranu.

4.2. Istjecanje iz akumulacije u uvjetima uspora

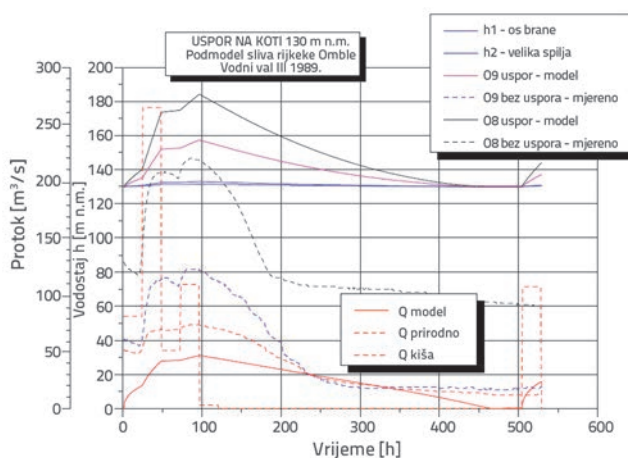
U uvjetima kako je definirano projektom, ponašanje podzemne akumulacije doživljava znatne promjene. Izdizanjem razine vode na kotu 130 m n.m. dolazi do bitne promjene oblika izlaznog

hidrograma, što se očituje u smanjenju maksimalnog protoka i produljenju trajanja istjecanja, a time i transformaciji prirodne krivulje trajanja protoka (slika 18.), [17].

Naravno pri tome dolazi do izdizanja razine vode u piezometrima duž glavnog kanalskog sustava, iznad maksimalnih kota zabilježenih u uvjetima prirodnog stanja (slika 19.), [17].

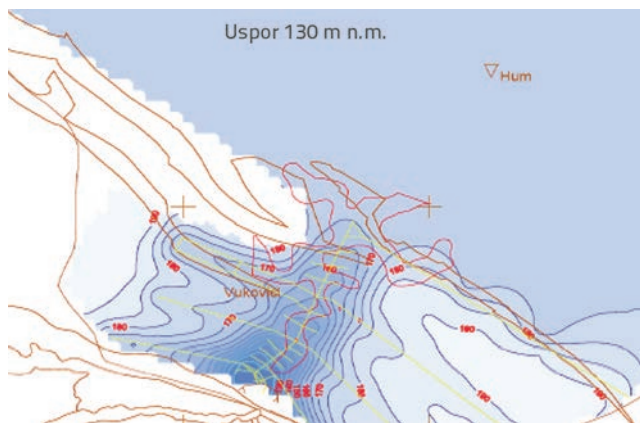


Slika 18. Krivulje trajanja za prirodne i projektom definirane uvjete sušne i vlažne godine



Slika 19. Piezometarske razine za visoke vodostaje i uspora 130 m n.m.

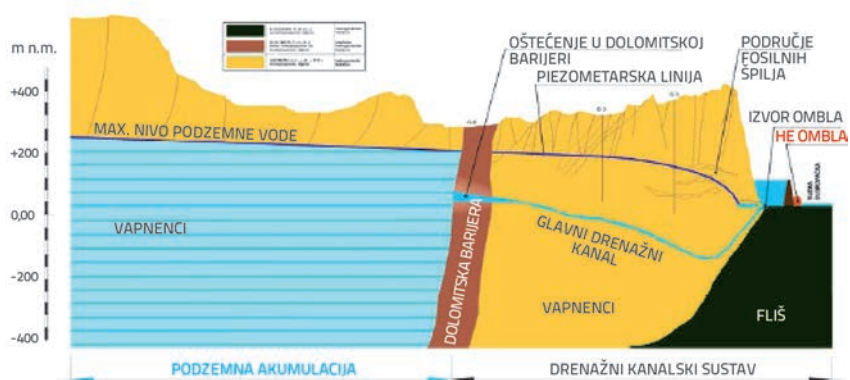
Za vrijeme vodnog vala u ožujku 1989. u prirodnim je uvjetima maksimalni protok iznosio $71 \text{ m}^3/\text{s}$, a akumulirana voda istekla je za 280 sati. Maksimalna razina vode u piezometru O8 bila je na koti 146 m n.m. Simulacijom na numeričkom modelu utvrđeno je da će za uspor na koti 130 m n.m., a za vodni val istih karakteristika, maksimalni protok iznositi $45 \text{ m}^3/\text{s}$, a akumulirana voda će isteći za približno 450 sati. Maksimalna razina vode u piezometru O8 za modeliranu efektivnu poroznost od 0,5 % u dubljim kotama (oko 70 m n.m.) do 0,1 % u visokim kotama (iznad 130 m n.m., slika 19) dosegnut će kotu 180 m n.m. (slike 19. i 20.) [17]. Dobiveni rezultati dovoljno su sigurni, pa se može očekivati da će razine vode biti znatno niže, a i mnogi autori dokazuju da je efektivna poroznost na višim kotama znatno veća (i do 3 %).



Slika 20. Razina u akumulaciji uzvodno i nizvodno od podzemne dolomitne barijere nakon stvaranja uspora

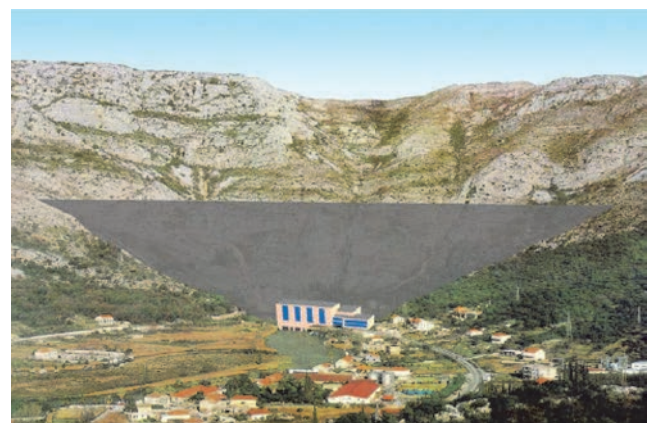
5. Projektno rješenje HE Ombla

Zamislao projekta temelji se na tome, da se izgradnjom injekcijske zavjese u zoni izvora Omble stvori podzemna brana, koristeći pri tome prirodni stijenski masiv kao tijelo brane, i tako osigura potrebni tlak za energetske korištenje [11, 15]. To konkretno znači da će u zoni glavnog i više sporednih drenažnih kanala, koji su smješteni nizvodno od podzemne dolomitne barijere, doći do izdizanja razine vode iznad današnjih razina prirodnog stanja i time će i ova drenažna zona biti pretvorena u dio jedinstvene podzemne akumulacije. U najvećem dijelu godine u ovoj akumulaciji održavat će se kota uspora od 130 m n.m. Tijekom razdoblja ekstremnih suša, kada minimalni protok padne ispod $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$, numerički model pokazuje da će maksimalnu kotu uspora trebati postupno obarati do minimalne razine od približno 75 m n.m. [17]. Pri postavljanju tehničke odluke trebalo je riješiti osnovni problem, to jest kako izgraditi branu visine 130 m a da se pritom ne naruši prirodni okoliš. Područje izvora Omble



Slika 21. Shematski prikaz izvora Omble s branom u zaljevu Rijeke dubrovačke

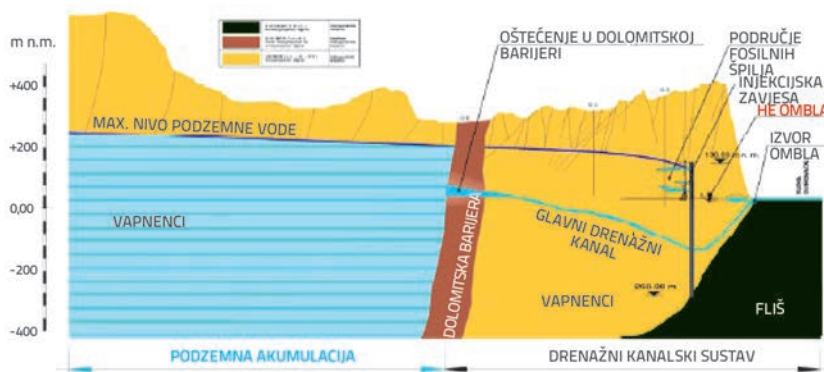
karacterizira vrlo lijep krajolik. Tu se također nalaze i zaštićeni spomenici ladanjske arhitekture. Izgradnja klasične nasute brane s pripadajućim kompenzacijskim bazenom promijenila bi taj prirodni sklad (slike 21. i 22.) [11].



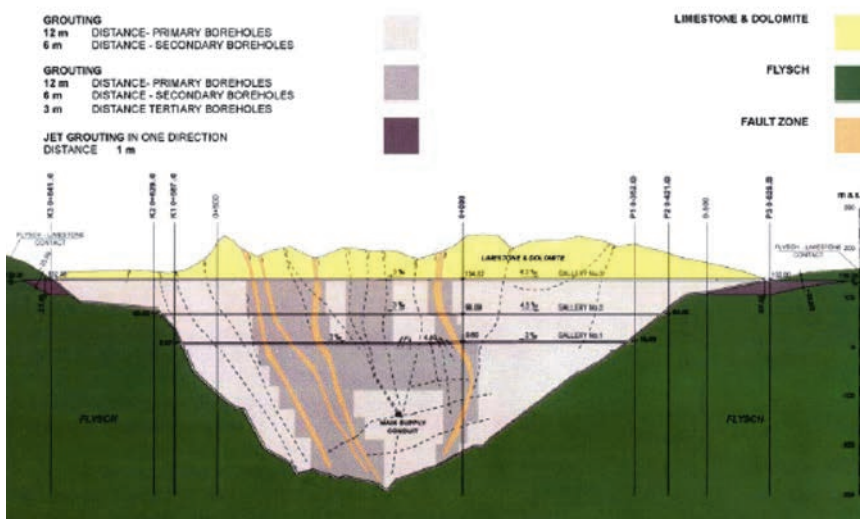
Slika 22. Krajolik izvora Omble s nasutom branom i zgradom elektrane - moguće varijantno rješenje

Zbog toga je odlučeno da se brana locira u podzemlje na način da se izvedbom injekcijske zavjese u podzemlju stvori nepropusna barijera, a da kao tijelo brane posluži prirodni brdski masiv. Brana se po konturi oslanja na nepropusnu flišnu barijeru. Injekcijska zavjesa je površine oko 300.000 m^2 i izvodi se iz tri injekcijske galerije na kotama 5, 60, 134 m n.m. ukupne dužine oko 3500 m (slike 23., 24. i 25.). Osobito tehnički i tehnološki složen zahvat pri stvaranju podzemne brane predstavlja ugradnja čepa u podzemni prirodni dovodni kanal duž injekcijske zavjese na dubini od 130 m.

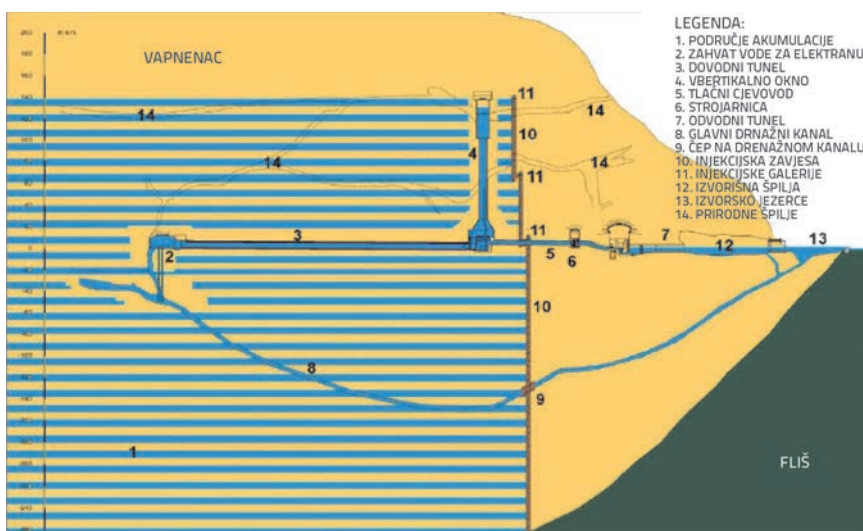
Smještaj brane u podzemlje odredio je lociranje i svih funkcionalnih cjelina HE Ombla u podzemlje. Izuzetak je samo upravna zgrada elektrane koja se po svojem volumenu i oblikovanju može dobro uklopiti u okoliš. Takvim rješenjem potpuno će biti sačuvan prirodni sklad područja izvora Omble. Postrojenje je u potpunosti skriveno pod zemljom, a u području izvorskog jezera vidi se samo istjecanje na mjestu glavnog izvora, što vizualno odgovara današnjem prirodnom stanju.



Slika 23. Shematski prikaz izvora Omble s podzemnom branom



Slika 24. Presjek na pregradnom profilu podzemne brane



Slika 25. HE Ombla - uzdužni presjek kroz dovodni tunel i strojarnicu

Zahvat vode za HE Ombla nalazi se oko 550 m od ulaza u pristupni tunel hidroelektrani, u prirodnoj špilji koja je smještena iznad glavnog prirodnog dovodnog kanala kroz koji u prirodnom

udaljenosti 126 m od ulaza u tunel, koji je ujedno i kolni prilaz i pješački ulaz za oba objekta. U strojarnici smještene su četiri proizvodne jedinice, dvije s Francisovim turbinama za nazivni

stanju dotječe više od 90 % ukupnog dotoka na izvor Omble. Tlačni tunel dužine 250 m spaja zahvat s vertikalnim oknom. Paralelno s tunelom, od zahvata vode do vertikalnog okna, smješten je tunel za pristup vodozahvatu.

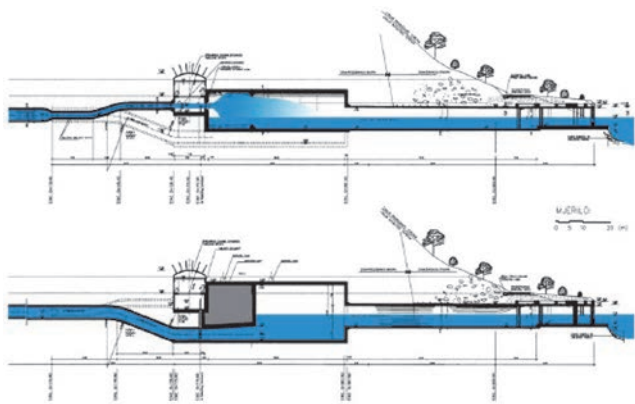
Vertikalno okno se nalazi unutar akumulacije i središnji je sabirni i distributivni objekt cijelog hidrotehničkog sustava HE Ombla, u kome se sastaju dovodni tunel, temeljni ispust, tlačni cjevovod, pristupni tunel i jednim se krakom priključuje tunel dubrovačkog vodovoda. Okno je visine 136 m, promjenjivog promjera od 5 do 10 m. Ono služi za odzračivanje podzemlja u slučaju da se tamo nađu zarobljeni zračni mjehuri te za preuzimanje preljevnih voda i upućivanje prema vrtložnom preljevu. Zbog toga je okno locirano na spoju dovodnog tunela i tlačnog cjevovoda, te brzotoka vrtložnog preljeva na svom gornjem dijelu. Radi povezivanja svih fosilnih špilja na višim kotama do 130 m n.m te mogućnosti zahvata vode za dubrovački vodovod u špilji na koti 55 m n.m, okno je postavljeno tako da se najkraćim horizontalnim vezama mogu povezati fosilne špilje raznih etaža. Također okno služi kao mjesto gdje će se izolirati pojedini tunel i preusmjeriti tok vode za potrebe pregleda ili popravka u vrijeme malih protoka Omble. U oknu je smještena galerija sa zatvaračem, odakle se izvodi zatvaranje pojedinog tunela. Zatvarači su za vrijeme rada elektrane potopljeni. Galerija je vezana s pristupnim tunelom, odnosno s njegovim dijelom koji se nalazi unutar akumulacije iza tlačnih vrata.

Tlačnim cjevovodom voda se dovodi od vertikalnog okna do turbina. Na udaljenosti 120 m od vertikalnog spojnog okna nalazi se zatvaračnica s leptirastim zatvaračem. Nakon zatvaračnice cjevovod se račva u četiri grane i spušta u strojarnicu. Srojarnica i rasklopno postrojenje 110 kV smješteni su nasuprot jedno drugom u istoj kaverni dužine 70 m, širine 18 m i visine 30 m, te odvojeni pristupnim tunelom na

protok $Q_i = 2 \times 24 \text{ m}^3/\text{s}$ i sinkronim generatorima $2 \times 30 \text{ MW}$, te dvije manje jedinice za nazivni protok $Q_i = 2 \times 6 \text{ m}^3/\text{s}$ i sinkronim generatorima $2 \times 8 \text{ MW}$. Hidroelektrana Ombla radit će u protočnom režimu rada. Ukupna instalirana snaga elektrane je 68 MW , a srednja godišnja proizvodnja u prosječno vlažnoj godini je 223 GWh . Nakon prolaska kroz turbine i izlaska iz difuzora voda se odvodi odvodnim tunelom do prirodne izvorske špilje. Špilja se prostire oko 60 m u dubinu, širina joj iznosi oko 40 m , a visina od 10 do 15 m . Iz izvorske špilje voda kroz izlaznu građevinu teče u izvorsko jezerce i preko preljeva u Rijeku dubrovačku.

Posebnost je ovog hidroenergetskog postrojenja u tome što se dovodni tunel spaja na glavni špiljski kanal na mjestu koje se nalazi oko 300 m uzvodno od profila injekcijske zavjese. Ispuštanje velikih voda provodi se pomoću temeljnog ispusta s dva konusna zatvarača i preko vrtložnog preljeva na krani brane. Posebnim rješenjem omogućeno je da dovodni tunel i temeljni ispust tijekom građenja djeluju kao optočni tunel.

Temeljni ispust proteže se od vertikalnog okna do Rijeke dubrovačke i nalazi se u potpunosti, uključujući i njegovo slapište, pod zemljom. Temeljni ispust, osim funkcije ispuštanja vode, ima i funkciju sigurnosnog preljeva te služi za odvodnju voda tijekom izgradnje HE Ombla. Dimenzioniran je tako da odvodi protok stogodišnjeg povratnog razdoblja od $120 \text{ m}^3/\text{s}$. Sastoji se od tunela kružnog poprečnog presjeka promjera $D = 4,0 \text{ m}$, glavne zatvaračnice s dva Howel-Bunger zatvarača i jednim pločastim, slapišne komore, odvodnog tunela potkovastog presjeka te prelivne komore uz obalu Rijeke dubrovačke (slika 26.).



Slika 26. Temeljni ispust – uzdužni presjek

Zbog složenosti hidrauličkih pojava na ovom objektu bilo je nužno, nakon izrade idejnog projekta, uz teoretske hidrauličke proračune, obaviti i odgovarajuća hidraulička modelska istraživanja na fizikalnom modelu [13] kao podlogu za izradu glavnog projekta. Trebalo je ispitati vezu između oblikovanja konusnog zatvarača i disipacije energije u slapišnoj komori kako bi se dobilo maksimalno prigušenje energije. Također bilo je potrebno istražiti tečenje u odvodnom tunelu i optimizirati oblik izlazne komore temeljnog ispusta. Hidraulička modelska istraživanja pružila su projektantu detaljniji uvid u hidrauličke

uvjete tečenja, što je u konačnici rezultiralo odgovarajućim preinakama i optimizacijom u smislu promjena rješenja i oblika objekta (slika 27.).



Slika 27. Ispitivanje temeljnog ispusta na fizikalnom modelu; pločasti i Howel-Bungerovi zatvarači

Vrtložni preliv koncipiran je tako da prihvaća vodu iz vertikalnog okna, te je brzotokom prevodi preko krune brane. Posebno konstruiranim ulaznim dijelom, koji omogućuje stvaranje vrtložnog toka, voda se usmjerava u vertikalno silazno okno visine 130 m , koje je zbog vrtložnog strujanja ozračeno po čitavoj visini. Na dnu okna u bučnici uništava se veći dio energije i voda nastavlja teći kraćim odvodnim tunelom. Tečenje je sa slobodnim vodnim licem, što omogućuje dobro ozračivanje, te na kraju voda izlazi u prostor izvorske špilje. Uvjete tečenja u vrtložnom prelivu trebalo je provjeriti i na hidrauličkom modelu [13]. Cilj ispitivanja na modelu bilo je postizanje ravnomjernog zavojnog uvođenja prelivnih voda u prelivno okno s postojanjem slobodne zračne jezgre. Osim toga, trebalo je odrediti i najpovoljniji oblik zidova prijelazne dionice brzotoka radi izjednačavanja pojave stojnih valova u izlaznom presjeku te veličinu i oblik bučnice okna vrtložnog preljeva radi ostvarivanja mirnog tečenja slobodnim vodnim licem u odvodnom tunelu (slika 28.).



Slika 28. Ispitivanje vrtložnog preljeva na fizikalnom modelu

Crpna stanica postojećeg dubrovačkog vodovoda smještena je uz izvorsko jezerce. U okviru projekta Ombla, zahvat za opskrbu vodom grada Dubrovnika predviđa se na tri mjesta; u prirodnoj špilji oko 500 m u podzemlju gdje se nalazi i zahvat za elektranu, u vertikalnom oknu na koti $55,0 \text{ m n.m.}$ te u

Tablica 1. Injekcijske zavjese nadzemnih brana u kršu dinarida

Naziv i visina brane [m]	Tip	Geološki sastav stijene	Maksimalna dubina [m]	Injektirano [m]	[m/m ²]	Masa	Utrošak mase [kg/m ²]
Brane na kršu							
<i>Liverovići, 49</i>	BL	vapnenac i dolomit	140	29.600	0,66	cpb	80
<i>Peruča 65, desna lijeva prosječna</i>	K	kredni vapnenac	200	68.000 72.700 140.700	0,58 0,58 0,58	cbg 50/25/25 cg 25/75	176 248 210
<i>Krupac, krila, zone</i>	1 2 3	vapnenac i dolomit	42 30 25	4300 2400 4400	0,42 0,57 0,47	cpg 23/40/37	528 320 127
<i>Široka ulica (bočna)</i>	-	vapnenac	75	18.200	0,35	cg 33/67	202
<i>Gorica, 30</i>	BG	vapnenac	70	8700	0,46	cg 40/60	122
<i>Grančarevo, 123</i>	BL	vapnenac, Jura	195	17.700	0,28	cg 33/67	49
<i>Sklope, 78</i>	K	vapnenac i vap. breča	120	55.700	0,59	cg 60/40	290
<i>Rama, 100</i>	K	vapnenac i dolomit	200	32.600	0,38	cb 95/5	42
<i>Špilje, 110</i>	K	vapnenac i škriljevci	145	90.500	0,48	c	277
<i>Letaj, 33</i>	BL	vapnenac	20	950	0,60	c	260*
<i>Podgradina, 125</i>	K	eocenski vapnenac i lapor	65	7500	0,15	c/g 30/70	10
<i>Kazaginac, 20</i>	K	kredni vapnenac	126	74.800	0,31	c/g 30/70	48
<i>Kazaginac, bok</i>		kredni vapnenac	80	14.800	0,34	c/g 30/70	304
<i>Metiljevica</i>	-	kredni vapnenac	67	7100	0,27	c/g 30/70	123
<i>Poždrikoza</i>	-	kredni vapnenac	-	28.700	0,51	c/g 30/70	125
<i>Sinjski ponor</i>		kredni vapnenac	-	31.600	0,25	c/g 30/70	139
<i>Župica, 23</i>	K	vapnenac	185	41.720	0,34	c	34
<i>Bokanjčko blato</i>	-		32	11.000	0,22	c	90
<i>Martinje, 220</i>	BL	vapnenac	278			c	

Tablica 2. Podzemne brane i akumulacije u kršu na japanskim otocima

Podzemne brane u vapnenačkim stijenama izgrađene u Japanu							
Podzemne brane	Lokacija podzemne brane		Godina gradnje	Visina [m]	Dužina [m]	Veličina akumulacije [m ³]	Protok [m ³ /dan]
Minafuku	Okinava	Gusukube	1979.	16,5	500	720.000	7000
Sunagawa	Okinava	Gusukube	1987. - 1994.	50	1677	9.500.000	24.000
Fukusako	Okinava	Gusukube	1993. - 2000.	27	1790	10.500.000	30.000
Kikai	Kagoshima	Kikai	1993. - 2002.	36	2190	1.681.000	
Komesu	Okinava	Itoman	1993. - 2003.	80	2489	3.457.000	89.000
Giza	Okinava	Gushikami	1998. - 2003.	51	955	389.000	1200
Kanjjin	Okinava	Gushikava	1996. - 2003.	52	1088	158.000	

7. Izgrađene podzemne brane u svijetu

Do sada izgrađene u svijetu podzemne brane s pripadajućim podzemnim akumulacijama u krškom terenu najbolje su prikazane u radu [19], gdje je spomenuta i podzemna brana Ombla. U tablici 2. prikazane su izgrađene podzemne brane (do 2003. godine) na japanskim otocima oko Okinawe. Navedene podzemne brane s pripadajućim akumulacijama izgrađene su za potrebe vodoopskrbe i navodnjavanja.

Zanimljivo je istaknuti da se i kod ove koncepcije korištenja podzemnih voda, položaj baze okršavanja koristi kao glavni rezultat hidrogeoloških istraživanja, a sve radi osiguranja vododrživosti bokova podzemne akumulacije

8. Zaključak

Projekt hidroenergetskog postrojenja HE Ombla predstavlja potpuno nov pristup u korištenju vodnih snaga za proizvodnju električne energije. Takav je pristup na lokaciji izvora Omble moguć jer tu postoje odgovarajući hidrogeološki uvjeti koji su karakteristični za područja u kršu. Smještajem cijele građevine u podzemlje smanjuju se troškovi građenja i, što je posebno važno, izbjegava se narušavanje prirodnog okoliša. Na taj je način moguće tako složene građevine kao što su hidroelektrane graditi u ekološki osjetljivim predjelima.

Rezultati vrlo opsežnih i dugogodišnjih istraživanja te zaključci brojnih studija jasno pokazuju da je u zaleđu kraškog izvora Omble moguće stvoriti podzemnu akumulaciju. Razrađena projektna rješenja pojedinih građevina potvrđuju da je ideja o izgradnji podzemne akumulacije i pripadajuće hidroelektrane tehnički ostvariva, te da je cjelokupni projekt vrlo profitabilan. Osim toga, izgradnjom hidroelektrane postići će se poboljšanje vodoopskrbe Dubrovnika. Zbog izdizanja razine vode neće biti potrebna upotreba crpki, a što je još važnije riješit će se današnji problemi vezani za povećanu mutnoću i pojavu povremenog onečišćenja vode. Injekcijske zavjese, koje su izgrađene u temeljima svih nadzemnih brana u kršu dinarida (Peruča, Grančarevo i ostale), na najbolji način potvrđuju uspješnost predloženog načina osiguranja vododrživosti podzemne brane HE Ombla.

Do sada izgrađene podzemne brane s pripadajućim podzemnim akumulacijama u krškom terenu japanskih otoka jasno pokazuju svjetski trend u izgradnji brana i novog načina upravljanja vodnim resursima, odnosno novi način osiguranja potrebnih količina vode, koje u svijetu sve više nedostaje. U tom smislu projekt HE Ombla slijedi taj trend kao prvi takav projekt na području Mediterana. Također treba napomenuti da Ombla nije jedini lokalitet na području dinarskog krša u Hrvatskoj na kojem se može ostvariti korištenje voda iz podzemne akumulacije, što upućuje na veliki još neiskorišteni potencijal upotrebe podzemnih voda.

LITERATURA

- [1] Energija iz kraškog podzemlja, HE Dubrovnik, 1989.
- [2] Milanović, P. i dr.: HE Ombla, idejni projekt, geološki elaborat. Knjiga I-V, Energoprojekt, Beograd, 1989.
- [3] Paviša, T.: Analiza ponašanja podzemne akumulacije Ombla u prirodnim uvjetima, Elektroprivreda Hrvatske, Dubrovnik, 1993.
- [4] Prelogović, E., Buljan, R., Fritz, F.: HE Ombla, Strukturna istraživanja, Institut za geološka istraživanja, dokumentacija br. 111/94, Zagreb, 1994.
- [5] Paviša, T.: Položaj glavnog špiljskog kanala i određivanje protoka, HEP Dubrovnik, 1994.
- [6] Paviša, T.: Analiza ponašanja podzemne akumulacije u razvodnici prema Palati, 1995.
- [7] Biondić, B., Pavičić, A.: HE Ombla, Ocjena maksimalne kote uspora podzemne akumulacije, Institut za geološka istraživanja, dokumentacija br. 109/95, Zagreb, 1995.
- [8] Prelogović, E., Buljan, R.: HE Ombla, Lokacija pregrade i objekata - strukturni model, Institut za geološka istraživanja, br. 113/95, Zagreb, 1995.
- [9] Renić, A.: HE Ombla, Izvještaj o rezultatima provedenog trasiranja tokova podzemne vode kroz bušotinu O19, Institut za geološka istraživanja, dokumentacija br. 32/96, Zagreb, 1996.
- [10] Prelogović, E., Buljan, R.: HE Ombla, Strukturno-geološko kartiranje duž glavnog, desnog i lijevog tunela (pristupni tunel i galerije), Hidroinženjering, dokumentacije br. 11/96, Zagreb, 1996.
- [11] Sever, Z. i dr.: HE Ombla, Idejni projekt, Hrvatska elektroprivreda, Elektroprojekt, Zagreb, 1998.
- [12] Sever, Z.: HE Ombla - Glavni projekt, Elektroprojekt, Zagreb, 2011.
- [13] Andročec, V., Babić, M.: HE Ombla, Rezultati modelskih ispitivanja organa za evakuaciju velikih voda, IGH Zagreb, 2007.
- [14] Izvješće o ispitivanju vode Omble, Zavod za javno zdravstvo grada Zagreba, 1997.
- [15] Sever, Z.: HE Ombla, Idejni projekt - Otešnjenje pregradnog mjesta, Elektroprojekt, Zagreb, 1996.
- [16] Snimak glavnog špiljskog dovoda, SOCON Sonar Control Kavernenvermessung, Germany, 2005.
- [17] Jović, V.: HE Ombla, Numerički model ponašanja podzemne akumulacije u prirodnim i projektom definiranim uvjetima, Aquarius engineering, Split, 1997.
- [18] Nonveiller, E.: Injiciranje tla, Školska knjiga Zagreb, 1989.
- [19] Ishida, S., Tsuchihara, T., Yoshimoto, S., Imaizumi, M.: Sustainable Use of Groundwater with Underground Dams, JARQ 45 (2011) 1, pp. 51 – 61, <http://www.jircas.affrc.go.jp>
- [20] Geološki i hidrogeološki istražni radovi na širem području "Grabovica", Geoqua Zagreb, 2008.