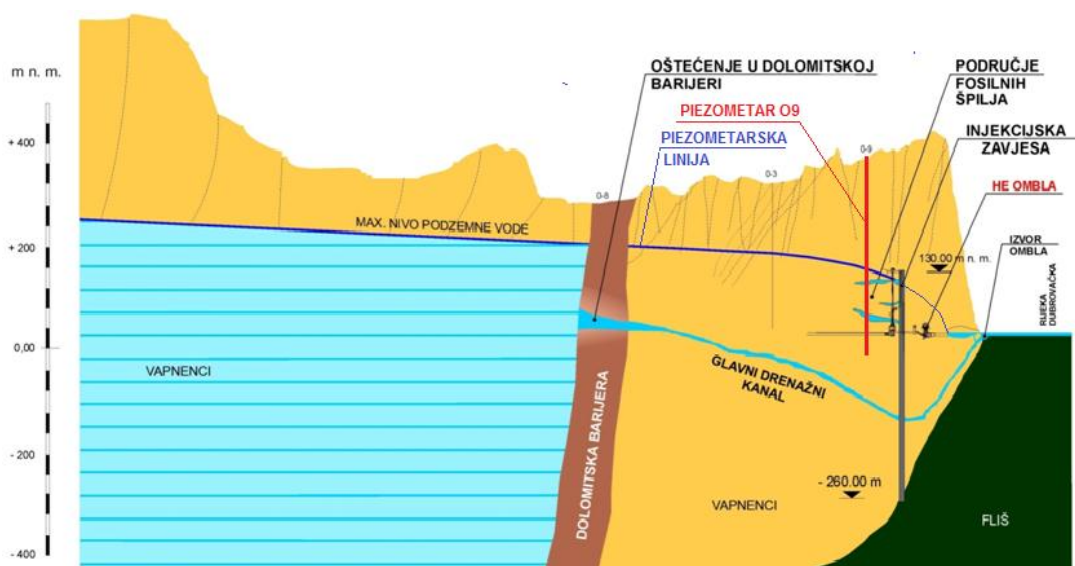






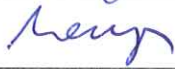
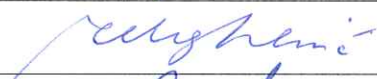
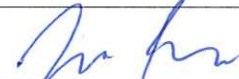







Studija Glavne ocjene prihvatljivosti zahvata za ekološku mrežu HE OMBLA

Knjiga 2.

Hidrogeološka analiza šireg područja zahvata



Zagreb, srpanj 2015.

NARUČITELJ	Hrvatska elektroprivreda d.d. Ulica grada Vukovara 37, 10 000 Zagreb
IZRAĐIVAČ	OIKON d.o.o. Institut za primijenjenu ekologiju (vodeći član) Trg senjskih uskoka 1-2, 10 000 Zagreb GEONATURA d.o.o. za stručne poslove zaštite prirode Trg senjskih uskoka 1-2, 10 000 Zagreb
PROJEKT	<i>Istraživanje špiljskih staništa i izvorišnih područja šireg dubrovačkog područja s ciljem vrednovanja bioraznolikosti i ocjena prihvatljivosti izgradnje hidroenergetskih objekata</i>
VRSTA DOKUMENTACIJE	GOPZEM HE Ombla – Knjiga 2.: Hidrogeološka analiza šireg područja zahvata
BROJ UGOVORA	948-14
VODITELJ PROJEKTA	Prof. dr. sc. Oleg Antičić 
VODITELJICA GOPZEM	Fanica Kljaković Gašpić, mag. biol. 
AUTORI IZVJEŠTAJA	Prof. em. dr. sc. Darko Mayer 
	Prof. dr. sc. Oleg Antičić 
	Josip Križan, mag. ing.math. 
	Nikolina Bakšić, mag. ing. geol. 
	Mirjana Žiljak, mag. oecol. et prot.nat. 
KONTROLA KVALITETE	Dr. sc. Vladimir Kušan 
ODGOVORNE OSOBE	Dalibor Hatić, mag. ing. silv. (za Oikon d.o.o.) 
	Dr.sc. Hrvoje Peternel (za Geonatura d.o.o.) 
Stručna recenzija Sudjelovanje u izradi poglavlja 2.10.	Dr.sc. Renato Buljan  Tomislav Paviša, dipl.ing.građ. 

Sadržaj

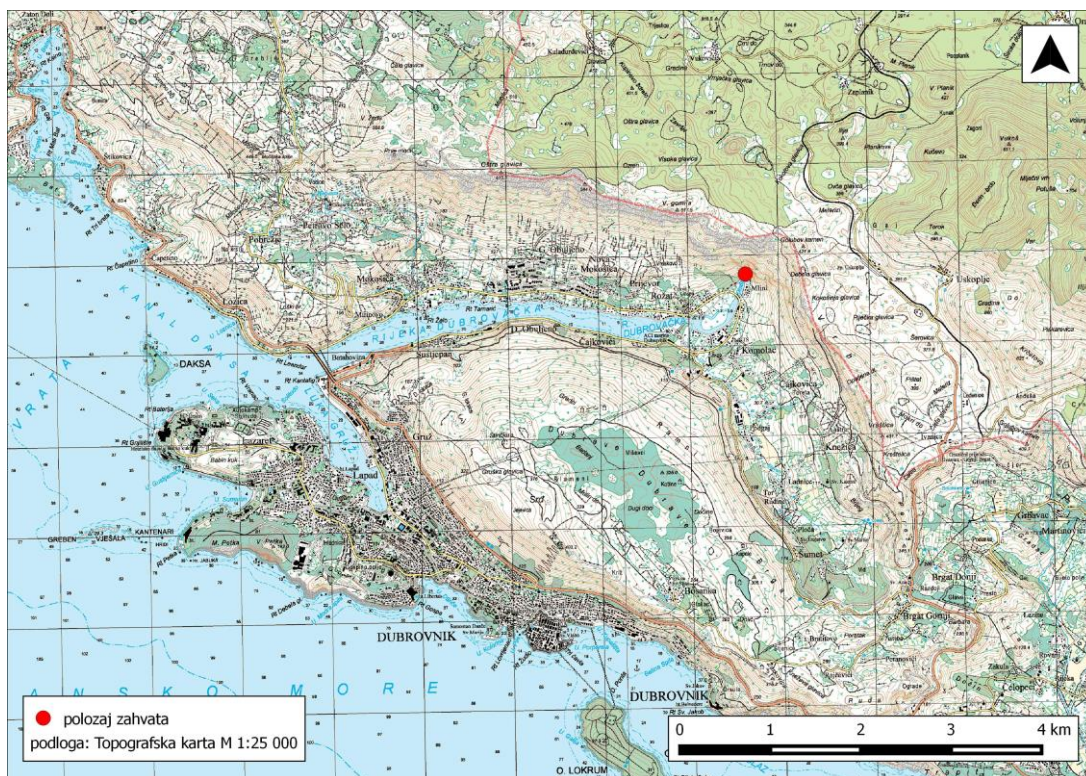
1	UVOD	3
1.1	OPIS LOKACIJE	3
1.2	GEOLOŠKI ODNOSI ŠIREG PODRUČJA	4
1.2.1	<i>Litostratigrafske karakteristike</i>	<i>4</i>
1.2.2	<i>Strukturni odnosi šireg područja.....</i>	<i>6</i>
1.3	HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE KRŠA.....	8
2	HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE PODRUČJA EKOLOŠKE MREŽE PALEOOMBLA - OMBLA.....	13
2.1	OPĆENITO	13
2.2	O DOSADAŠNJIM HIDROGEOLOŠKIM ISTRAŽIVANJIMA	14
2.3	HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE SLIVA PALATE	15
2.4	POSTANAK I RAZVITAK SLIVA OMBLE.....	16
2.5	HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE RECENTNOG SLIVA OMBLE	19
2.6	HIDROGEOLOŠKE ZNAČAJKE NASLAGA.....	21
2.7	HIDROGEOLOŠKA FUNKCIJA TERENA	21
2.8	MEHANIZAM PUNJENJA I PRAŽNENJA SLIVA OMBLE.....	24
2.9	HIDROGEOLOŠKI UVJETI ISTJECANJA NA IZVORIŠTU OMBLA.....	26
2.10	HIDROGEOLOŠKI UVJETI U SLUČAJU IZVEDBE PODZEMNE RETENCIJE	33
	POTENCIJALNI UTJECAJ NASTANKA PODZEMNE RETENCIJE NA TERMIČKE UVJETE U SUSTAVU VILINA ŠPILJA – IZVOR OMBLE	48
3	VOLUMEN PORNOG PROSTORA NA PREDMETNOM PODRUČJU	53
3.1	PROCJENA VOLUMENA KARBONATNIH NASLAGA	53
3.2	PROCJENA POROZNOSTI.....	55
3.2.1	<i>Ukupna poroznost za okršene vapnence preuzeta iz literature</i>	<i>55</i>
3.2.2	<i>Geomorfometrijske indicije tercijarne poroznosti.....</i>	<i>55</i>
3.2.3	<i>Procjena efektivne poroznosti u slivu Omble</i>	<i>56</i>
3.3	PROCJENA VOLUMENA PORNOG PROSTORA	60
4	ZAKLJUČAK.....	62
5	IZVORI PODATAKA	65
6	PRILOZI.....	69
6.1	PRIKAZ PIEZOMETARSKJE LINIJE U SUSTAVU VILINA ŠPILJA – IZVOR OMBLE	71



1 UVOD

1.1 Opis lokacije

HE Ombla je podzemna hidroelektrana koja je projektirana na način da se izgradnjom podzemne injekcijske zavjese na krškom izvoru Ombla stvori potreban tlak za energetske korištenje. Izvor Ombla je izvor Rijeke dubrovačke i nalazi se sjeverozapadno i oko 5 kilometara od Dubrovnika (Slika 1.1.), u mjestu Komolac, podno stijene poznate kao Golubov kamen. Osim hidroenergetske funkcije, HE Ombla je projektirana kao budući glavni izvor vodoopskrbnog sustava grada Dubrovnika, a u budućnosti i šireg područja od Stona do Konavla.

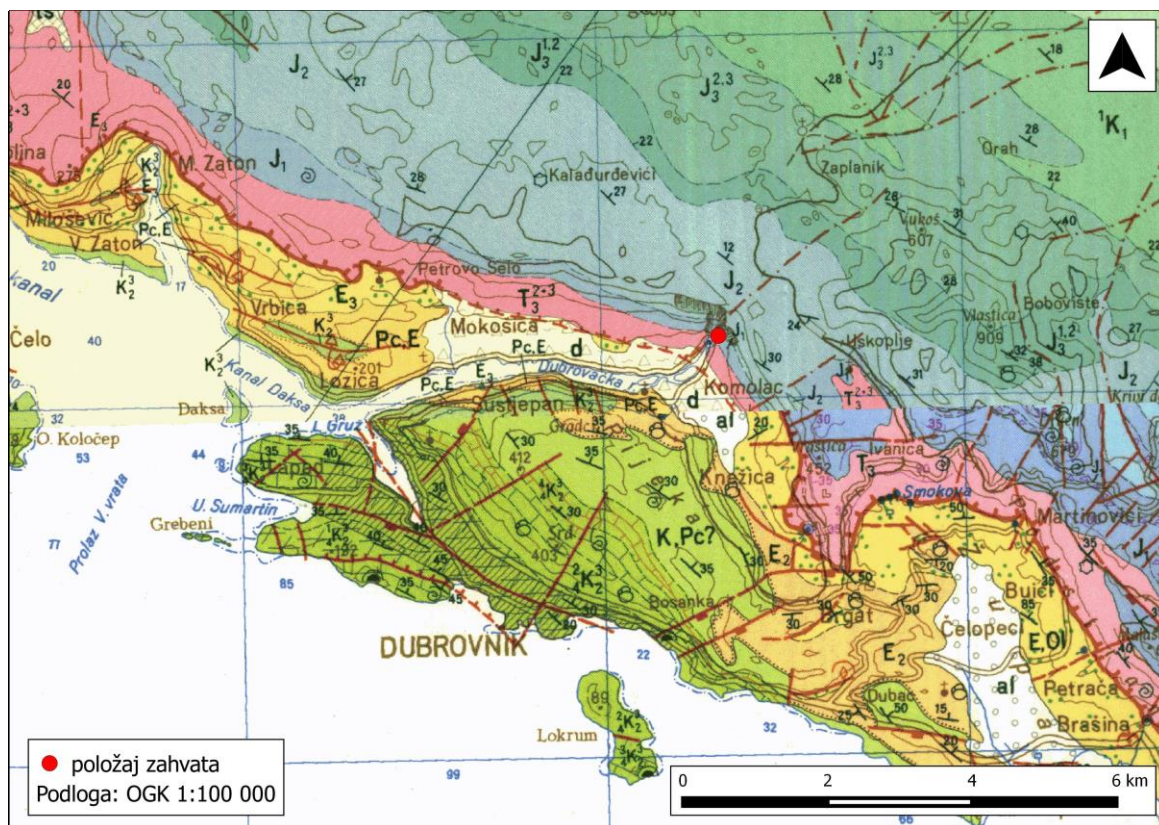


Slika 1.1. Geografski položaj zahvata HE Ombla.

1.2 Geološki odnosi šireg područja

1.2.1 Litostratigrafske karakteristike

Na širem području HE Ombla, prema OGK, M 1: 100 000, list Dubrovnik (1971) i list Trebinje (1967), najstarije naslage predstavljene su karbonatnim sedimentima gornjeg trijasa (Slika 1.2.).



Aluvijum



Deluviju



Fliš: pješčenjaci, pjeskoviti lapori, glina i alevroliti (gornji eocen i dijelovi donjeg oligocena)



Fliš: pješčenjaci, lapori i vapnenci



Numulitni vapnenci



Milolidni, kozinski, alveolinski I numulitni vapnenci



Kozinski slojevi – glinoviti vapnenci sa stomatopsisima I kozinijama (danski kat – dijelom paleocen ?)



Vapnenci sa rudistima i kamosferinama



Bankoviti vapnenci i dolomiti u izmjeni (mastriht)










Vapnenci sa tintininama i merineama (valend – barem ?)



Lumakele od litiotisa



Vapnenci i dolomiti sa Clypeina jurassica

	Dolomiti gornjeg trijasa		Vapnenci sa <i>Cladocoropsis mirabilis</i> i vapnenci sa kurnubiama
	Rasjed: obez oznake karaktera, relativno spušten blok i pad rasjedne površine		Oolitični vapnenci
	Rasjed: pokriven ili aproksimativno lociran i pad rasjedne površine		Dolomiti sa <i>pentakrinusima</i> , vapnenci sa <i>litiotisima</i> , dolomiti i vapnenci sa <i>megalodusima</i>
	Čelo navlake: utvrđeno i pokriveno ili aproksimativno locirano		Dolomiti i vapnenci
			Os prevrnute antiklinale
			Fotogeološki zapažen rasjed
			Čelo navlake

Slika 1.2. Geološka karta šireg područja zahvata HE Ombla (isječak iz Osnovne geološke karte M 1:100 000, list Dubrovnik - legenda lijevo, list Trebinje - legenda desno).

Naslage sedimentata protežu se duž čela navlake visokog krša i formiraju površinu navlačenja reverznog bloka. Karbonatni sedimenti prvenstveno su zastupljeni srednjeznim dolomitima. Dolomiti su bankoviti do debelo - slojeviti, a mjestimice masivni. Posebnu značajku predstavlja brečast izgled dolomitske mase.

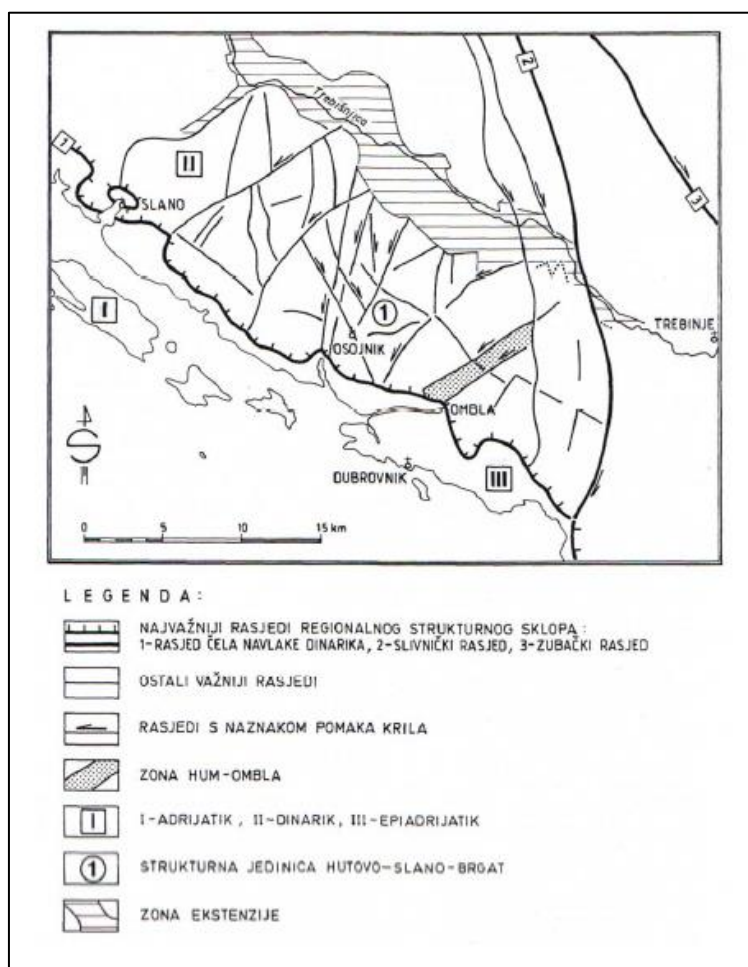
Na prijelazu trijasa u juru, smanjuje se učešće dolomita, a povećava se učešće vapnenaca. U istočnom boku jurske naslage dostižu debljinu 300 - 600 metara, a u zapadnom boku 500 - 800 metara. Donja jura je predstavljena izmjenom dolomita, vapnovitih dolomita, dolomitičnih vapnenaca i vapnenaca. Izdvajanje ovih prijelaza je praktično nemoguće, a ispitivanja duž trase potkopa, koji je postavljen približno okomito na strukturu pokazuju da u najnižem dijelu jurskog karbonatnog paketa i dužine oko 125 m postoji najmanje 20 prelaza između osnovnih litoloških sekvenci. Vapnenci su uslojeni do bankoviti. Nagib strukture je monoklin, dinarskog pravca pružanja sa padom 30°-50°.

Srednja jura se odlikuje istim litološkim sastavom kao i lijas, s tim da u donjoj polovini ovog člana dominiraju vapnoviti dolomiti i dolomiti, dok su biomikriti i biointranspariti nešto manje zastupljeni. Često su i oni zahvaćeni dolomitizacijom. Eocen je zastupljen naslagama fliša u kojima dominiraju lapori i glinoviti lapori. Nešto zapadnije oko naselja Mokošice utvrđeno je prisustvo eocenskih vapnenaca sa *miliolidama*, *alveolinama* i *numulitima*. Flišni kompleks je u gornjem eocenu (E₃), a mjestimice zalazi i u oligocen tako da ga pojedini autori tretiraju kao eocensko - oligocenski kompleks.

1.2.2 Strukturni odnosi šireg područja

U strukturnom sklopu šireg područja HE Ombla razlikuju se tri regionalne strukturne jedinice: Jadranska mikroploča, Adriatik i Dinarik (Slika 1.3.). Najvažniji rasjedi strukturnog sklopa pružaju se njihovim granicama. Unutar regionalnih strukturnih jedinica razlikuju se pojedine strukturne jedinice čijim se granicama pružaju reverzni rasjedi vergencije ili pomaka krovinskih krila prema JZ i JJZ, mjestimice J. Oko Dubrovnika važan je položaj strukturne jedinice Adriatik. Zamjetno je suženje prostora jedinice. To je važno u seizmotektonskom smislu, jer pokazuje povećanje pritiska u prostoru koji nastaje zbog snažnog pomicanja Jadranske mikroploče prema SSZ. Veći pritisci u tom prostoru znače i veću recentnu tektonsku aktivnost uz učestalo pojavljivanje potresa.

U kopnenom dijelu obuhvaćenog područja u reljefu se izravno odražavaju pojedine lokalne strukture i osobito rasjedi. Uzdignute lokalne reverzne strukture predstavljene su istaknutim reljefom. Rasjedi su prepoznatljivi po tamnim, često svinutim uskim zonama. U reljefu su to često strmi obronci ili strmcii, a rasjedi se pružaju njihovim podnožjem. U tom je smislu vrlo uočljiva dionica rasjeda Ploče – Dubrovnik između Slanog i Konavla. Posebice su uočljivi i rasjedi sustava SSZ – JJI do S – J koji sijeku strukturne jedinice i strukture. Prikazano odražavanje struktura i rasjeda u reljefu znak je prisutne stalne tektonske aktivnosti koja izravno utječe na oblikovanje reljefa.



Slika 1.3. Regionalni strukturni sklop šireg područja HE Ombla.

Strukture i rasjedi šireg područja pružaju se pravcem SZ – JI do ZSZ – JJI. Osnovna odlika strukturnog sklopa jest kompresija prostora, reverzni pomaci kompleksa stijena te stvaranje nizova reverznih struktura. U prostorima izražene kompresije nastaju strukture duž čijih se krila pružaju reverzni rasjedi suprotnih vergencija. Položaji i pružanja rasjeda u podmorju utvrđeni su interpretacijom dubokih seizmičkih refleksijskih profila (Prelogović i dr. 2003; 2004). Podaci o rasjedima na kopnu mjereni su na nekoliko stotina izdanaka (Buljan 1999; Prelogović i dr. 2003; Prelogović i Buljan 1994). Ustanovljeni su položaji rasjeda u strukturnom sklopu, geneza, vrste pomaka krila i odnosi stresa i deformacije struktura. Pojedini rasjedi uvijek su predstavljeni zonama različite širine. Česti su ogranci rasjeda koji se s glavnom zonom spajaju u dubini. Pojedini ogranci znatno proširuju glavne zone rasjeda.

Najvažniji u strukturnom sklopu jesu rasjedi granični regionalnim strukturnim jedinicama. Rasjedi su reverzni, vergencije prema JZ i JJZ, mjestimice J. Rasjed Biševo – Sušac – južni Jadran nalazi se u podmorju. Markira granicu između Jadranske mikroploče i Adriatika. Na površini se ističe zona širine oko 1,5 km, srednjeg nagiba oko 50°. Paralelno se pruža zona glavnog ogranka koji dostiže širinu do 2,5 km. Rasjed Ploče – Dubrovnik pruža se granicom između regionalnih strukturnih jedinica Adriatik i Dinarik. Njegov nastavak prema istoku predstavlja rasjed Kotor – Bar. Širine zona tih rasjeda su promjenljive 0,5 – 4 km. U brojnim izdancima mjereni su nagibi najčešće između 55° i 70°. Unutar Adriatika osobito su važna dva rasjeda: Vis – Lastovo – Mljet – podmorje južno od Molunata i Pelješac – Dubrovnik. Predstavljeni su zonama širine do 2 km, prosječnog nagiba 65° - 70°. Oni odvajaju tri uske, izdužene strukturne jedinice: Mljetsko i Dubrovačko podmorje, Lastovo – Mljet – podmorje južno od Molunata i Pelješac – Elafiti – Cavtat – Molunat. Zbog položaja i pružanja ogranaka glavnih rasjeda i osobito većih lokalnih kompresijskih struktura unutar strukturnih jedinica izdvajaju se nizovi reverznih struktura, koji su naročito uočljivi unutar strukturne jedinice Pelješac – Elafiti – Cavtat – Molunat.

U kopnenom dijelu šireg područja HE Ombla postoje četiri strukturne jedinice. U cijelosti su obuhvaćene jedinice: Hutovo – Slano – Brgad – Sniježnica i Kruševica – Boka Kotorska, a dijelomice jedinice: Humina i Orjen – Lovćen. Granicama jedinica pruža se rasjed Čapljina – Trebinje i njegov nastavak Orjenski rasjed. Rasjedi su reverzni, vergencije prema JZ i J, širine zona do 1,5 km. Unutar strukturnih jedinica razlikuju se tri niza lokalnih reverznih struktura i više većih lokalnih kompresijskih struktura.

Odnosi i pomaci struktura ovise o položajima relativno velikih kompleksa stijena različite gustoće u dubini, koji izgrađuju strukturne jedinice. Za uočavanje **tektonske aktivnosti** najvažnije je odrediti pomake pojedinih dijelova strukturnih jedinica i većih lokalnih reverznih struktura. U uvjetima prisutne kompresije prostora između kompleksa stijena uspostavlja se polje stresa. Maksimalni kompresijski stres pokazuje osnovne strukturne odnose i opću dinamiku strukturnog sklopa.

Važno je naglasiti da orijentacija stresa inicira tektonske pomake. Pri tom poprečna ili gotovo poprečna orijentacija uvjetuje reverzne pomake krila rasjeda i naglašenu kompresiju prostora. Dijagonalna orijentacija stresa rezultira reverznim dijagonalnim pomacima krila rasjeda. Orijentacija kompresijskog stresa je promjenjiva. Idući od obale prema unutrašnjosti prisutna je lagana retrogradna promjena. Izdvajaju se orijentacije na potezima: Mljet i otok Šipan 15 - 195°, Slano 10 - 190°, zatim Dubrovnik 20 - 200°, izvor Omble 15 - 195°, Ljubinj 10 - 190° te Molunat 32 - 212°, istočno od

Trebinja 10 - 190°. Naglašena je poprečna orijentacija kompresijskog stresa kod otoka Šipana, između Dubrovnika i Molunata te oko Boke Kotorske.

Posljedica promjene orijentacije kompresijskog stresa rezultira i različitim pomacima dijelova strukturnih jedinica u krovinskim krilima rasjeda. Zapažaju se poprečni reverzni pomaci krila rasjeda, ali i dijagonalni prevladavajući desni pomaci. Navedeni pomaci upućuju na prisutnu laganu retrogradnu rotaciju dijelova strukturnih jedinica. Pri tom je posebno važna činjenica postojanja rasjeda sustava SSZ – JJI do S – J koji sijeku strukturne jedinice. Spomenuti rasjedi odvajaju pojedine dijelove strukturnih jedinica. U svakom dijelu se očituje kompresija prostora i pomaci prema JZ i JJZ, a mjestimice zbog rotacije uglavnom prema J. Znakovito je svijanje trasa rasjeda duž pružanja, te pomaci dijelova strukturnih jedinica Dinarika neposredno u krovinskom krilu rasjeda Ploče – Dubrovnik prema JZ. To je reakcija na izraženu kompresiju prostora, pritiske i pomake koji nastaju unutar regionalne strukturne jedinice Adriatik. Posljedica kompresije prostora jest nastajanje većih lokalnih reverznih struktura. Najprije se ističu položaji tih struktura neposredno u krovinskom krilu rasjeda Ploče – Dubrovnik između Slanog i Trstena te duž Konavla. Osobito su znakovite uske i izdužene strukture paralelno zonama rasjeda Vis – Lastovo – Mljet – podmorje južno od Molunata i rasjeda Pelješac – Dubrovnik osobito oko Elafita, južno od Dubrovnika i Molunata te od Srđa do rta Oštro.

1.3 Hidrogeološke značajke krša

Položaj vodnoga lica u kršu ovisi o reljefu terena i propusnosti stijene. U propusnim stijenama ispod visokoga reljefa vodno lice je duboko dok je u niskim terenima vodno lice plitko pod površinom. Primjerice, Lukina jama na Velebitu nalazi se na koti 1475 m n. m. (kota ulaza), a ustanovljena dubina do vodnoga lica je preko 1 300 m, nasuprot niskoj karbonatnoj platformi u južnoj Istri gdje je vodno lice plitko pod površinom (10 - 50 m).

Za kretanje vode u kršu svojstvene su i velike i brze oscilacije razine podzemne vode te velike razlike između minimalnih i maksimalnih razina, posječno od 20 do 80 m. U nizinskim područjima ta razlika iznosi svega do 1 m. Velike oscilacije minimalnih i maksimalnih razina podzemne vode u kršu posljedica su relativno malog kapaciteta prihvaćanja vode.

Krš se odlikuje primarnom, sekundarnom i tercijarnom poroznošću. Primarna poroznost ili sinsedimentacijska poroznost u vapnencima i dolomitima razvijena je u više tipova (poroznost biogene skeletne rešetke, unutarzrska i međuzrska poroznost, fenestralna i sklonišna poroznost), a prema dostupnim podacima (Šestanović 1993.) kreće se u granicama između 1 i 3 %. Kako je primarna poroznost najčešće mala, tako su s hidrogeološkoga gledišta sekundarna i tercijarna poroznost daleko značajnije. Ukupna poroznost karbonatnih stijena kreće se od gotovo nule do 45 % (Tablica 1.1.), a prema Domenico i Schwartz (1998), poroznost vapnenca i dolomita kreće se do 20 %, dok ukupna poroznost okršenog vapnenca varira od 5 do čak 50%. Sekundarna poroznost ili postsedimentacijska poroznost široko je rasprostranjena u karbonatnim naslagama. Ona je predstavljena brojnim pukotinskim sustavima, rasjednim plohama i međuslojnim diskontinuitetima. Pukotinski sustavi nastali su boranjem i rasjedanjem i nalaze se u određenom položaju prema većoj strukturi u kojoj su nastali, odnosno koja ih je uzrokovala. Vrlo je važna i gustoća pukotina unutar naslaga, a razmak među pukotinama kreće se od milimetarskog do decimetarskog. Tercijarnu **poroznost** čine pukotine

(kanali i kaverne) nastale otapanjem karbonatnih stijena posredstvom tečenja podzemnih voda u određenom klimatskom području (pukotinska i disolucijska poroznost). Ovim dugotrajnim geokemijskim procesima proširuju se prsline i pukotine nastale sekundarnom poroznošću, odnosno s vremenom se povećavaju broj i dimenzije pukotina što dovodi do povećavanja tercijarne poroznosti, a time i propusnosti. Pri tome se stvaraju vrlo zamršeni drenažni sustavi kojima se podzemne vode kreću u hipsometrijski niže položene dijelove karbonatnih vodonosnika.

Važno je razlikovati ukupnu i efektivnu poroznost. Ukupna poroznost podrazumijeva ukupni porni prostor bez obzira na to jesu li pore povezane ili ne. **Efektivna poroznost** odnosi se na pore koje su međusobno povezane, a može se definirati količinom vode koja će se gravitacijski ocijediti iz uzorka stijene. Za ocjeđivanje vode iz uzorka potrebno je vrijeme pa se stoga može reći da efektivna poroznost nije stalna veličina već je funkcija vremena.

Mnoge stijene, a posebice karbonatne stijene, mogu imati razmjerno veliku ukupnu poroznost, ali te pore nisu međusobno povezane. Sa stanovišta hidrogeologije važna je efektivna poroznost, jer se ona odnosi na onaj prostor kroz koji cirkulira voda. Efektivna poroznost može biti i nekoliko redova veličine manja od ukupne poroznosti, a najveće razlike su kod razlomljenih stijena.

Tablica 1.1. Ukupna poroznost nekih karbonatnih stijena (UNESCO 1984).

Litologija	Lokacija	Ukupna poroznost (%)
Kompaktni vapnenac	Italija	0,2 - 14
Raspucali vapnenac	Buxton, Velika Britanija	14
Slabo raspucali vapnenac	Dundee, SAD	2,2 - 9,4
Slabo raspucali vapnenac	Velika Britanija	1,4 - 1,6
Oolitni vapnenac	Monk's Park, SAD	20
Kreda	Francuska	30 - 45
Dolomit	Micheldeau, Velika Britanija	9 - 22
Karbonatni tuf	-	20 - 32

Propusnost je veća bliže površini terena (u gornjoj okršenoj zoni vodonosnika), a smanjuje se prema dubini, budući da se s dubinom smanjuje broj pukotina, odnosno smanjuje se okršenost. U vertikalnom presjeku okršenost se, u pravilu, smanjuje po eksponencijalnoj zakonitosti (Avdagić 1985.):

$$n = ae^{-by}$$

pri čemu su:

a i b – parametri koji karakteriziraju sredinu

y – dubina

n – poroznost

Najčešće korištena metoda ispitivanja vodopropusnosti u kršu je Lugeonov pokus (VDP). To je terenska metoda kod koje se prilikom bušenja, u nezacijevljenu bušotinu utiskuje voda pod različitim tlakom p i mjeri se gubitak, najčešće u intervalu od 5 m. Vodopropusnost se izražava preko količine vode koju prima stijena na jednom dužnom metru bušotine kod tlaka od 10 atmosfera u vremenskom intervalu od 1 minute. Ova jedinica vodopropusnosti naziva se *Lugeonova jedinica* (Lu).

Zavisnost između Lugeonove jedinice i specifične vodopropusnosti može se izraziti sa

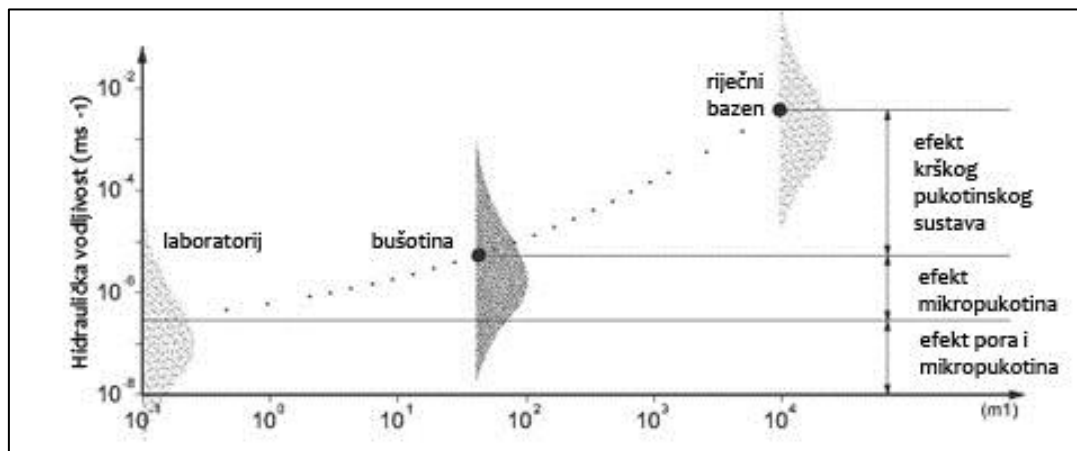
$$100 \text{ Lu} = 1 \text{ l/min(m)} \text{ } 0,1 \text{ at}$$

Specifična vodopropusnost se izražava preko količine vode koja se kroz okršenu stijenu gubi na intervalu od jednoga dužnog metra bušotine pod tlakom od 0,1 atmosfere. Ova veličina definirana je jednadžbom:

$$q = \frac{Q}{ph} \quad (\text{l/minm}^{-1} \text{ } 0,1 \text{ at})$$

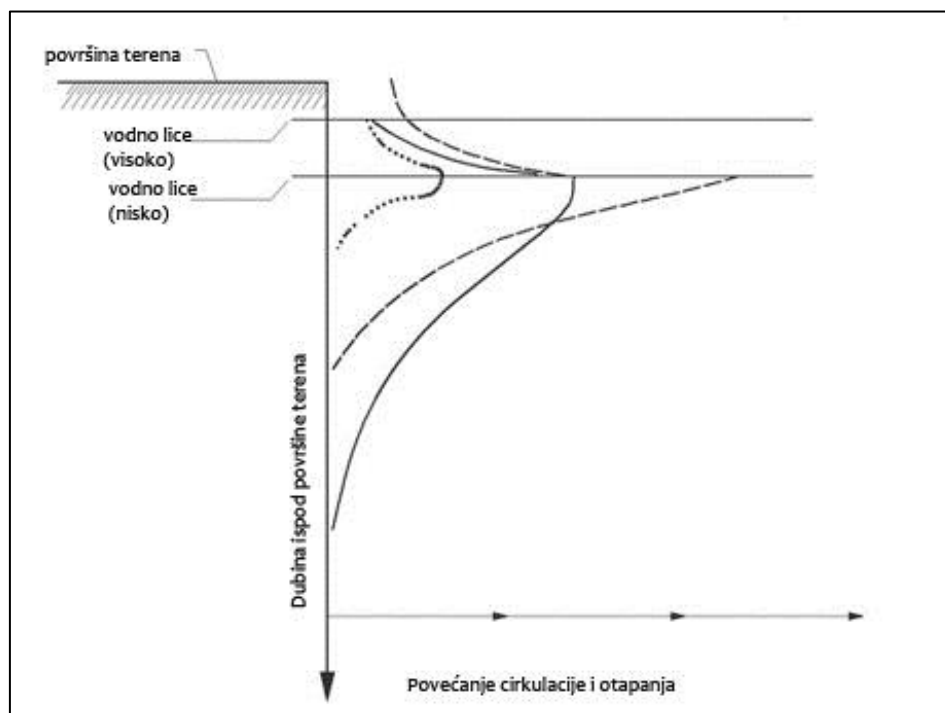
Hidraulička vodljivost, transmisivnost i uskladištenje najviše ovise o litologiji karbonatne stijene, jer intenzitet kojim će mehanička i kemijska aktivnost djelovati na razvoj pukotina i kaverni u stijeni ovisi o litološkom sastavu stijene (Singhal i Gupta 1999). Vapnenci i dolomiti imaju najčešće dobro razvijen sustav pukotina i kaverni što značajno povećava njihovu hidrauličku vodljivost. Ukoliko su pukotine zapunjene sitnozrnatim materijalom, takva pukotinska ispuna će smanjiti hidrauličku vodljivost. Hidraulička vodljivost neraspucanih vapnenaca i dolomita kreće se od 10^{-9} do $6 \times 10^{-6} \text{ ms}^{-1}$, a okršenih od 10^{-6} do $2 \times 10^{-2} \text{ ms}^{-1}$.

Propusnost i poroznost stijene nisu samo funkcija vremena već i funkcija volumena stijene koji se razmatra, tj. funkcija mjerila (Slika 1.4.). Laboratorijski određene vrijednosti hidrauličke vodljivosti mogu biti nekoliko redova veličine manje nego one dobivene testiranjem u bušotinama i regionalnim procjenama na razini sliva.



Slika 1.4. Shematski prikaz utjecaja mjerila na hidrauličku vodljivost u kršu (Király 1975).

Krš je izrazito anizotropna sredina u kojoj je hidraulička vodljivost najveća u pravcu pružanja pukotina. S obzirom da se s dubinom okršenost smanjuje, smanjuje se i hidraulička vodljivost. Transmisivnost, kao umnožak hidrauličke vodljivosti i debljine vodonosnika, također varira s obzirom na smjer. Specifično otpuštanje (S_v) smanjuje se s dubinom. Castany (1984) navodi primjer iz Južne Afrike gdje je ustanovio efektivnu poroznost od 9 % na dubini od 60 m, 5,5 % na dubini od 75 m, 2,6 % na dubini od 100, 2 % na dubini od 125 m i 1,3 % na dubini od 150 m. Na Slici 1.5. može se uočiti da se najveće vrijednosti hidrauličke vodljivosti (K), uskladištenja (S) i efektivne poroznosti (n_e) nalaze u zoni minimalnih razina podzemne vode, a potom se smanjuju s dubinom.



Slika 1.5. Promjena hidrogeoloških parametara s dubinom (UNESCO 1984).

Kontinuirana distribucija fizikalnih svojstava porozne sredine je u kršu teško zamisliva. Bocker (1976) navodi eksperimentalne podatke da u slučaju kada je promjer pukotine 3 mm tok nije laminaran, ako je hidraulički gradijent $\geq 0,01$. Krški vodonosnik je anizotropna, heterogena sredina koju čini sustav međusobno povezanih pukotina i kaverni unutar više ili manje porozne ili raspucale krutine.

U pukotini ili kaverni čiji je promjer i do 0,5 m tok može ostati laminaran, ukoliko brzina toka ne premašuje vrijednost od 1 mm/s.

Protok najviše ovisi o promjeru pukotine. Primjerice kroz jednu pukotinu promjera 2 mm proteći će ista količina vode kao kroz 10 000 pukotina promjera 0,2 mm ako su ostali uvjeti isti. Porastom brzine toka ili povećanjem hrapavosti stijenske cijevi tok može prijeći u turbulentan.

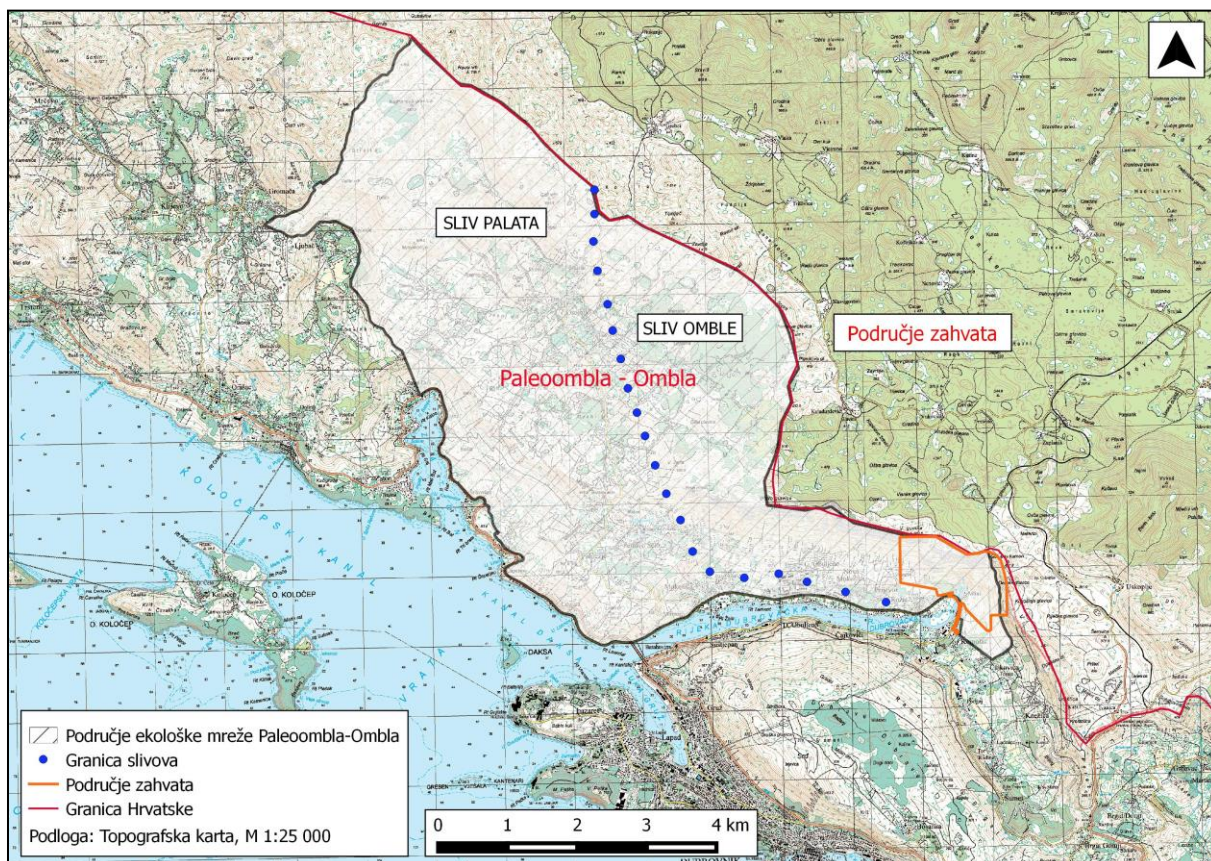
Zaključno se može reći da je krš porozna i raspucala stjenska masa unutar koje postoji sustav velikih pukotina i kaverni koje predstavljaju privilegirane puteve toka podzemne vode. Unutar pojedinih kaverni ili velikih pukotina po kojima primjerice teku ponornice na svom putu kroz podzemlje, Darcyjev je zakon zasigurno neprimjenljiv, no ipak, za regionalne procjene hidrauličkih značajki prihvatljiva je pretpostavka o krškom vodonosniku kao kontinuumu (Maslia i Prowell 1990), posebno kada su hidraulički gradijenti mali, a uskladištenje veliko (Ford i WilliamS 1989).

Bakalowicz i Mangin (1980) smatraju da je krški vodonosnik “crna kutija” o kojoj se najviše može saznati analizom hidrograma istjecanja koji predstavlja integriranu sliku značajki vodonosnika.

2 Hidrogeološke značajke područja ekološke mreže Paleoombla - Ombla

2.1 Općenito

Područje ekološke mreže, odnosno područje od važnosti za Zajednicu (Site of Community Importance - SCI područje) Paleoombla - Ombla (HR2001010), prostire se sjeverno i sjeverozapadno od Dubrovnika i zauzima površinu od ukupno 3 750 hektara (Slika 2.1.). Granica područja definirana je na temelju rezultata istraživanja njegove biospeleološke vrijednosti koja je provelo Hrvatsko biospeleološko društvo (HBSD) tijekom 2008. i 2009. godine. Ta je granica postavljena tako da područje obuhvati većinu važnih biospeleoloških lokaliteta i podzemnih ekosustava unutar granica prepoznatljivih karakteristika terena. Oko 40 % površine područja ekološke mreže (istočni dio) zadiru u slivno područje Omble (Slika 2.1.). Šire područje izvođenja radova na projektu HE Ombla nalazi se u krajnjem jugoistočnom uglu SCI područja i zauzima oko 4 % njegove površine. Zapadni dio područja ekološke mreže Paleoombla - Ombla prostire se na dijelu sliva izvora Palata koji izvire u Malom Zatonu.



Slika 2.1. Prostiranje područja ekološke mreže Paleoombla - Ombla (HR2001010) s ucrtanim područjem zahvata HE Ombla i granicom slivova.

Kako se, dakle, područje ekološke mreže Paleoombla - Ombla prostire na dva hidrogeološki odvojena sliva koji nemaju međuutjecaja, i hidrogeološki opis u nastavku odnosit će se na ta dva odvojena dijela.

Pri tome će se detaljnija hidrogeološka analiza načiniti za dio koji se prostire na dijelu sliva Omble, jer je taj dio relevantan za Glavnu ocjenu prihvatljivosti zahvata HE Ombla na ekološku mrežu.

2.2 O dosadašnjim hidrogeološkim istraživanjima

O hidrogeološkim značajkama predmetnog područja postoji mnogo podataka, jer su tijekom prethodna četiri desetljeća u tom području provedena brojna istraživanja. Tako je već 1971. godine P. Milanović, razmatrajući hidrogeološke značajke sliva Omble, pisao o hidrogeološkim značajkama Popovog polja i trasiranju tokova podzemnih voda pomoću radioaktivnog izotopa Br - 82, a 1976. godine publicirao rad o “Režimu voda u dubokom kršu na primjeru sliva izvorišta Ombla”. P. Milanović (1977.) objavio je i rad pod naslovom: “Hidrogeologija krškog izvorišta Ombla” koji zaključuje rečenicom: “Nikakav zahvat u okviru hidrosistema Trebišnjica, uključujući i oblaganje korita Trebišnjice “špric - betonom” ne može u toj mjeri izmijeniti režim istjecanja Omble da se izdašnost izvorišta smanji ispod prirodnog minimuma”.

J. Perić (1980.) publicirao je rad “Ideja o izgradnji višenamjenske krške podzemne akumulacije - Dubrovačka rijeka”. Posebno se intenzivno istraživalo u razdoblju od 1981. do 1987. godine što je rezultiralo novim znanjima o strukturnim odnosima i hidrogeološkim značajkama šireg područja sliva Omble. Institut za krš iz Trebinja izradio je studiju “Mogućnosti energetske iskoristivosti izvorišta Ombla” u sklopu koje su izvršeni dodatni hidrogeološki, speleološki i geofizički radovi. Izbušeno je 5 novih istraživačkih bušotina – piezometara. U Vilinoj špilji je izvršeno probijanje prepreke na 65 m i nastavljeno njeno istraživanje. Obavljena su ronilačko – speleološka istraživanja izvorišta Ombla i Izvorišne špilje u zaleđu. Iskopan je i potkop do Izvorišne špilje. Dopunjena su geofizička geoelektrična ispitivanja iz 1971. godine pa je pomoću geofizičkih geoelektričnih metoda određena dubina baze okršenosti stijenske mase u donjem slivnom području izvorišta Ombla, u okolici izvorišta Palata i Zavrelje te na flišnom području Rožata i Dračevog Sela između izvorišta Ombla i naselja Mokošica.

P. Milanović i dr. (1989.) dovršili su opširnu studiju: “HE Ombla, idejni projekt, geološki elaborat” u kojoj su opisane hidrogeološke i inženjerskogeološke značajke prostora buduće podzemne akumulacije. U sklopu tih radova izrađeno je 188 km² geološke karte u mjerilu 1:10 000 i dodatno, još detaljnije kartiranje područja površine 2,5 km² oko izvorišta Ombla i 1,8 km² oko izvorišta Zavrelje, u mjerilu 1:2 000. Načinjen je pristupni potkop u dužini 190 m i lijeva i desna istražna galerija duž predviđenog pregradnog profila zavjese, ukupne dužine 508 m. Nakon što je speleoronilačkim istraživanjima otkrivena Velika dvorana, istražni potkop je produžen za dodatnih 310 m, čime je omogućen pristup do nje. Izbušene su 3 duboke bušotine u slivu, 18 bušotina u bokovima i izvorišnoj zoni Omble s površine terena, 11 bušotina u izvorišnoj zoni iz istražnih galerija i 4 bušotine u području izvorišne zone Zavrelje. Obavljena su dodatna geofizička geoelektrična istraživanja (70 km²) u smjeru Zatona i prema Zavrelju. Zbog definiranja tektonskog kontakta karbonatnih i klastičnih naslaga geoelektričnim sondiranjem dodatno su istražena područja lateralno izvorištima Ombla i Zavrelje. 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 Ombla te na susjednim izvorima Zaton i Zavrelje, gdje je postojala mogućnost da se u njihov sliv povremeno prelije dio voda iz sliva Omble, kontinuirano su registrirane satne vrijednosti veličine protoke. Dnevne

vrijednosti oborina prikupljane su na 6 kišomjernih stanica raspoređenih na čitavom slivnom području. S ciljem što preciznijeg definiranja podzemne razvodnice slivova Ombla i Palata (Zaton) izvršeno je trasiranje podzemnih tokova iz više karakterističnih bušotina. Speleološki je istraženo preko 2,5 km kanala Viline špilje. Osim navedenog, provedena su istraživanja koja su rezultirala podacima o razlomljenosti naslaga, orijentaciji dominantnih sustava pukotina i rasjeda, podijeljenosti navlačne strukture na tri bloka kao i o međublokovskim tektonskim pomacima. Na temelju tih radova dana je ocjena mogućnosti izgradnje injekcijske zavjese, kao i ocjena opasnosti od utjecaja uspora vode na stabilnost flišnih naslaga. Prateći hidrološke uvjete u zaleđu izvorišta i razine podzemne vode u piezometrima T. Paviša (1993.) je izradio "Analizu ponašanja podzemne akumulacije Ombla u prirodnim uvjetima".

Hidrološku obradu voda sliva Omble načinili su R. Žugaj i O. Bonacci (1994.), a V. Jović (1997.) je izradio "Numerički model ponašanja podzemne akumulacije u prirodnim i projektom definiranim uvjetima". T. Paviša je 1998. godine pisao o projektu za energetska iskorištenje podzemnih voda zaleđa Omble i zaključio da je „u zaleđu krškog izvora Ombla moguće formirati podzemnu akumulaciju”. Z. Sever i dr. (1998.), kao sukus svih istraživačkih i projektantskih radova, načinili su "Idejni projekt HE Ombla", a godinu dana kasnije "Studiju utjecaja na okoliš HE Ombla". R. Buljan je (2008.) u elaboratu „HE Ombla - Rekapitulacija rezultata istražnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane“ dao pregled rezultata svih navedenih istraživanja. Iste godine su T. Paviša i Z. Sever izradili elaborat „Hidroelektrana Ombla - Projekt za energetska iskorištenje podzemnih voda u kršu“. Konačno je 2011. godine Tractebel Engineering GDF SVEZ u suradnji s firmom PB - Projektni biro Split d.o.o. za potrebe European Bank for Reconstruction and Development izradio – Technical Due Diligence elaborat „Ombla Hidropower Project-Final Report. Rev. November 2011. u kojem je u poglavlju 4.4 Hydrogeology and water quality dan prikaz hidrogeoloških značajki područja sliva Omble.

2.3 Hidrogeološke značajke sliva Palate

Unutar sliva izvora Palata prostire se zapadna polovica područja ekološke mreže Paleoombla-Ombla. Područje sliva Palata zauzima prostor od oko 50 km², a dijelom se prostire i na području Republike Bosne i Hercegovine. Smatra se da ovom izvoru gravitiraju podzemne vode iz područja Ljubač, Gromača i Kliševo. Najveći dio sliva izgrađen je od dobro vodopropusnih karbonatnih naslaga. Gornjojurski dolomiti dijelom predstavljaju relativnu barijeru kretanju podzemne vode. U neposrednom zaleđu izvora Palata trijaski su dolomiti dezintegrirani pukotinskim sustavima koji su uočljivi i u zaleđu u zonama izgrađenim od jurskih vapnenaca. Sve to, kao i barijera eocenskog fliša prije mora uvjetovali su na tom mjestu pražnjenje podzemnih voda zaleđa i nastanak izvora Palata. To je razbijeno izvorište koje izvire u trijaskim dolomitima, ali je uvjetovano kontaktom s nepropusnim naslagama fliša, koji je oko 100 m jugozapadno od izvora potopljen morem. Nagibni kut rasjedne plohe iznosi do 22⁰, a dubina do fliša u području izvorišta iznosi od 40 do 70 m. Sam izvor se nalazi u dnu uvale M. Zatona. Ima oblik jezera zatvorenog betonskom branom prema moru s preljevnim otvorima i kanalskim odvodom za mlin i u more.

Svi rezultati dosadašnjih istraživanja ukazuju na povezanost slivova Omble i Palate samo kod velikih voda, odnosno na to da do prelijevanja dijela vode iz sliva Omble u sliv Palate dolazi samo u višim zonama. Stoga planirani geotehnički i hidrotehnički zahvati, odnosno promijenjeni hidrogeološki

uvjeti u neposrednom slivu Omble do kojih će doći u slučaju izgradnje HE Ombla ne mogu bitnije utjecati na hidrogeološke uvjete u zapadnom dijelu područja ekološke mreže Paleoombla-Ombla.

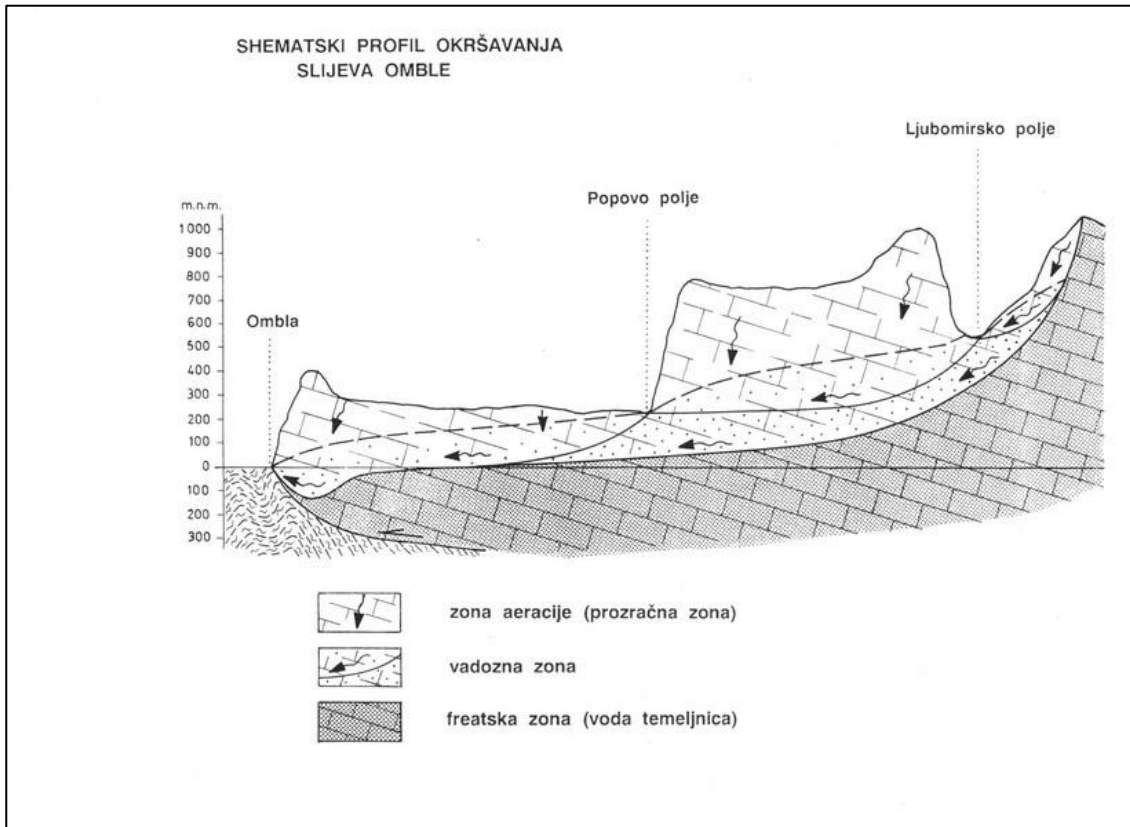
2.4 Postanak i razvitak sliva Omble

Područje kojim se prostire sliv Omble, uključivši i područje ekološke mreže Paleoombla - Ombla, čini tipičan krški teren, osobitih geomorfoloških, geoloških i hidrogeoloških svojstava. Za njegov nastanak nužna su tri preduvjeta. Prvi preduvjet je postojanje stijena podložnih kemijskoj razgradnji pod utjecajem vode. Drugi preduvjet je tektonska oštećenost stijenske mase odnosno postojanje pukotina i prslina u koje može prodrijeti voda. Treći preduvjet su klimatski uvjeti s relativno velikom količinom oborina. Ako su ti preduvjeti ispunjeni dolazi do procesa okršavanja. Rezultat tog procesa je nastajanje različitih krških oblika i pojava na površini terena i u podzemlju. Okršavanjem se u podzemlju razvija pukotinska i kavernska poroznost koje omogućuju infiltraciju oborinskih voda u krško podzemlje, složenu cirkulaciju vode u krškom podzemlju i nastajanje krških vodonosnika sa specifičnom dinamikom podzemne vode.

Napajanje vodonosnika odvija se infiltracijom kroz nekonsolidirani materijal koji pokriva okršene stijene ili direktnim poniranjem vode u raspucanu i okršenu stijensku masu. Infiltrirana voda kreće se vertikalno dok ne dospije do relativno horizontalnih podzemnih kanala koji su prošireni otapanjem i erozijskim djelovanjem tekuće vode. Izvori su točke istjecanja iz vodonosnika i obično su smješteni blizu regionalnog baznog nivoa ili tamo gdje netopive stijene ili strukturne barijere poput rasjeda prekidaju stvaranje podzemnih kanala. Općenito, krški izvor je glavna točka istjecanja (pražnjenja) krškog bazena s podzemnom vodom. Veliki krški izvor može izvirati iz glavnog podzemnog kanala i predstavlja drenažu sustava podzemnih kanala i pukotina koje konvergiraju prema glavnom kanalu (konvergentni tok) ili može biti jedan od skupine izvora koji djeluju poput delte površinskih vodotokova.

Opisana obilježja ima i sliv Omble. Teren je ovdje najvećim dijelom izgrađen od vapnenaca kao stijena koje su relativno dobro topive u vodi, koji su tektonskim procesima razlomljeni, raspucani i izrasjedani, a područje obiluje oborinama koje se danas kreću između 1 300 i 2 100 mm/god., a u nekim periodima geološke prošlosti bile su još obilnije. To je posebno značajno za izmjene glacijalnih i interglacijalnih doba tijekom pleistocena. Dok je tijekom glacijacija količina vode bila ograničena, interglacijacije su se odlikovale velikim količinama vode i pojačanom erozijom. Formirana ledenjačka jezera imala su, na prijelazu iz pliocena u pleistocen, uz tektoniku, odlučujuću ulogu u razvitku podzemne krške morfologije i krških vodonosnika. Uslijed podložnosti karbonatnog medija procesu okršavanja, dio vode je osim tokom Trebišnjice počeo otjecati i podzemno do mora. S vremenom je infiltracija vode u podzemlje i podzemno otjecanje postajalo sve veće u odnosu na površinsko otjecanje. Danas se gotovo sve oborine u kratkom vremenu apsorbiraju kroz krški reljef i infiltriraju kroz spletove pukotina i kanala u podzemlje. Tako se umjesto površinske formira bogata i razgranata podzemna hidrografska mreža kojom vode teku do zone istjecanja na razini mora.

Karbonatne naslage koje sa svojim akumulacijskim i permeabilnim obilježjima danas prostorno predstavljaju okršeni prostor neposrednog sliva Omble, hidrogeološki gledano, tijekom pleistocena bile su pod utjecajem tri kaskadno postavljene zone istjecanja (R. Buljan 2008) (Slika 2.2.).



Slika 2.2. Prikaz razvitka okršavanja prostora sliva Omble (preuzeto iz elaborata HE OMBLA - Rekapitulacija rezultata istražnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane, R. Buljan 2008.).

Najviša je lokalna zona istjecanja Ljubomirskog polja (na 550 m), ispod nje je lokalna zona istjecanja Popovog polja (na 250 m), a zonu istjecanja na razini mora predstavljale su Paleoomble. Tijekom geološkog vremena zone istjecanja stopile su se u jedinstvenu zonu za čitav prostor, s tim da je dominantna postala najniže položena zona istjecanja. Zona istjecanja Ljubomirskog polja danas je lokalnog značenja, dok je zona istjecanja Popovog polja važna, jer presijeca sliv i omogućava u vrijeme velikih voda površinsko otjecanje vode Trebišnjicom iz sliva Omble u susjedno slivno područje nizvodnog dijela Popovog polja.

Razvitak poroznosti i propusnosti karbonatnih naslaga sliva, gledano u prostoru i vremenu, posljedica je hidrogeološkog prilagođavanja područja razini dominantne zone istjecanja na Ombli. To je permanentni geološki proces. Na području razmatranja flišna barijera s južne strane, a dolomitna

hidrogeološka barijera Lastvanske antiklinale sa sjeverne strane, uvjetovale su dubinu do koje karbonatne naslage imaju izraženu efektivnu poroznost. Međutim, kako je Ombla uzlazni izvor, a uzevši u obzir i recentnu tektonsku aktivnost, zatim pomake struktura i strukturnih blokova i uvjete koji su omogućili razvitak okršavanja prije prostornog smještanja karbonatnih naslaga uz hidrogeološku barijeru flišnih naslaga, današnju zonu istjecanja na razini mora ne treba uzimati kao granicu ispod koje nema okršenosti. Ona je samo granica iznad koje su danas procesi okršavanja, u širem smislu, dominantni geološki procesi. Rezultati bušenja, ispitivanje VDP-a i provedena geofizička mjerenja idu u prilog spoznaji da je zona ispod današnje zone istjecanja vode iz zaleđa (izvan zone privilegiranih podzemnih tokova) slabije porozna. U pripovršinkoj zoni karbonatnih naslaga sliva Omble, tj. u prostoru između vodnog lica kod maksimalne razine podzemnih voda i površine terena, proces okršavanja se intenzivno odvijao u nekom starijem razdoblju, a sada je znatno usporen. Danas je to zona s krškim oblicima, hidrogeološki gledano, ograničene aktivnosti. Ona ima odlike nesaturirane zone (zone aeracije) kroz koju se odvija pretežito vertikalna cirkulacija podzemne vode. Samo u slučaju ekstremnih padalina niži dijelovi ove zone, u dijelu sliva između Trebišnjice i Omble, mogu biti ispunjeni vodom. Zbog oblikovanja recentnog strukturnog sklopa, te postupnog izdizanja karbonatnih naslaga u čelu navlake Dinarika, uslijed navlačenja i pri tom rotacije oko horizontalne osi, privilegirani temeljni tokovi spuštaju se dublje i glavne koncentrirane kanalske provodnike formiraju duž zona rasjeda na nižim razinama. Spuštanje kanalskih provodnika prati i spuštanje zona izviranja. Na taj način napuštena mjesta izviranja postala su povremeni izvori velikog kapaciteta ili krški kanali bez vode koji se danas nalaze na različitim visinama iznad recentne zone istjecanja i drenažnih tokova sliva (npr. sustav šupljina Viline špilje).

Lokacija izvorišta Omble je strukturno uvjetovana. Nastala je unutar tektonikom zdrobljene zone čije je obilježje "snop" rasjeda pružanja SI - JZ u okviru zone Hum - Ombla. Spomenuti rasjedi u najvećoj su mjeri odredili privilegirane smjerove cirkulacije podzemnih voda iz zaleđa. Rasjedna zona Hum-Ombla u stvari predstavlja glavni drenažni prostor cijelog hidrogeološkog sustava (Buljan 1999). Nakon formiranja zone istjecanja u pleistocenu, voda je dalje na lokaciji izvorišta, zajedno s tektonikom, pospješila erodiranje naslaga fliša što je izazvalo dodatno sniženje zone istjecanja Omble sve do zone istjecanja na razini mora. Izdizanje karbonatnih naslaga u zoni čela navlake Dinarika, erozija flišne barijere i spuštanje zone istjecanja na razinu mora utjecali su da su zone paleoistjecanja Omble danas izdignute. Uslijed tektonikom uvjetovanih pravaca intenzivnijeg okršavanja pospješeno djelovanjem podzemne vode, između slivova Omble i Palate u Malom Zatonu ostaje visoko položena baza okršenosti koja ih u nizvodnom dijelu sliva hidrogeološki razdvaja.

Prostor unutar karbonatnih naslaga između zone istjecanja na razini mora i razine maksimalnih podzemnih voda unutar sliva, predstavlja zonu najveće hidrogeološke aktivnosti, zonu povremene retencije, a ujedno i zonu u kojoj su procesi okršavanja najintenzivniji. To je zona dinamičkih rezervi podzemne vode. Protok vode osobito je izražen u najnižim dijelovima ove zone, jer su u njima prostorno smješteni glavni kanalski provodnici podzemne vode. Svaka od prisutnih lokalnih zona istjecanja unutar sliva Omble (Ljubomirsko polje, Popovo polje, izvorište Ombla) tijekom oblikovanja sliva imala je formiranu vlastitu podzemnu hidrografsku mrežu s razrađenim privilegiranim kanalskim provodnicima podzemne vode. Uslijed permanentnog izdizanja terena te uslijed djelovanja vode i sve dubljeg okršavanja, drenažni tokovi lokalnih zona istjecanja spustili su se ispod lokalnih baza okršavanja i s vremenom spojili u jedinstvenu zonu drenažne mreže neposrednog sliva Omble. Zbog toga se u razdoblju malih voda protok prema Ombli odvija ispod razine Popovog polja - ispod korita

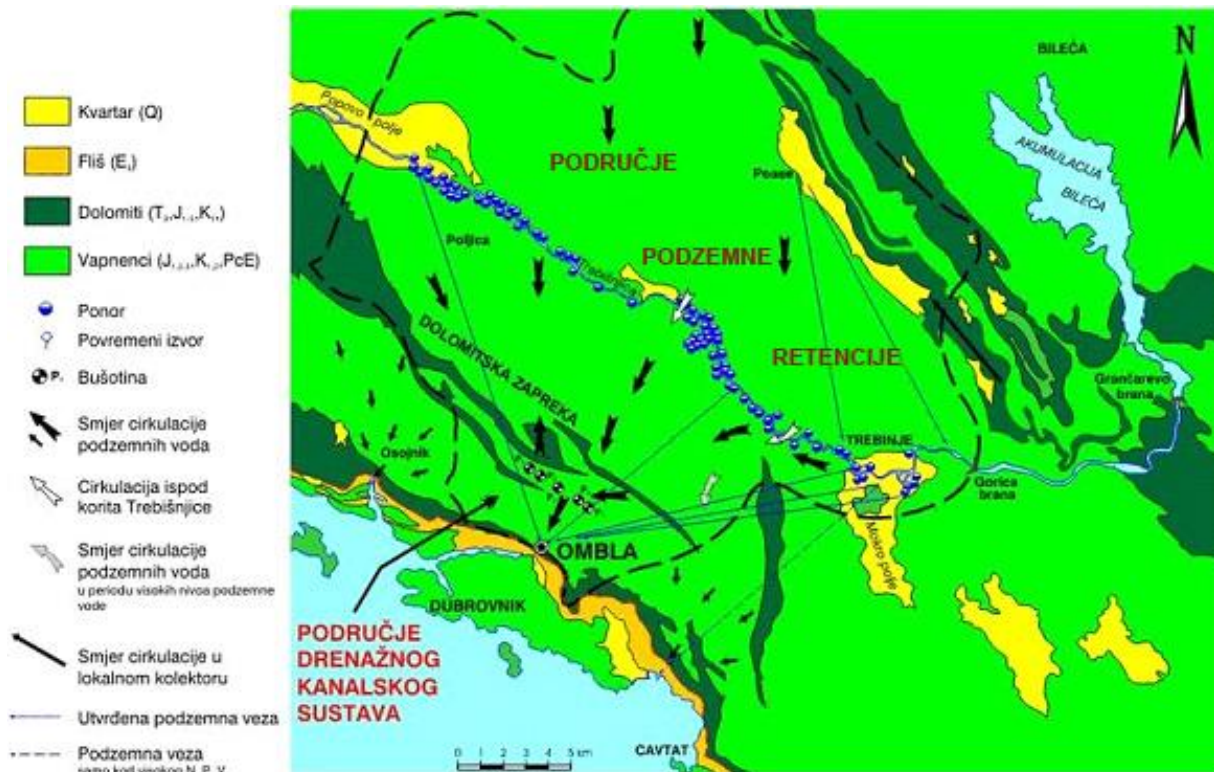
Trebišnjice. Hidrogeološke značajke koje su početkom pleistocena imale lokalne zone istjecanja (lokalne erozijske baze) permanentno, nakon formiranja jedinstvene zone istjecanja za cijeli sliv imaju samo u razdoblju visokih razina podzemnih voda (zona estavela sa sjeverne strane korita Trebišnjice). Dio karbonatnih naslaga u zaleđu izvorišta Ombla zbog tektonske razlomljenosti, hidrauličkog pritiska u tom dijelu sliva i velikog protoka u glavnim kanalskim provodnicima, također je izvrnut intenzivnom procesu okršavanja, iako je prostorno smješten ispod zone istjecanja na razini mora. To dovodi do sporog, ali permanentnog spuštavanja glavnih koncentriranih tokova unutar sliva, a na taj način se produbljuje i aktivna hidrografska mrežu u čitavom slivu Omble.

2.5 Hidrogeološke značajke recentnog sliva Omble

Odnosi između hidrogeoloških značajki stijena, tektonske aktivnosti, prostornog i hipsometrijskog položaja geoloških tijela, morfologije, količine i rasporeda oborina i dr. uvjetuju hidrogeološke odlike pojedinih dijelova terena (Bahun 1989). Područje istraživanja pripada nizvodnom dijelu ovećeg hidrogeološkog sliva s izvorištem Ombla kao dominantnim priobalnim vodnim objektom unutar tog sliva. Ombla izvire na tektonskom navlačnom kontaktu karbonatnih i klastičnih flišnih naslaga, na kraju glavnog drenažnog područja sliva razvijenog duž zone rasjeda Hum - Ombla. Izvorište je pod usporom na 2,38 m n.m., sa srednjom godišnjom specifičnom izdašnošću od 23,9 m³/s. Sliv Omble određen je na temelju hidrogeoloških podataka šireg područja prikupljenih u sklopu radova za hidrosustav Trebišnjice, i, što je posebno važno, na temelju utvrđenih podzemnih veza zona koncentrirane infiltracije površinskih voda (zona ponora unutar sliva i njemu graničnim slivovima) sa značajnijim izvorima područja. Hidrološki gledano, u širem području razmatranja nužno je razlikovati prirodne uvjete istjecanja vode na Ombli (prije izgradnje hidrosustava Trebišnjice) i aktualno stanje od 1979. godine kada je završeno betoniranje dijela korita Trebišnjice nizvodno od Trebinja. U prirodnim uvjetima sliv Omble (danas podijeljen na posredni i neposredni) obuhvatio je područje od razvodnice Jadranskog i Crnomorskog sliva (Čemerno, Lebršnik), preko kaskadno smještenih krških polja (Gatačkog, Cerničkog, Fatničkog, Trebinjskog, Mokrog i Popovog) do priobalnog pojasa ukupne površine preko 2.200 km² (Milanović 1977). Vode ovog sliva su zbog hidrogeološke barijere koju čine dolomiti trijaske, jurske i donjokredne starosti (antiklinala Lastva) istjecale na površinu na izvoru Trebišnjice, koritom Trebišnjice dotjecale u zonu danas neposrednog dijela sliva Omble, odakle je u zonama koncentrirane infiltracije dio vode ponirao i podzemno otjecao do Omble. Izgradnjom brane Gorica (kompenzacijski bazen za HE Dubrovnik u Platu) i betoniranjem korita Trebišnjice nizvodno od Trebinja (voda za HE Čapljina) sliv Omble je praktično sveden na površinu neposrednog sliva.

Neposredan sliv Omble (prema Milanoviću 1977) zahvaća krški ravnjak zaleđa Omble, dio Popovog polja (Trebinjsku šuma, područje Luga i dio polja do Grmljana), područje između Popovog polja i Ljubomira te sliv Ljubomirskog polja (Slika 2.3.). Na temelju dosadašnjih spoznaja aktualna površina neposrednog sliva Omble obuhvaća oko 600 km². Izvorište Ombla vodom se napaja poniranjem oborina kroz okršene naslage na površini i kroz zone koncentrirane infiltracije vode u podzemlje (ponore i estavele). U području neposrednog sliva Omble jedini stalni površinski tok je rijeka Trebišnjica s dijelom svog toka između Gorice i Dražin Dola uzvodno od Trebinja. Količina vode u koritu uvjetovana je onom koja se propušta kroz branu Gorica. Radi se o protoku od 4.5 m³/s, što je dovoljno za biološki minimum toka rijeke kroz Trebinje za zoocenuzu i fitocenuzu u dijelu rijeke koji nikad nije presušio. U sušnom razdoblju dinamičke rezerve vode Omble obnavljaju se dobrim dijelom od gubitaka u nebetoniranom dijelu korita Trebišnjice (od brane Gorica do Pridvoraca) i od vode koja

se gubi na bokovima pregradnog profila brane Gorica zbog nepotpune injekcijske zavjese te kroz dno kompenzacijskog bazena i ispod brane. Te vode otječu kroz podzemlje izravno do Omble. Korito rijeke prije betoniranja predstavljalo je najveću zonu koncentrirane infiltracije vode prema Omblu (Milanović 1984). Nakon betoniranja poniranje vode je bitno reducirano. Ostale su aktivne samo zone ponora izvan korita koje u uvjetima reduciranog protjecanja Trebišnjice nemaju bitnog utjecaja na ukupnu bilancu vode izvorišta Ombla.



Slika 2.3. Hidrogeološka karta šireg područja s prikazom neposrednog sliva izvorišta Omble (preuzeto iz R. Žugaj (2011)).

U Ljubomirsko polje iz brdskog dolomitnog zaleđa dotječu povremeni bujični tokovi i tvore povremeni tok rijeke Brove. Duž dolomitne podloge u polju nema gubitaka vode, no ulaskom u dio polja izgrađen od okršenih vapnenaca tok ponire kroz brojne ponore u zoni koncentrirane infiltracije vode kraj Ždrijelovića. Dalje voda podzemno teče ispod razine Popovog polja prema Omblu (zoni istjecanja na razini mora). Samo kod vrlo visoke razine podzemnih voda dio istječe kroz estavele na razini korita Trebišnjice koja u tim hidrološkim uvjetima predstavlja lokalnu zonu istjecanja. Na većem dijelu površine sliva, a naročito na područje Trebinske šume, postoji veliki brojh plitkih ponikava, napuštenih fluvijalnih dolina i relikata brojnih ponora, suhih jama i šupljina (Mladenović 1969) čiji kanali pospješuju tok vode do izvorišta.

Proces okršavanja vapnenačkih naslaga zahvaćen je do velike dubine, a u zoni izviranja Omble dublje nego što je razina Jadranskog mora (prema podacima geofizičkih istraživanja barem 150 m dublje).

Hidrogeološka i orografska razvodnica u razmatranom području se ne podudaraju. Hidrogeološka razvodnica ima sve odlike znakovite za krške sredine i teško ju je označiti oštrom granicom. Radi se o zonarnim razvodnicama čiji položaj i širina ovise o razini podzemne vode. Zbog toga je granica sliva ucrтана na kartama u nekim dijelovima približna. Razvodnica prema posrednom slivu može se smatrati točnom. U tom dijelu ona duž dolomitnih zona (antiklinala Lastva) prati orografsku razvodnicu.

2.6 Hidrogeološke značajke naslaga

Na temelju litološkog sastava, stupnja deformacija strukturnog sklopa na površini i brojnih istraživačkih radova izvedenih u okviru izrade idejnog projekta za HE Ombla, naslage ovog područja mogu se svrstati u tri osnovne kategorije: dobro vodopropusne, slabo vodopropusne i vodonepropusne naslage (vidi hidrogeološku kartu).

Dobro vodopropusne karbonatne naslage predstavljaju okršeni vapnenci jurske i kredne starosti. Geofizička istraživanja pokazala su da su karbonatne naslage intenzivno okršene do dubine 150-200 m. Najokršnije zone (debljine i preko 250 m) nalaze se uz rasjede s tim da je na potezu Začula-Zaplanik-Orah okršenost naslaga najdublja i spuštena je dublje od 50 m n.m. Na istok i na zapad od zone rasjeda Hum-Ombla "reljef" intenzivne okršenosti naslaga izdiže se i iznad 200 m n.m. U tim naslagama su, uslijed pukotinsko-disolucijske poroznosti (sekundarne poroznosti svojstvene kršu kada se uslijed erozije i korozije pore i pukotine proširuju i spajaju u veće), formirani privilegirani smjerovi podzemne cirkulacije vode (koncentrirani kanalski tokovi). Tip poroznosti uvjetuje dobru propusnost koja, uz izrazitu okršenost, rezultira znatnim kolektorskim kapacitetom karbonatnih naslaga zaleđa Omble.

Dobro vodopropusne klastične naslage područja razmatranja jesu obrončano kršje, proluvijalne i aluvijalne naslage kvartarne starosti s intergranularnim tipom poroznosti.

Slabo vodopropusne karbonatne naslage predstavljaju proslojci, zone i leće tektonski raspucanog dolomita trijasko, jurske i donjokredne starosti unutar karbonatnog kompleksa Dinarika.

Vodonepropusne klastične naslage obuhvaćenog područja jesu eocenske flišne naslage izgrađene pretežito od lapora i zaglinjenog lapora, a tek mjestimice tankih proslojaka vapnenaca, vapnenačkih breča, pješčenjaka i silta. Iste hidrogeološke značajke imaju i dolomiti trijasa koji čine jezgru Lastvanske antiklinale.

2.7 Hidrogeološka funkcija terena

Prema hidrogeološkim značajkama naslaga, njihovom položaju u geološkoj strukturi, rasporedu zona poniranja i izvora, rezultatima trasiranja najvažnijih zona poniranja, motrenjima razine vode u piezometrima i ostalim radovima, ocijenjena je hidrogeološka funkcija terena područja razmatranja. U hidrogeološkom smislu razlikuje se kompleks dobro propusnih naslaga, koje sadrže slabije vodopropusne zone dolomita, od klastičnih flišnih naslaga koje imaju hidrogeološku funkciju potpune barijere.

Kompleks dobro propusnih naslaga vapnenaca zauzima daleko najveći dio sliva. To su okršeni vapnenci jurske i kredne starosti. Njihove hidrogeološke odlike, uz generalno monoklinalno položenu strukturu sa smjerom nagiba prema sjeveroistoku i tektoniku koja je dominantno pripremila, unaprijed odredila i bila ključna za nastanak privilegiranih smjerova podzemnih tokova, uvjetuju formiranje i evoluciju izvora u naslagama ove hidrogeološke sredine. Dio jedinstvenog karbonatnog kompleksa naslaga predstavljaju i leće, proslojci i zone dolomita koji su zbog litoloških značajki slabije okršeni, a pukotine su im ispunjene dolomitnim pijeskom uslijed njihove podložnosti procesu grusifikacije. Zbog slabije vodopropusnosti zone dolomita značajne su za usmjeravanje tokova podzemne vode unutar dobro vodopropusnih vapnenaca. Jurske dolomitne naslage na potezu Ščenica - Zaplanik u zaleđu Omble predstavljaju dio izdužene antiklinale koja se pruža od Hutova preko Zavale do Zaplanika. Na potezu Zavala - Zaplanik ti dolomiti imaju ulogu hidrogeološke barijere za vode koje dotječu iz smjera Popovog polja. Kod Zaplanika dolomiti su isprekidani rasjedima iz zone Hum - Ombla i tu prestaje njezino obilježje hidrogeološke barijere. Od Ščenice do Zaplanika ona usmjerava podzemne vode koje poniru u Popovom polju između Dobromana, Poljica i Dračeva prema Ombli. Tako podzemna cirkulacija vode u jednom dijelu sliva Omble ima gotovo suprotan smjer toka od površinske cirkulacije, tj. od smjera toka Trebišnjice. Ujedno, spomenute dolomitne naslage najvjerojatnije predstavljaju i razvodnicu između dijela sliva Omble i dijela sliva Palate u Malom Zatonu.

Hidrogeološka funkcija donjokredne dolomitne zone uz Slivnički rasjed između Kočela i izvora Robinzon hidrogeološki nije do kraja definirana. Vjerojatno se radi o uskoj zoni dolomitnih naslaga koje bočno isklinjavaju i najvjerojatnije imaju ulogu nepotpune hidrogeološke barijere. Vode koje poniru u koritu Trebišnjice na potezu brana Gorica – Trebinje - Tvrdoši teku podzemnim krškim pukotinskim sustavima u smjeru koji se poklapa s tokom Trebišnjice i tek kada obiđu dolomitnu barijeru na potezu Kočela - Taleža gravitiraju prema recentnoj erozijskoj bazi tj. prema mjestu istjecanja Omble (Milanović i dr. 1989). Dolomitna zona uz rub Ljubomirskog polja granična je slivu sa sjeveroistoka i zajedno s Lastvanskom antiklinalom dijeli ga od velikog tzv. posrednog dijela sliva Omble. Dolomiti iz čela navlake Dinarika su na dosta mjesta rasjednuti transkurentnim rasjedima, uglavnom s lijevim tektonskim transportom, no kako se nalaze u izravnom kontaktu s debelim kompleksom flišnih naslaga, ulogu potpune hidrogeološke barijere zapravo preuzima flišna zona.

Unutar neposrednog sliva Omble postoje još brojne manje zone ili leće dolomita koje su u pravilu isključivo lokalnog karaktera. Kada im je položaj u prostoru takav da “skupljaju” vode iz okršenog karbonatnog kompleksa stijena, one imaju utjecaj na formiranje manjih, u pravilu povremenih izvora lokalnog značenja.

Uska priobalna zona klastičnih flišnih naslaga na području razmatranja zbog svog postojanog prostiranja i znatne debljine (350 do 500 m ispod razine mora) ima hidrogeološku funkciju potpune barijere. Neposredno na njih navučeni su dolomiti trijasa iz čela navlake karbonatnog kompleksa naslaga koji još dodatno potvrđuju njihovu funkciju barijere. Vode iz zaleđa do recentne erozijske baze, do Jadranskog mora, mogu se prazniti jedino prelijevanjem preko ove barijere. U ovom dijelu dubrovačkog priobalja i u Rijeci Dubrovačkoj nema vrulja, jer nije moguća izravna hidrogeološka komunikacija kroz flišne naslage do mora.

Flišne naslage s funkcijom potpune hidrogeološke barijere pružaju se od Slanog do Konavoske Ljute, a na njihovom kontaktu s karbonatnim kompleksom naslaga nalazi se niz izvora poput onih u Slanom,



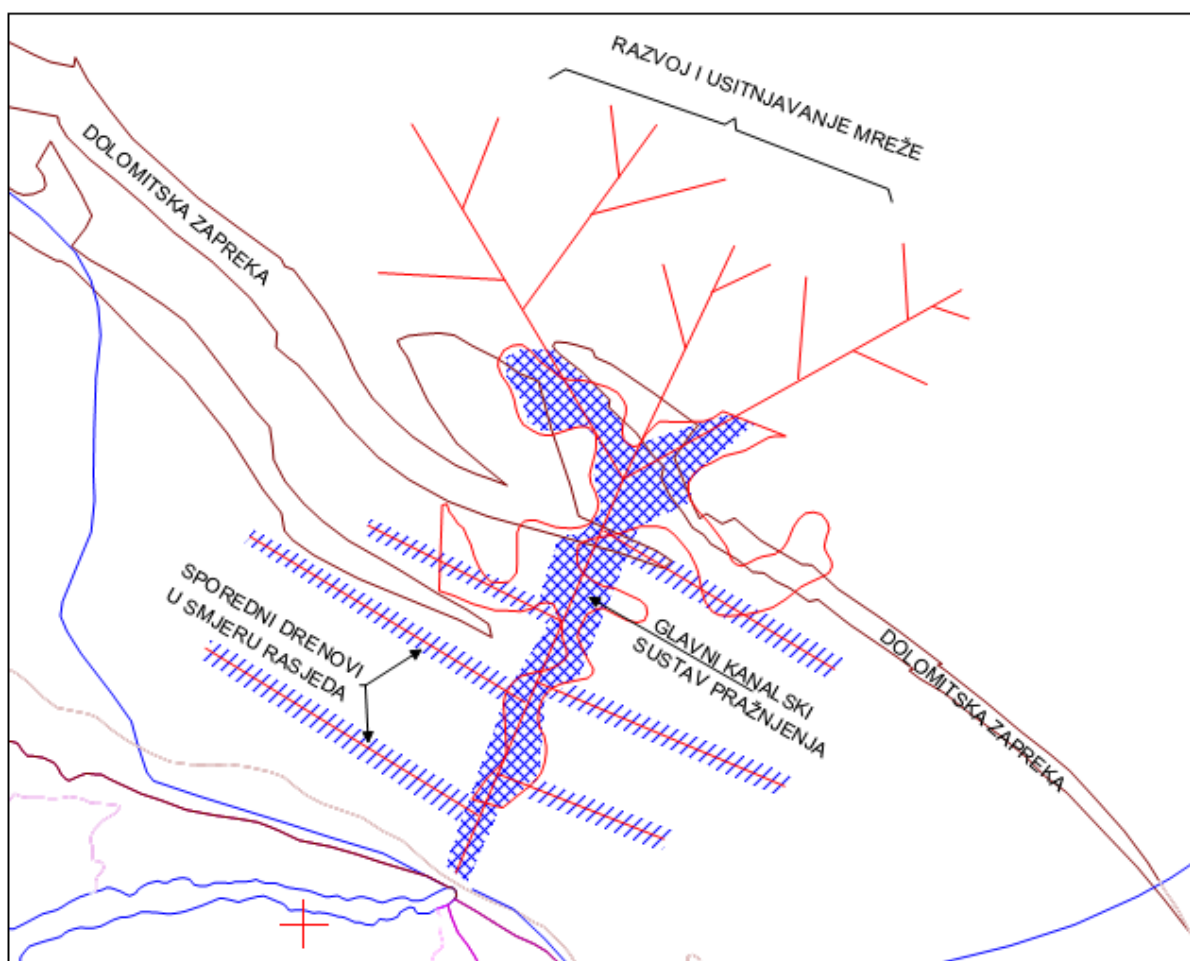
Trstenu, Orašcu, Zatonu (Palata), Rijeci Dubrovačkoj (Ombla i Slavjan), Mlinima (Zavrelje), kod Duboke Ljute (Robinzon), u Konavlima (Ljuta) i još puno manjih. Najveću izdašnost imaju oni izvori čiji je položaj hipsometrijski najniži. Ovakva kontinuirana flišna zona onemogućava difuzno istjecanje podzemne vode iz okršenih naslaga zaleđa, već uvjetuje koncentrirano pražnjenje zaleđa preko nekoliko izvora.

2.8 Mehanizam punjenja i pražnjenja sliva Omble

U današnjim uvjetima punjenje prirodnog podzemnog jezera koje prihranjuje Omblu isključivo je oborinsko. Pale kiše brzo poniru u brojne ponore i pukotine u karbonatnim naslagama cijelog sliva. Glavnina vode dopijeva u podzemne šupljine sjeverno od dolomitske zapreke, a manji dio južno. Šupljine se sastoje od sitnih pukotina do većih kaverni i kanala. U južnom dijelu sliva u neposrednoj blizini izvora utvrđen je glavni drenažni kanalski sustav s velikom dvoranom (špiljom), kao i fosilni špiljski sustavi koji se u području izvora pružaju u smjeru glavnog drenažnog sustava.

Pražnjenje akumulirane vode odvija se kroz glavne aktivne kanalske sustave u smjeru koji se protežu prema izvoru Omble, dakle okomito na dolomitsku zapreku. Osim glavnog kanalskog drenažnog sustava, pretpostavlja se postojanje i manjih bočnih drenova, koji se pružaju u smjeru rasjeda usporedno sa dolomitskom zaprekom. Njihova uloga je u pražnjenju manjih do vrlo sitnih šupljina. U kanalskom drenažnom sustavu odvija se turbulentni tok, dok u prostoru manjih pukotina, pora i šupljina prevladava difuzni tok.

Podzemno jezero u sjevernom dijelu sliva Omble puni se oborinama (kišama i topljenjem snijega) te prazni kroz raspucanu dolomitsku zapreku. Dakako, i južni dio, koji je značajno manji, puni se oborinskim vodama, ali radi dobro razvijenog i nisko položenog glavnog, te postojanja sporednog drenažnog sustava kanala, brzo se prazni, tako da glavninu protoka na izvoru Ombla formiraju oborine pale u zaleđu sjeverno od dolomitske zapreke. Prostiranje glavnog drenažnog sustava utvrđeno je geofizičkim mjerenjima okršenosti, glavni kanalski drenažni sustav u području izvora utvrđen je speleološki, te istražnim bušenjem. Mjerenje protoka pokazalo je da glavnim kanalom, koji se proteže na potezu velika dvorana - pregradni profil – izvor, dotječe preko 90 % vode koja izvire na izvoru Ombla (Slika 2.4.). Ostatak teče kroz manje kanale usporedno s glavnim. Nakon prolaska dolomitske zapreke proces koncentriranja kanala nastavlja se sve do samog izvora. U južnom dijelu sliva najvjerojatnije je razvijen sporedni drenažni kanalski sustav koji drenira pale oborine u tom dijelu sliva. Ovaj sustav nije utvrđen neposrednim istraživanjima, no njegovo postojanje indicira pružanje velikog broja rasjeda okomito na glavni drenažni sustav.



Slika 2.4. Glavni i sporedni kanalski sustavi u zaleđu izvorišta Omble (preuzeto iz Jović 1997.).

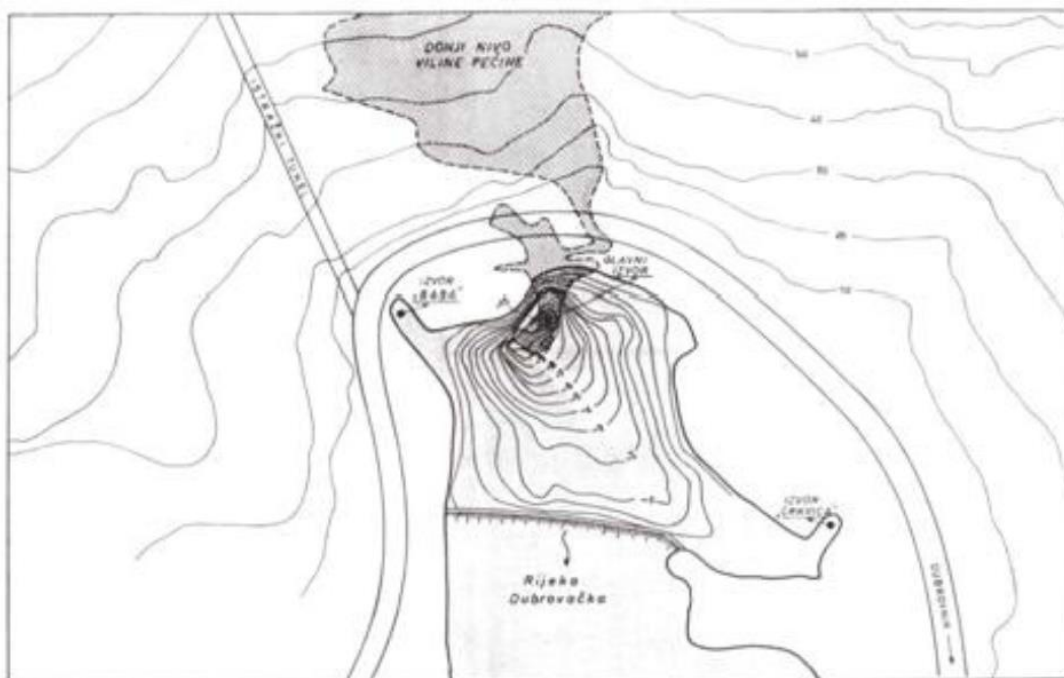
2.9 Hidrogeološki uvjeti istjecanja na izvorištu Ombla

Izvorište Ombla tipično je krško izvorište nastalo na kontaktu karbonatnih naslaga navučenih na debeli kompleks eocenskih flišnih naslaga (Slika 2.5.).



Slika 2.5. Izvor Omble.

Fliš je u zoni izvorišta erodiran do razine mora s Omblom u najnižoj točki, dok se bočno na istok i na zapad hipsometrijski izdiže i preko 150 m. Naslage fliša imaju funkciju potpune hidrogeološke barijere. Izvorište Ombla čine tri koncentrirane zone istjecanja: Glavni izvor, Babe i Crkvica (Slika 2.6.), s tim da na Glavni izvor istječe preko 80 % vode izvorišta. Pri niskim vodostajima izvori izvorišta Ombla funkcioniraju nezavisno.



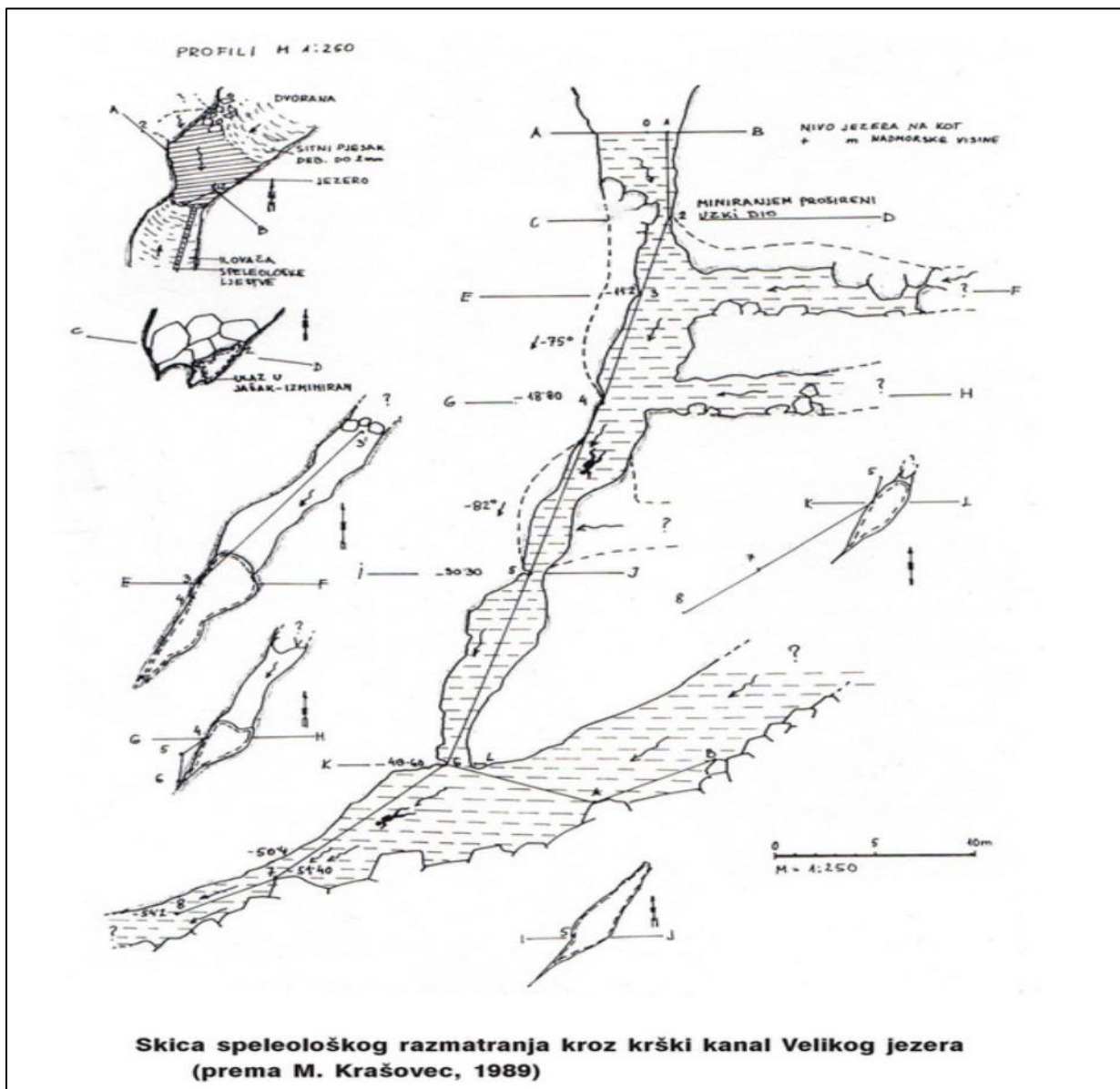
Slika 2.6. Tri zone koncentriranog istjecanja izvorišta Ombla: Glavni izvor, Babe i Crkvica (preuzeto iz elaborata HE OMBLA - Rekapitulacija rezultata istraživnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane, R. Buljan 2008.).

Speleološkim istraživanjima (Krašovac 1985 - 1989) utvrđeno je da se neposredno iza vrela nalazi špilja dužine 80 m, širine oko 40 m i visine iznad vodnog lica oko 8 metara (Izvorišna špilja), koja je sifonskim kanalom povezana s glavnim dovodnim kanalom. Središnji dio Izvorske špilje zatrpan je velikim blokovima i glinom. Kota stvarnog dna kanala preko kojeg leži masa blokova nije poznata, ali se sa dosta sigurnosti može reći da se nalazi na dubinama većim od -35 metara. Donji rub otvora pećine nalazi se na koti 136,63 m n.m. U toku istraživnih radova 1986., 1987. i 1988. otkriveno je preko 2500 metara krških kanala (Slika 2.7., Slika 2.8. i Slika 2.9.). Utvrđeno je prisustvo dva međusobno povezana nivoa kanala koji su speleološki detaljno istraženi. Viši nivo gornje etaže nalazi se između 130-150 m i povezan je s otvorom Viline špilja. Niži nivo (srednje etaže) kanala nalazi se između kote 50 i 80 metara. Do sada je speleološki otkriven samo jedan kanal koji povezuje ova dva sustava. Sigurno je da ovo nisu ni blizu konačne dužine ovih kanalskih sistema i da se oni protežu duboko u zaleđe karbonatnog masiva. Brojni zarušeni i neispitani bočni kanali ukazuju da je i horizontalno rasprostranjenje ovih nivoa daleko veće od do sada istraženog. Isto tako povezanost ovih nivoa nije svedena samo na jedan (otkriveni) kanal. Iz nižeg nivoa, u zaleđu izvora, odvaja se jedan strmi kanal koji se spušta do kote +3 m. Do njega je, iz pristupnog potkopa, iskopana bočna galerija tako da je ostvarena još jedna veza sa Vilinom špiljom.

U toku iskopa pristupnog potkopa bušenjem je utvrđeno da se ispod portalnog dijela nalazi kanal koji pripada izvoru Baba. To je potvrđeno bojenjem vode koja je kroz pukotine u podu ponirala.

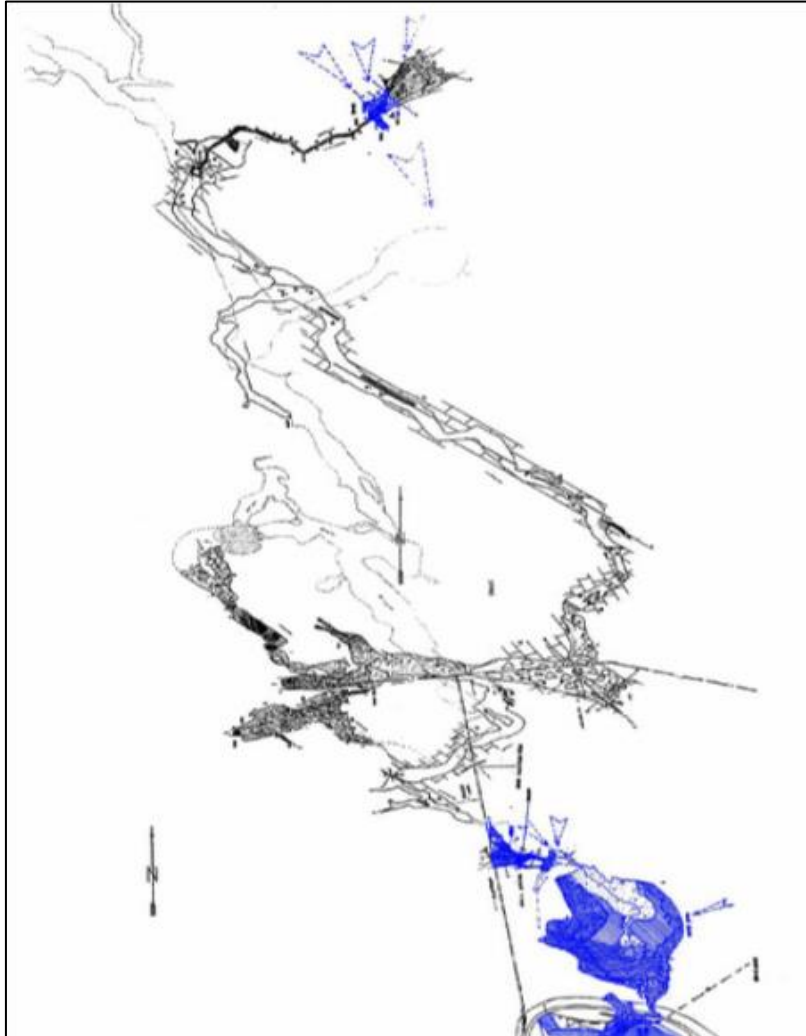
Na udaljenosti cca 520 m u zaleđu vrela istraživanja su pokazala da postoji i treća etaža krških kanala. U zaleđu izvora pronađena je Velika dvorana i kanal čije dno se nalazi na koti -54 m. Za razliku od

gornje dvije, treća (najdublja) etaža pripada sistemu baznog toka, odnosno kanalskom sustavu kroz koji se odvija glavni dotok voda u zonu izvora. Pristupni kanal k trećoj etaži skoro je vertikalni, a dalje se kanal spušta pod nagibom 75° (u pravcu izvorišta) do -40 m. Na tom mjestu subvertikalni kanal ulazi u kanal koji se proteže prema izvorišnoj zoni pod nagibom koji je manji od 30° . Ovim kanalom ronionci su došli do kote -54 m. Dimenzije ovog kanala su znatne, a radi se o jednom od glavnih kanala baznog toka. Utvrđeno je da u subvertikalni kanal voda dotiče iz zaleđa kroz dva skoro horizontalna kanala koji se nalaze na kotama -11 i -18,8 metara. Trasiranjem ovog toka dokazan je dotok u Izvorišnu špilju prosječnom brzinom 5 cm/s, što je u uvjetima sifonalne cirkulacije i u periodu minimalnih nivoa podzemne vode velika brzina. Također, dokazano je da pri niskim nivoima podzemnih voda, tri izvora Omble, Glavni izvor, Crkvica i Baba, koji čine ovu izvorišnu zonu, funkcioniraju nezavisno. Boja se pojavila samo na Glavnom izvoru. Da se radi o sistemima koji su ranije i pri većim proticajima funkcionirali nezavisno govori podatak da je kod vodostaja +9 m u izvorskoj pećini nivo vode u kanalima Babe bio za tri metra niži (oko +6 m). Iskopom pristupnog potkopa narušeno je prirodno stanje pa za vrijeme poplavnog razdoblja dolazi do spajanja ova dva sistema na kotama iznad nule. Pri minimalnim protocima oni i dalje djeluju nezavisno.

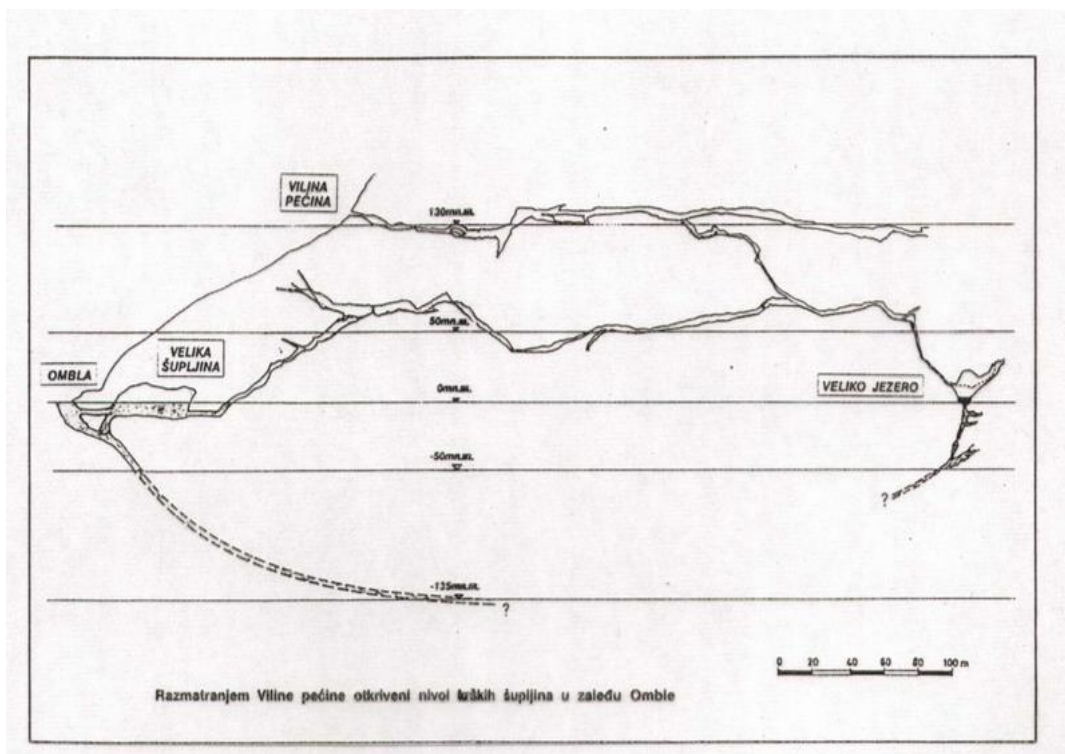


Slika 2.7. Oblik i dimenzije Velikog jezera (preuzeto iz elaborata HE OMBLA - Rekapitulacija rezultata istražnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane, R. Buljan 2008.).

Glavni dovodni kanal izvorišta Ombla sifonskog je oblika. To je uzlazni izvor. Speleološki je istražen do 35 m dubine (Krašovac 1985). Iza izvora je velika šupljina (duljine preko 80 m, širine 15 m i visine 8 m) koja predstavlja neposredno zaleđe izvorišta (Slika 2.8. i Slika 2.9.).



Slika 2.8. Špiljski sustav u zaleđu izvora Ombla – tlocrt (preuzeto iz elaborata HE OMBLA - Rekapitulacija rezultata istražnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane, R. Buljan 2008.).



Slika 2.9. Špiljski sustav u zaleđu izvora Ombla – presjek (preuzeto iz elaborata HE OMBLA - Rekapitulacija rezultata istražnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane, R. Buljan 2008.).

U istražnim galerijama opsežnim speleološkim, geološkim i geofizičkim istraživanjima i ispitivanjima vodopropusnosti u bušotinama, te termometrijskim mjerenjima temperaturnog gradijenta (Paviša i Kavurić 1991), elektrokarotažnim i karotažnim gama-gama mjerenja (Crnojević 1989), seizmičkim cross-holle mjerenjima (Andrić 1990), plitkom refleksijskom seizmikom (Andrić i Sviben 1989), mjerenjima georadarom (Borje 1990) utvrđen je prostorni raspored znatnije okršene zone. Glavni dovodni kanal vode iz zaleđa do izvorišta Ombla, kaverna kroz koju protječe najveći dio vode do zone izviranja, nalazi se približno 130 m ispod istočne istražne galerije na udaljenosti od 122 do 130 m od raskrižja galerija u podzemlju. To je približno 150 m iznad kontakta karbonati/fliš. Orijentacija kaverne je 30 - 210° i koso je postavljena u prostoru pod kutom nagiba od 30 - 70°.

Od utjecaja mora Ombla je odvojena branom s preljevnim pragom na visini 2,38 m. Milanović (1984) navodi da u prirodnim uvjetima protok varira od 2,5 m³/s do 113 m³/s. Izgradnjom hidrosustava Trebišnjice postignuto je ujednačenije istjecanje na Ombli. Prije izgradnje omjer $Q_{\min.} : Q_{sr.} : Q_{\max.}$ je iznosio 1 : 8,8 : 40. Danas taj omjer. iznosi 1 : 2,5 : 16 (Milanović 1984).

Istjecanje iz Omble bilježi se na preljevnom pragu Komolac (30 metara nizvodno od izvora Omble) kontinuirano od 1968. godine (osim tijekom opsade Dubrovnika 1991. - 1992.). U zadnja dva desetljeća provedeno je više hidroloških studija. Niže je prikazana procjena protoka iz najnovije studije (Tractebel Engineering 2011.) za razdoblje od 1981. do 2009. godine (protoci prije 1981. nisu prikazani kako bi se eliminirali uvjeti prije utjecaja oblaganja rijeke Trebišnjice betonskim oblogama na protoke):

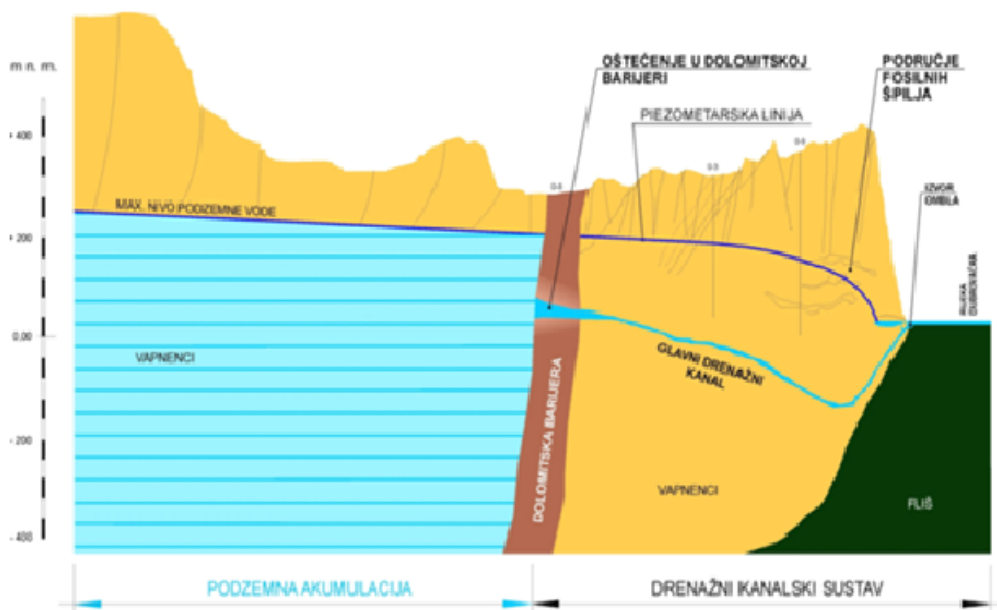
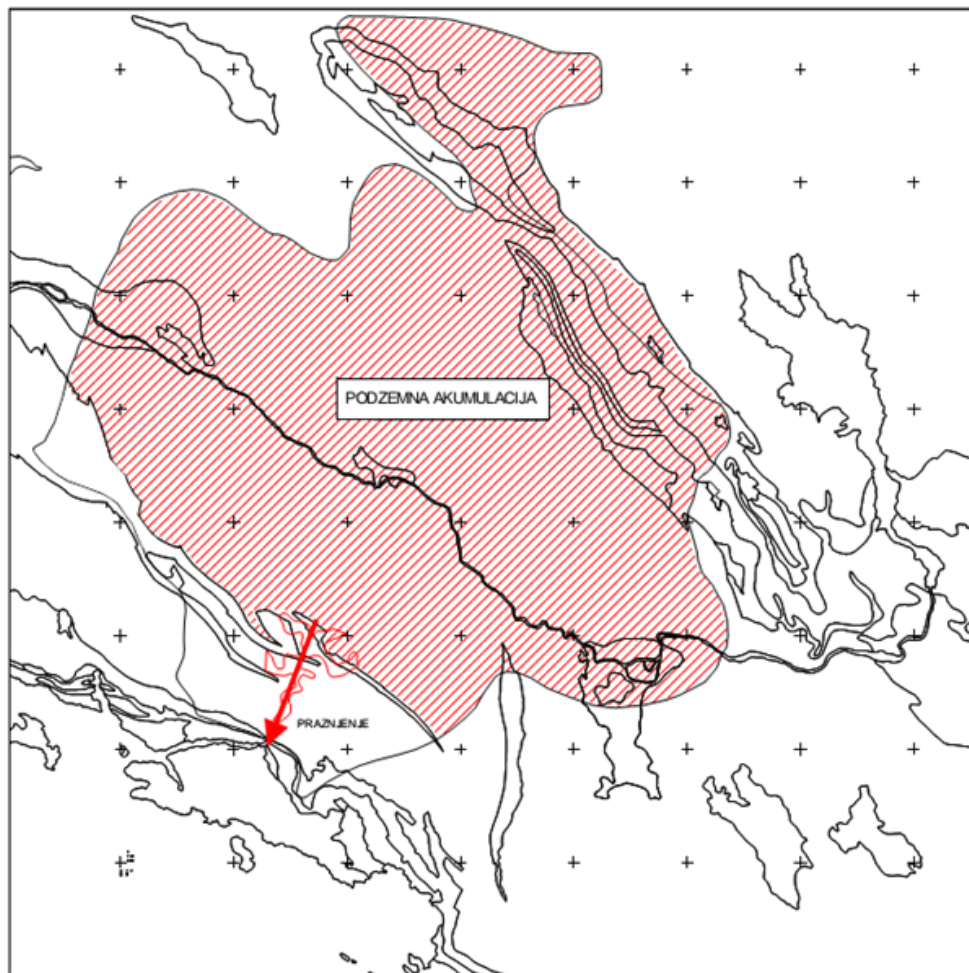
Prosječni protok:	23,1 m ³ /s
Najniži mjesečni prosječni protok:	4,5 m ³ /s (rujan 1990.)
Najviši mjesečni prosječni protok:	66,3 m ³ /s (veljača 1986.)
Protok vjerojatnosti pojavljivanja 95 %:	5,94 m ³ /s
Protok vjerojatnosti pojavljivanja 50 %:	15,1 m ³ /s
Protok vjerojatnosti pojavljivanja 10 %:	61,9 m ³ /s
Protok za maksimalnih godišnjih visokih voda:	76 m ³ /s do 109 m ³ /s
100-godišnji veliki protok:	110 m ³ /s
10000-godišnji veliki protok:	130 m ³ /s
Protok za najviše zabilježene visoke vode:	109 m ³ /s (studeni 1985.).

Voda ima tipične značajke vode krških izvora. Temperatura joj varira od 11,3 do 11,8 °C. Promjene temperature vode su spore i male, a ovise o godišnjim dobima. Ona ne oscilira u tijeku dana. To je neutralna do slabo alkalna voda. Prosječni pH je 7.48 i neznatno varira. Prema svom osnovnom ionskom sastavu pripada skupini kalcijско-hidrogenkarbonatnih voda. Dobro je zasićena kisikom, nije opterećena organskim materijama i ne sadrži amonijak. Tvrdoća vode je između 8,1 i 12,1 DIN - a, što je svrstava u umjereno tvrde vode. Voda je u prosjeku potpuno bistra 328 dana godišnje (87 %). Razdoblja zamućenja vode Omble vezani su za nagle i obilne padaline u zaleđu, a posljedica je podizanja istaloženih glinovitih tvari unutar zona rasjeda i zatrpanih kavernoznih kanala u gornjem dijelu sliva uslijed povećane brzine otjecanja izazvane nadolazećim vodnim valom. U donjem dijelu sliva u kanalskim provodnicima nema istaloženih tvari. Nakon prolaska “špice” vodnog vala mutnoća se naglo smanjuje i ubrzo nestaje.

2.10 Hidrogeološki uvjeti u slučaju izvedbe podzemne retencije

Temeljni hidrogeološki preduvjeti koji omogućavaju izvedbu podzemne retencije su sljedeći (vidi Sliku 2.10.):

- 1) Postojanje relativno velikog sliva (600 km^2) koji se kontinuirano prihranjuje iz relativno velike količine oborine (1 300 – 2 100 mm).
- 2) Dominacija okršenih vapnenaca u tom slivu, čega je posljedica poniranje oborine u podzemlje.
- 3) Postojanje slabo propusne dolomitne barijere koja omogućava nakupljanje vode iz oborine u podzemlju u prirodnu -retenciju unutar okršene vapnenačke mase.
- 4) Postojanje oštećenja u toj dolomitnoj barijeri koje je u visinskom smislu tako smješteno da se iz njega ta prirodna retencija kontinuirano prazni podzemnim tečenjem (uz recentni oborinski režim koji ju kontinuirano prihranjuje).
- 5) Gravitiranje tog podzemnog tečenja u smjeru Jadranskog mora i njegovo fokusiranje kroz mrežu podzemnih kanala u jedinstveni tok rijeke Omble.
- 6) Povoljna pozicija matice tog toka u podzemnom zaleđu izvora Omble, s obzirom na tehničke mogućnosti vodozahvata pod hidrostatskim tlakom na mjestu prije poniranja matice toka na dubine od čak cca 150 m n.m.
- 7) Postojanje vodonepropusnih flišnih naslaga u bokovima izvora Omble čije bi spajanje (injektiranjem propusnih karbonata) u neposrednom zaleđu izvora stvorilo uvjete za nastanak podzemne retencije koji bi u načelu bili slični onima kakvi već postoje u hercegovačkom zaleđu (gdje dolomitska zapreka omogućuje nastanak prirodne retencije u podzemlju), uz mogućnost hidroenergetskog i vodoopskrbnog iskorištenja.

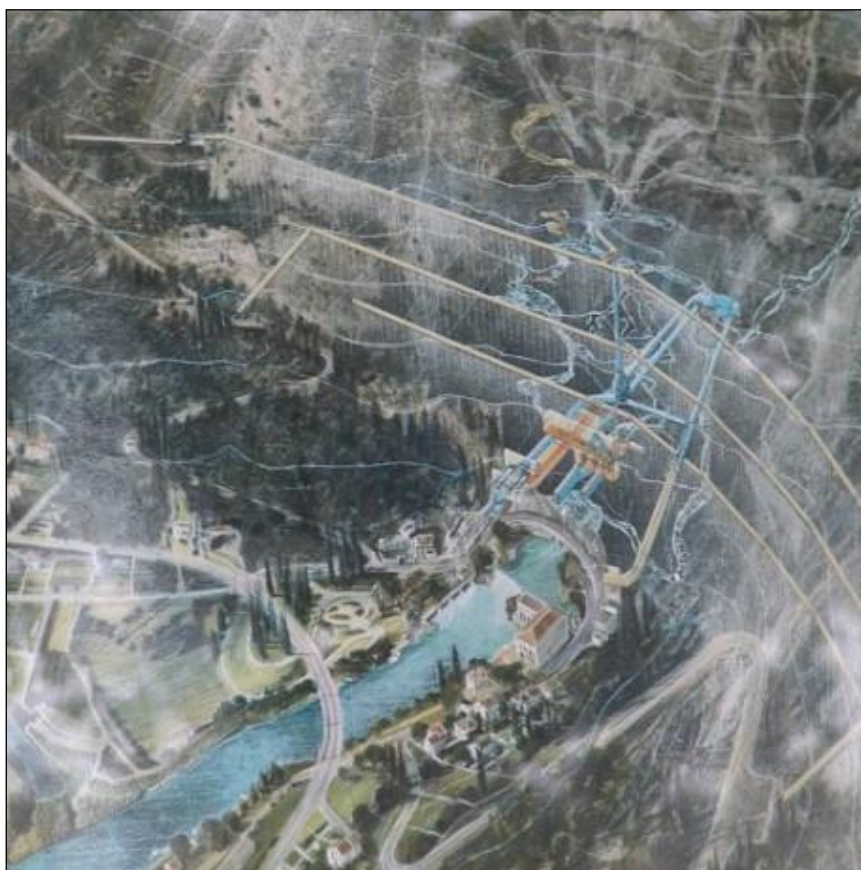


Slika 2.10. Tlocrtni (gore; preuzeto iz Jović 1997) i bokocrtni (dolje; preuzeto iz Elektroprojekt 2013) prikaz pražnjenja prirodnog podzemnog jezera u zaleđu izvora Omble.

Da su se u zaleđu izvora Omble (kroz milijune godina trajanja geotektonskih i hidroloških procesa te procesa okršavanja) stekli upravo takvi hidrogeološki preduvjeti, dokazano je tijekom višedesetljetnih opsežnih i predanih istraživačkih radova (vidi gore). Znanje koje je tim istraživanjima prikupljeno, zajedno s opisanim prirodnim hidrogeološkim uvjetima, čine vrlo vrijedan kapital hrvatskog društva koji se može staviti u funkciju višenamjenskog korištenja (proizvodnja energije, vodooskrba) izgradnjom HE Ombla.

Ideja o podzemnoj retenciji nastala je na temelju saznanja o poroznosti i propusnosti karbonatnog kompleksa naslaga. Ključno je pri tome da su te stijene u neposrednom tektonskom kontaktu s nepropusnim flišnim naslagama. Dakle, zamisao projekta temelji se na ideji da se izgradnjom injekcijske zavjese u zoni izvora Ombla stvori podzemna retencija. Injekcijska zavjesa bi se oslanjala na prirodnu stjenovitu (vapnenačko dolomitnu) potpornu zonu te konstrukcije kojima bi se zatvarali postojeći podzemni kanali izvora Omble i kaverne u ravnini injekcijske zavjese. Prirodnu branu u nizvodnom dijelu desnog boka podzemne retencije činila bi prirodna flišna barijera čija visina i širina raste od izvorskog područja rijeke prema sjeverozapadu, dok bi prirodnu branu u nizvodnom dijelu lijevog boka retencije činila također prirodna flišna barijera čija visina i širina raste od izvorskog područja Omble prema jugoistoku. Injekcijska zavjesa u izvorišnoj zoni Omble bila bi oslonjena i vezana na svojim bokovima na prirodne flišne formacije. Na taj način ove tri cjeline činile bi jedinstvenu podzemnu pregradu koja bi omogućila nastanak podzemne retencije.

To bi se realiziralo izvedbom injekcijske zavjese površine 300 000 m² iz tri injekcijske galerije na kotama 5, 60, 134 m n.m. ukupne dužine oko 3 500 m (Slika 2.11.). Osi galerija bile bi međusobno tlocrtno izmaknute 6 m, tako da je najviša galerija najuzvodnija. Povezivanje zavjesa na razini srednje i donje galerije osiguralo bi se izvođenjem injekcijskih bušotina u obliku rozete, s preklopom vertikalnih bušotina iz gornjih galerija. Injekcijska zavjesa bila bi podijeljena na tri cjeline. Dvije cjeline nalazile bi se u masivu iznad razine mora, dok bi treća cjelina bila smještena ispod razine mora. *Gornja zavjesa* prostirala bi se između kota 138,70 m n.m. i 56,50 m n.m. i izvela bi se iz galerije br.3. i djelomično s terena. *Srednja zavjesa* protezala bi se od kote 66,50 m n.m. do kote - 4,5 m n.m. i izvela bi se iz galerije br.2. *Donja zavjesa* protezala bi se od kote 9,0 m n.m. do kote -200,00 m n.m. i izvodila bi se iz galerije br. 1.



Slika 2.11. Prostorni prikaz položaja injekcijske zavjese i osnovnih elemenata HE Ombla (izradila Branka Kaminski).

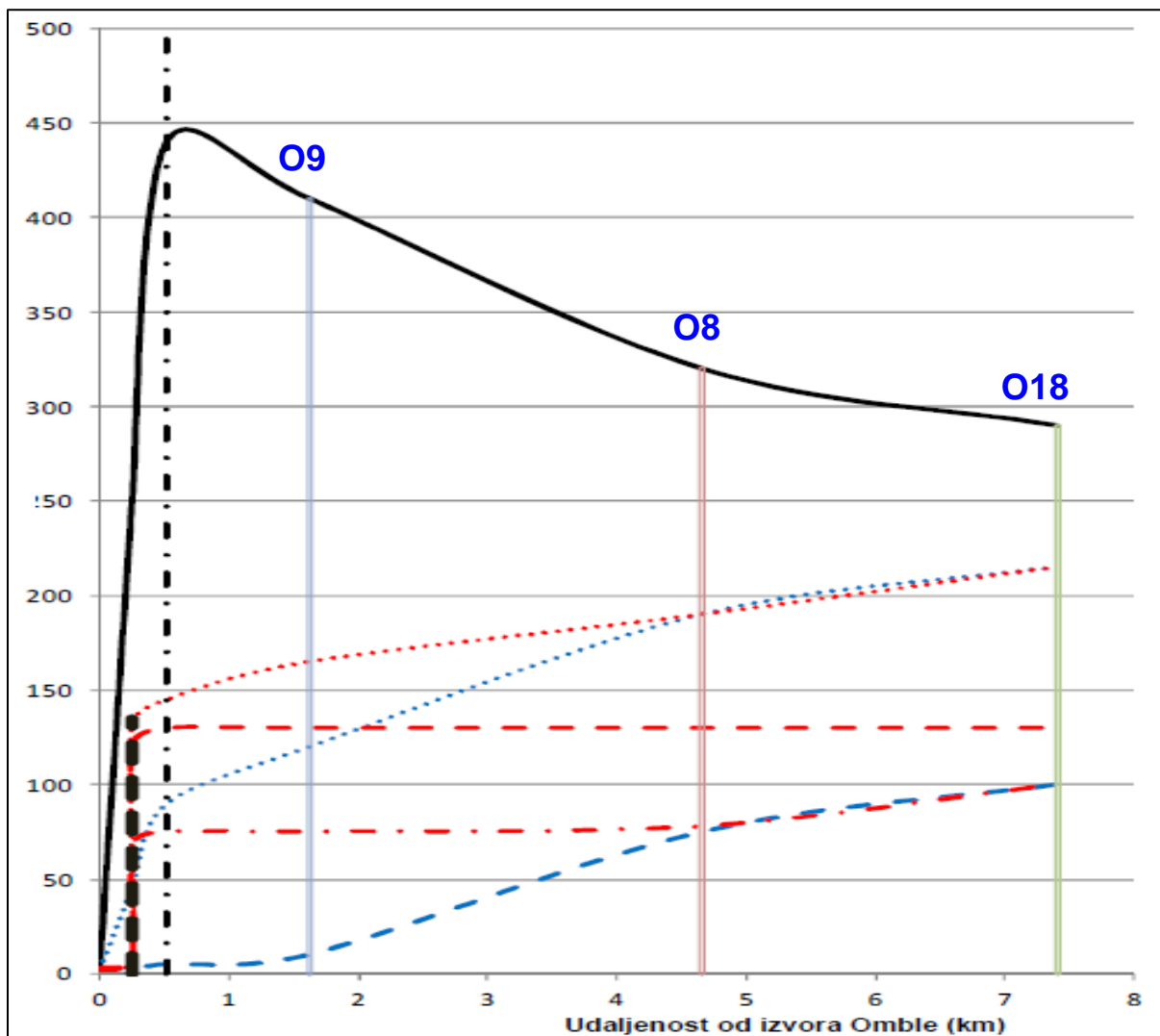
Izvedba injekcijske zavjese rezultirala bi u zoni glavnog i više sporednih drenažnih kanala koji su smješteni nizvodno od dolomitske zapreke izdizanjem razine vode iznad današnjih razina prirodnog stanja, čime bi drenažna zona bila pretvorena u dio jedinstvene podzemne retencije te bi se osigurao potrebni tlak za energetska korištenje.

U najvećem dijelu godine u retenciji bi se održavala kota uspora od 130 m n.m., a tijekom sušnih razdoblja, u uvjetima smanjenja protoka do minimalnih $Q = 4 \text{ m}^3/\text{s}$, maksimalna kota uspora bi se postupno obarala do minimalne razine od oko 75 m n.m.

Izdizanjem razine vode na kotu 130 m n.m. doći će do bitnog smanjenja maksimalnog protoka i produljenja trajanja istjecanja. Pri tome će doći i do izdizanja razine vode duž glavnog kanalskog sustava.

Načinjen je model rada HE Ombla (Jović 1999.) na temelju 13 - godišnjih podataka o oborinama i protoku. Rezultat modela pokazao je da razina vode ostaje na 130 m n.m. iza injekcijske zavjese, a pada ispod te razine samo 30 do 80 dana u svakoj od godina modela. Najniža razina vode prema modelu iznosi 75 m n.m., a za polovicu godina iz modela minimalna razina viša je od 100 m n.m. Na temelju gornjeg modela i zapaženih razina u bušotinama, Slika 2.12. pokazuje indikativne razine vode iza izvora Omble prije i poslije gradnje HE Ombla, izvedene iz razina podzemne vode u piezometrima

O9, O8 i O18 za „prirodno“ stanje i uz pretpostavku izvedbe injekcijske zavjese za HE Ombla dobivene matematičkim modeliranjem.



Slika 2.12. Razine podzemne vode u zaleđu Omble prije i nakon izvedbe injekcijske zavjese (preuzeto iz elaborata: Plan upravljanja bioraznolikošću, Clegg M, Palmer T. i Beaton S. 2013).

— razina terena; - - - injekcijska zavjesa; — • — • — državna granica; — — — normalne vode - postojeće stanje; ● ● ● ● ● visoke vode – postojeće stanje; - ● - ● - niske vode - nakon izgradnje injekcijske zavjese; - - - normalne vode - nakon izgradnje injekcijske zavjese; ● ● ● ● ● razine visoke vode - nakon izgradnje injekcijske zavjese

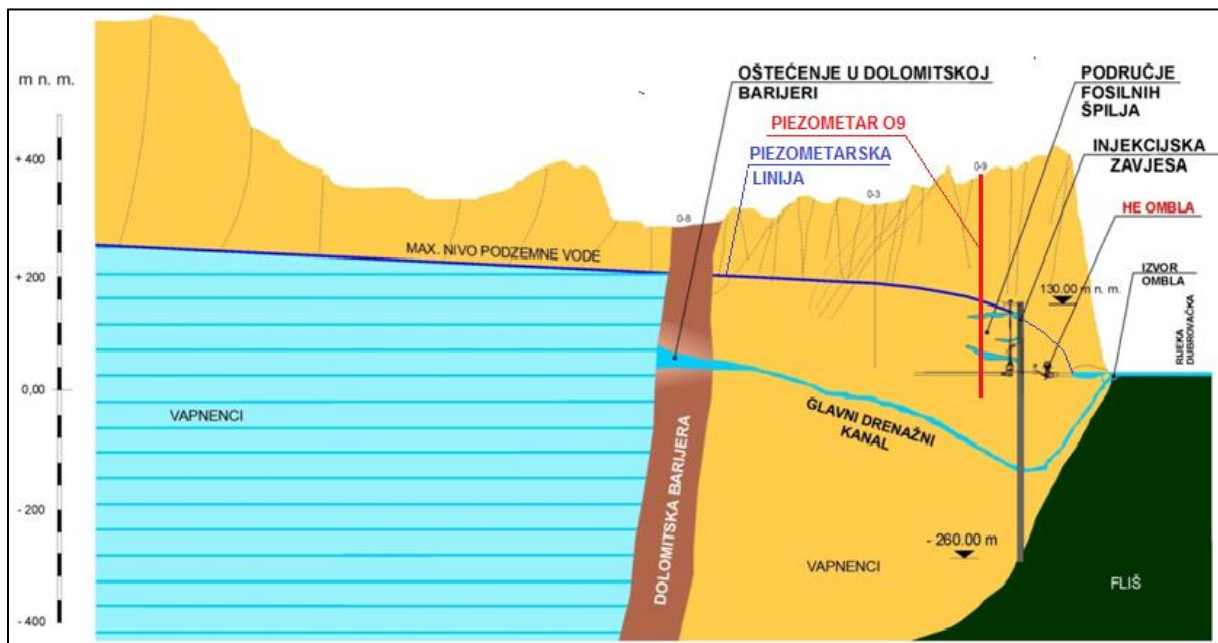
Razine za postojeće stanje temelje se na zabilježenim razinama vode u svakom od piezometara, pri čemu je normalna razina ona koja je tipična za najveći dio godine, a razine visokih voda one koje su zabilježene kao najviše. Za razine vode nakon gradnje HE, kao niske odnosno visoke vode uzete su

razine dobivene matematičkim modelom, a kao normalna voda uzeta je razina od 130 m n.m. tj. visina injekcijske zavjese.

Promjene u razinama vode prouzročene izvedbom injekcijske zavjese utjecat će na razine vode i protoke u sustavu Vilina špilja – izvor Omble. Pri tome se protoci na izvoru Omble neće promijeniti, jer će i dalje u cijelosti zavisiti o dinamici prihranjivanja podzemlja u slivu Omble iz oborine (vidi gore). Protoci unutar špiljskog sustava ovisit će o hidrotehničkim komponentama zahvata izgrađenog u podzemlju, kao i režimu njezinog rada s kojim će upravljati čovjek, s ciljem optimizacije korištenja u svrhu stabilne vodoopskrbe i proizvodnje energije. Na ovom mjestu posebno je važno istaknuti kako će se u opisanim uvjetima u spomenute svrhe koristiti samo dio ukupnog dotoka u zaleđe izvora Ombla (dakle, potpuno suprotno od laičkih interpretacija o „potpunoj kanaliziranosti“ prirodnog podzemnog toka), dok će sav ostatak dotoka biti i dalje podložan prirodnim procesima tečenja kroz poroznu sredinu okršenih vapnenaca.

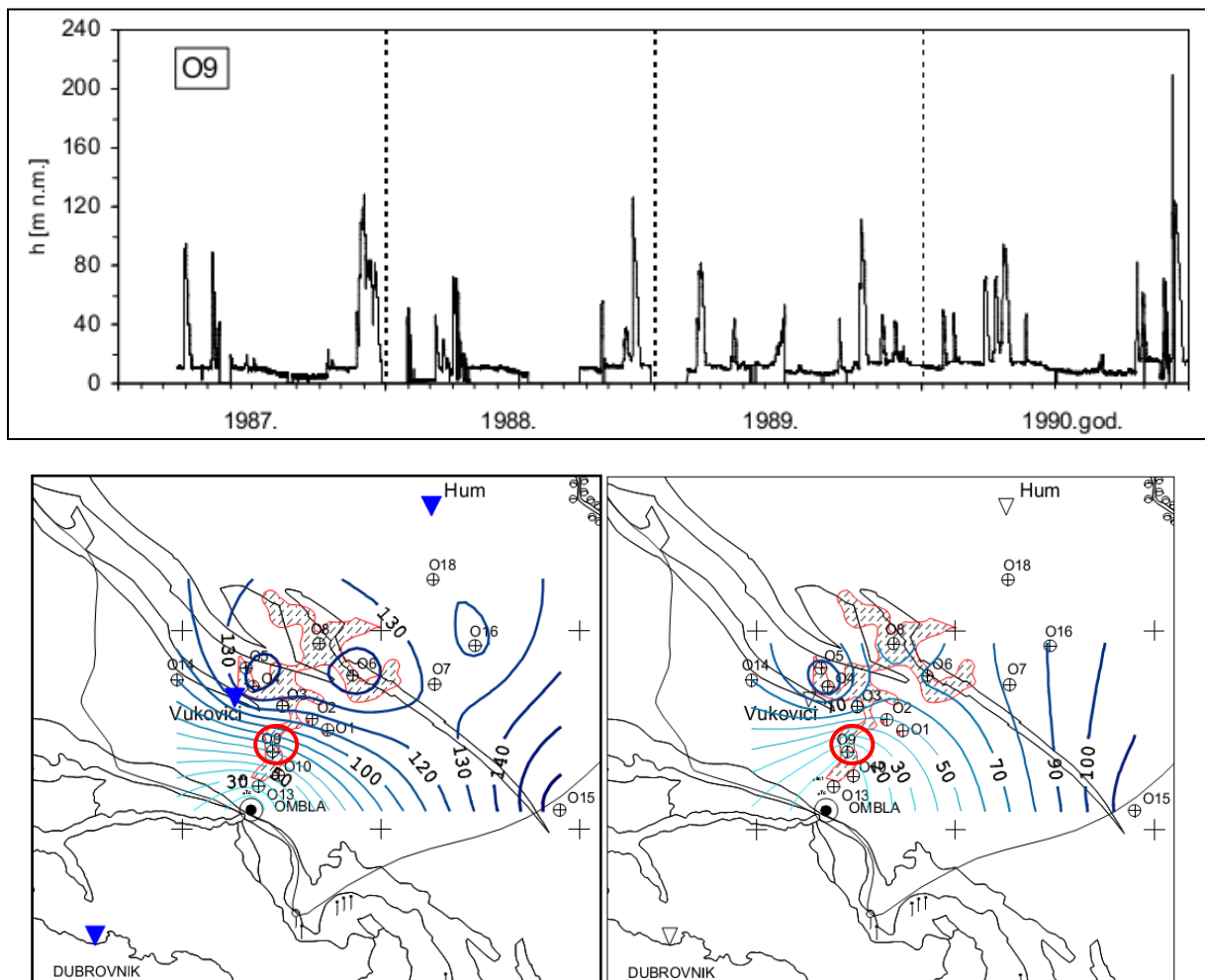
U skladu s time, najznačajnija promjena u hidrogeološkim uvjetima nakon izvedbe injekcijske zavjese dogodit će se u režimu plavljenja pojedinih dijelova špiljskog sustava. Ova je činjenica važna s obzirom na ocjenu prihvatljivosti zahvata na ekološku mrežu, posebno u dijelu koji se tiče podzemnih staništa. Stoga je tu problematiku potrebno na ovom mjestu detaljnije obrazložiti.

U prirodnim uvjetima, kada je protok iz prirodne podzemne retencije u hercegovačkom zaleđu kroz oštećenje u dolomitnoj barijeri (vidi Sliku 2.13.) i podzemnu mrežu kanala prema izvoru Omble veći nego što taj izvor može propustiti, južno od dolomitne barijere (odnosno između nje i izvora) voda se podiže u podzemlju pod hidrostatskim tlakom kroz postojeće pore i šupljine u okršenim vapnencima. Pri tome se visina zone u kojoj se podzemlje tako saturira vodom postupno smanjuje od kote razine u prirodnoj retenciji, do kote izvora Omble (piezometarska linija na Slici 2.13.). Ti vodostaji u poroznoj se sredini mjere na piezometrima kakvih je tijekom višegodišnjih istraživanja u slivu Omble bilo više (vidi gore), a za problematiku ekoloških uvjeta podzemnih staništa u zaleđu izvora Omble osobito je reprezentativan piezometar O9 (vidi Sliku 2.13.), koji se nalazi približno iznad lokacije budućeg vodozahvata.



Slika 2.13. Shematski presjek kroz dio sliva Omble s označenim piezometrom O9 koji je reprezentativan za problematiku stanišnih uvjeta u podzemnom zaleđu izvora Omble (modificirano prema Elektroprojekt 2013.).

Na tom su piezometru tijekom razdoblja 1987. – 1990. mjerene satne vrijednosti vodostaja (Slika 2.14. - gore), iz kojih su razvidne iznimno velike oscilacije razina u podzemlju (čak do 200 m n.m.) za koje je istraživanjima dokazano da su izravno uvjetovane dinamikom oborine u slivu Omble.

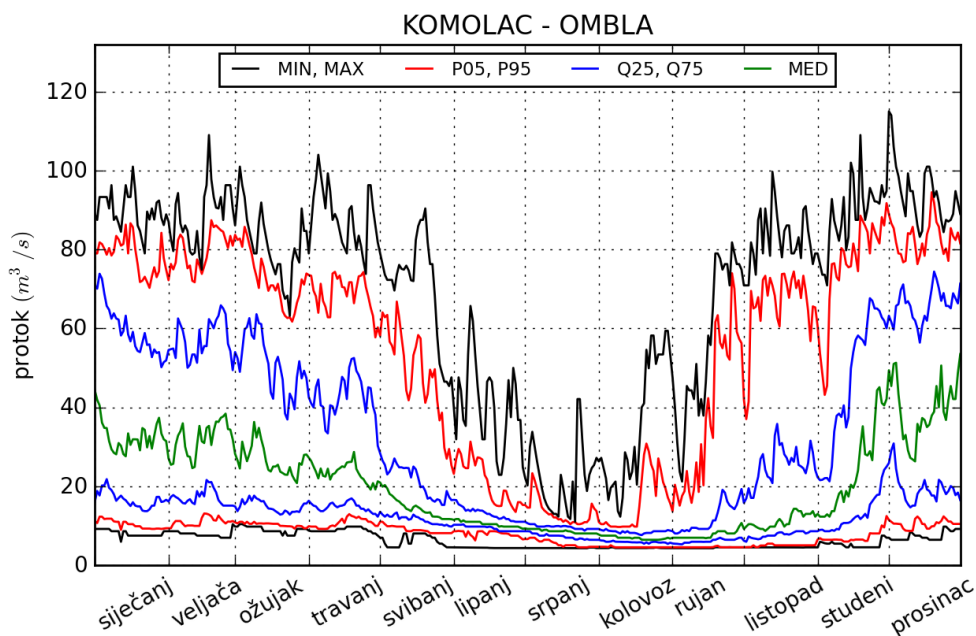


Slika 2.14. Gore - dinamika vodostaja na piezometru O9 tijekom razdoblja 1987. – 1990. Dolje – strujna slika (hidroizohipse u m n.m.) za velike vode (5% trajanja; lijevo) i male vode (95% trajanja; desno) (preuzeto iz Jović, 1997.). Crveni krug označava lokaciju piezometra O9.

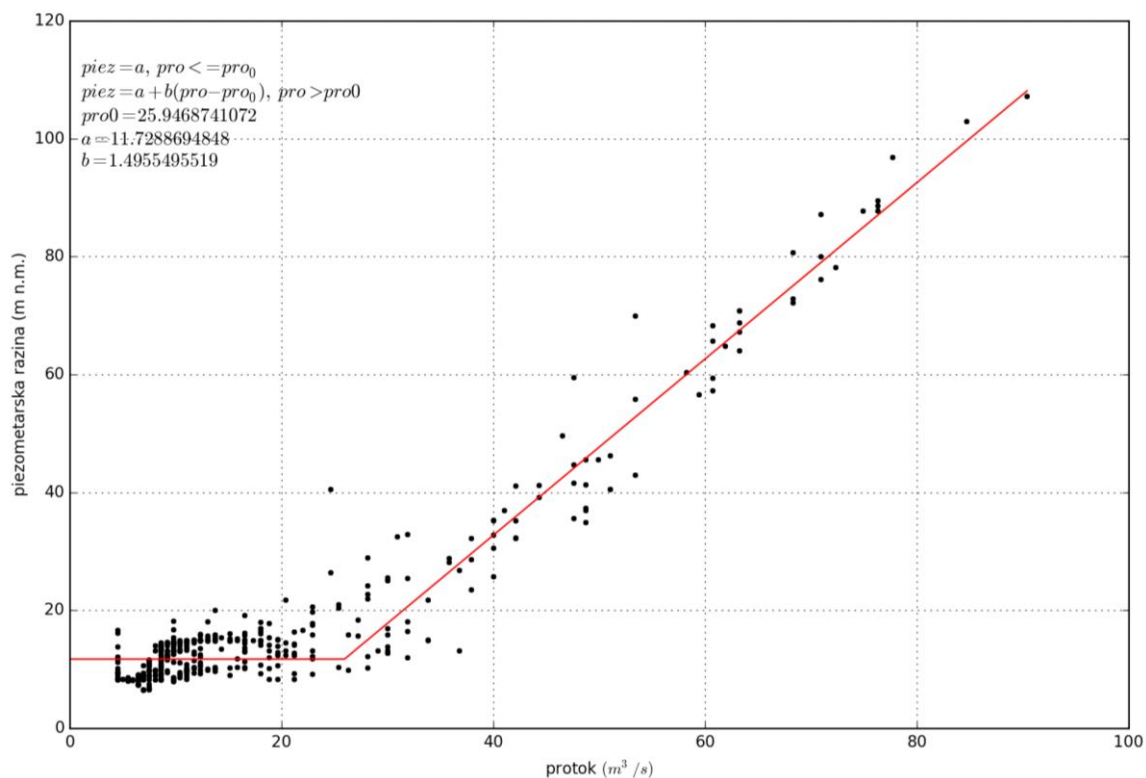
Prostorna varijabilnost razina vode (strujna slika koja je posljedica istjecanja na izvoru) u podzemlju za velikih i malih voda prikazana je na Slici 2.14 – dolje (usporedi i Sliku 2.12). Generalno govoreći, razine izmjerene na piezometarskim bušotinama u ovom prostoru, kako za vrijeme velikih tako i za malih voda, uvijek padaju od bokova prema glavnom drenažnom špiljskom kanalu, u zoni kojega je piezometar O9 koji je ujedno i najbliži točki istjecanja na izvoru Omble, u smjeru kojega u današnjim uvjetima otječe sva voda iz sliva.

Protok na izvoru Omble također je vrlo varijabilan (Slika 2.15.): s jedne strane u većini promatranih godina tijekom ljetnog razdoblja on ne prelazi $10 \text{ m}^3/\text{s}$, dok s druge strane tijekom zimskog i proljetnog razdoblja redovno dostiže i višestruko veće vrijednosti.

Istraživanja su pokazala da su vodostaj na piezometru O9 i protok na izvoru Omble (koji su oboje u funkciji dinamike oborine u slivu) u visokoj korelaciji (uz 94 % varijabilnosti vodostaja na piezometru objašnjenog varijabilnošću protoka), što je grafički prikazano na Slici 2.16.



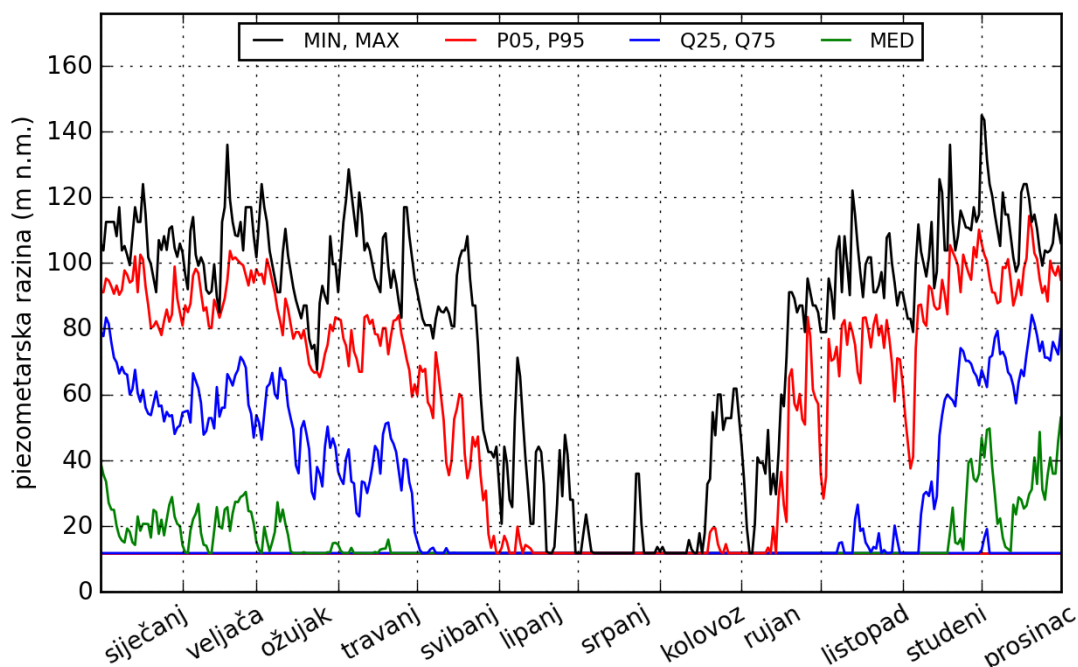
Slika 2.15. Statistika srednjih dnevnih protoka na izvoru Omble za razdoblje od 1968. do 2012. godine.



Slika 2.16. Zavisnost vodostaja na piezometru O9 od protoka na izvoru Omble (razlomljeno linearno izjednačenje podataka s intervala 1989. – 1990.).

Sukladno tome, koristeći jednadžbe regresijskih pravaca prikazanih na Slici 2.16., za zadani se protok na izvoru Omble može procijeniti korespondentni vodostaj u podzemlju za prirodno stanje (prije

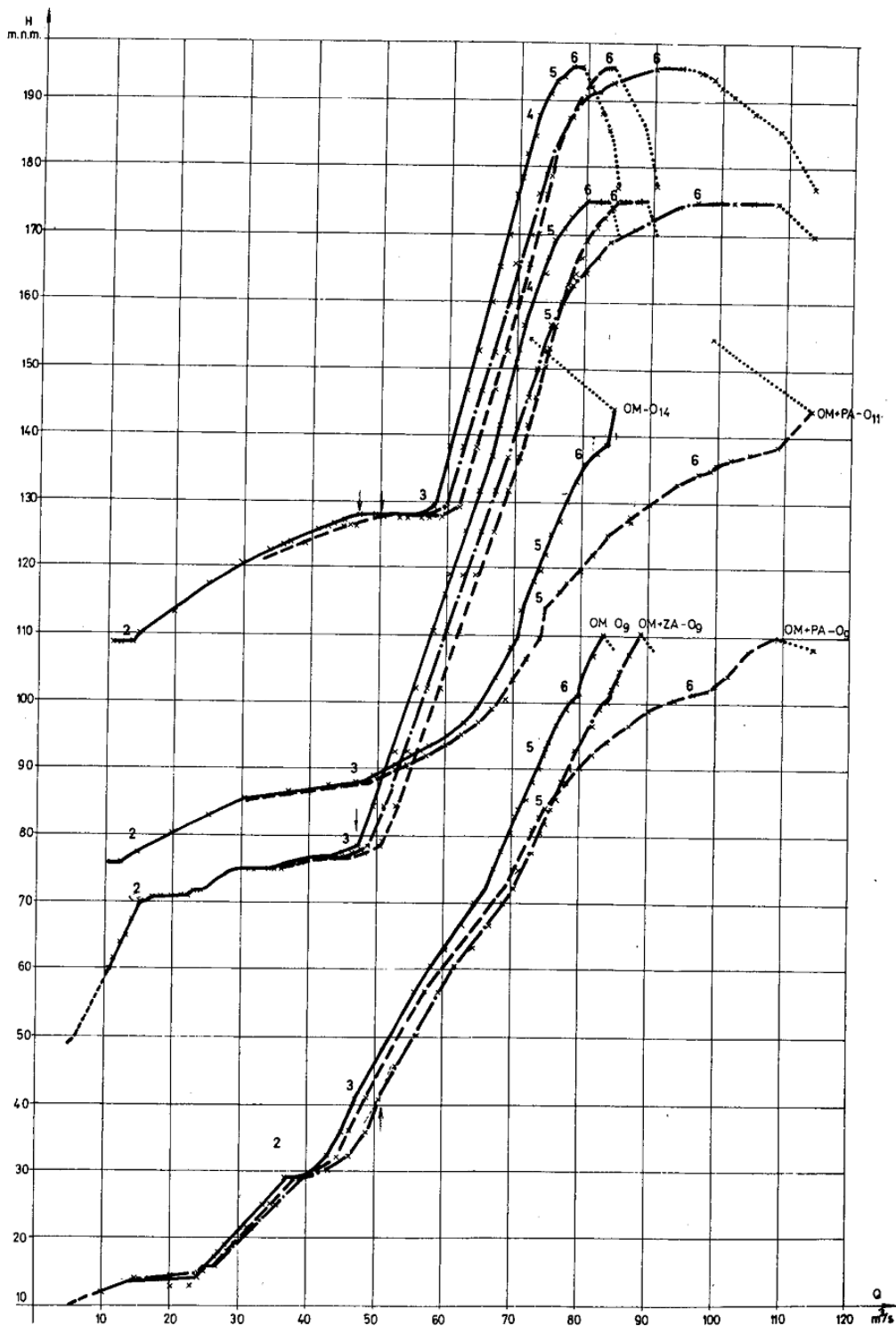
izgradnje HE Ombla). Kada se to učini za cijelo razdoblje za koje postoje mjerenja protoka na izvoru Omble (1968.-2012.) dobije se procjena dinamike vodostaja na piezometru O9 za isto razdoblje.



Slika 2.17. Statistika srednjih dnevnih vodostaja na piezometru O9 za razdoblje od 1968. do 2012., procijenjenih iz protoka na izvoru Omble (usporedi Slike 2.15. i 2.16.).

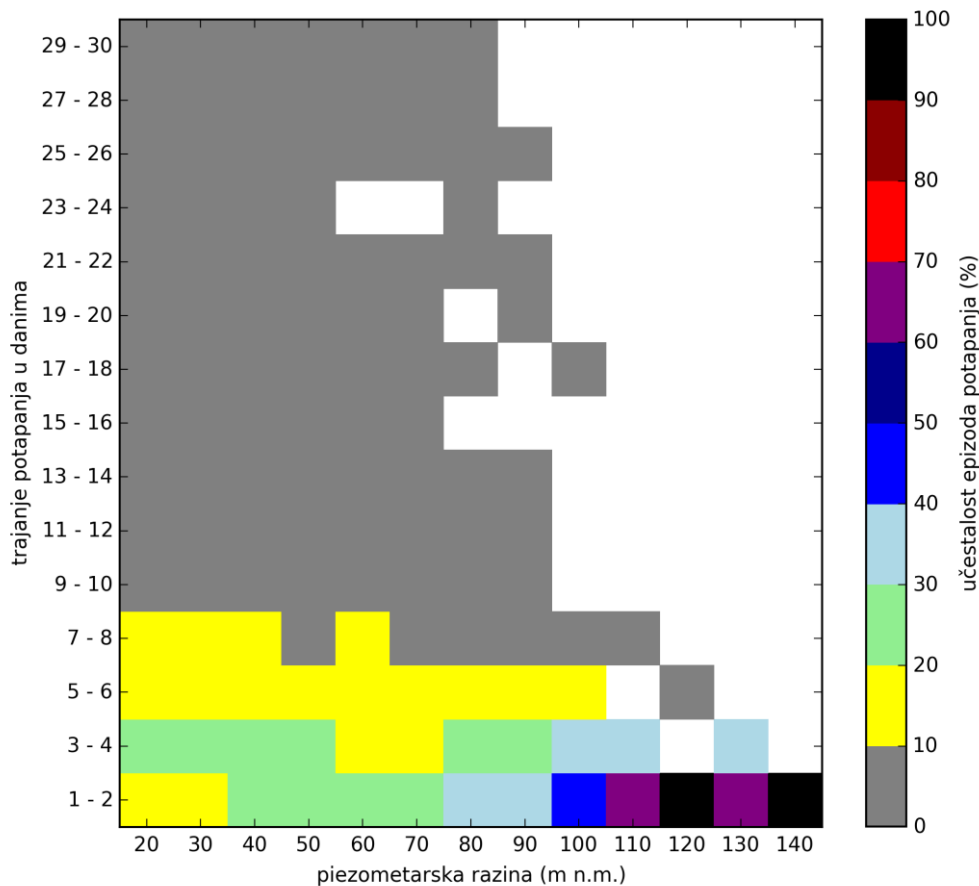
Kao što se može uočiti na Slici 2.14. - dolje, vodostaji u podzemlju, osim vremenske imaju izraženu i prostornu varijabilnost, koja je posljedica tečenja kroz podzemlje. Stoga su, strogo uzevši, vodostaji s piezometra O9 reprezentativni samo za tu lokaciju. Dodatno, oblik funkcije zavisnosti vodostaja na nekoj lokaciji (piezometra) u podzemlju od protoka na izvoru nije konstantan, nego se mijenja zavisno poroznosti prostora kojega voda puni. I prvo (prostorna varijabilnost) i drugo (utjecaj poroznosti) prikazano je grafički na Slici 2.18, kao izravna zavisnost (bez izjednačenja) razine od protoka, izvedena iz mjerenja razina na nekoliko piezometara u širem području izvora Omble tijekom jednog od većih vodnih valova (listopad, 1989.).

Na Slici 2.18. može se uočiti kako je razina na O9 (najniži graf) uvijek znatno niža od razina u piezometrima koji su uzvodno ili bočno od njega, što je posljedica činjenice da je piezometar O9 u zoni istjecanja najbliži izvoru Omble. Nadalje, može se uočiti kako svaki lom na grafovima (situacija kada protok znatnije raste, a piezometarska razina se vrlo sporo povećava) pokazuje da voda puni špiljski prostor (kao područje teoretski najveće poroznosti). Kada se špilja sasvim napuni, podizanje razine vode u podzemlju ubrzava se s povećanjem protoka, jer se smanjuje poroznost. Stoga se na ovakvom grafu lijepo vide veličine i visinski položaj kaverni na širem području. Također se mogu uočiti i maksimalne zabilježene kote u jednom od većih vodnih valova, gdje je na Ombli zabilježeno gotovo $90 \text{ m}^3/\text{s}$, što je odgovaralo razini na O9 od 110 m n.m., a bočno od njega na O14 145 m n.m.



Slika 2.18. Izravna zavisnost (vrijednosti mjerenja precrtane na papir) razine vode u podzemlju na više piezometara lociranih u širem području od protoka na izvoru Omble tijekom jednog od većih vodnih valova (listopad, 1989.). Najniži graf odnosi se na piezometar O9 koji je najbliži izvoru, slijede grafovi koji se odnose na piezometre bočno od O9, dok se najviši grafovi odnose na uzvodne piezometre (preuzeto iz Paviša 1993.).

Ako se za potrebe ilustracije prirodnih stanišnih uvjeta u podzemlju (što je važno za ocjenu prihvatljivosti zahvata na ekološku mrežu) dodatno obrade podaci (prikazani na Slici 2.17.) o razinama na O9 (kao najreprezentativnijem od svih postojećih piezometara za sustav Vilina špilja – izvor Omble) na način da se tijekom cijelog vremenskog niza 1968. - 2012. za svaku visinsku klasu prate konkretne epizode potapanja i bilježi njihovo trajanje, dobiju se rezultati prikazani na Slici 2.19. Statistika godišnjih ukupnih trajanja potapanja prikazana je na Slici 2.20.



Slika 2.19. Učestalost epizoda potapanja podzemnog prostora različitog trajanja za pojedine visinske klase na piezometru O9. Niže visine (odnosno piezometarske razine) od najniže koja je prikazana na osi-x su stalno potopljene (osim kratkotrajno tijekom ljetnog razdoblja).

Na Slici 2.19. mogu se uočiti sljedeće činjenice (važne za razumijevanje prirodnih stanišnih prilika u podzemlju):

1. Na nadmorskim visinama iznad 120 m potapanje nikada ne traje duže od 1 do 2 dana, što znači da je potapanje u gornjoj etaži Viline špilje (koje je i kao događaj vrlo rijetko – vidi dalje u tekstu i Sliku 2.20) uvijek vrlo kratkotrajno.
2. Na nadmorskim visinama iznad 80 m, a ispod 120 m (zona spoja između srednje i gornje etaže Viline špilje) potapanje također najčešće traje 1 – 2 dana, ali su relativno česte epizode kada

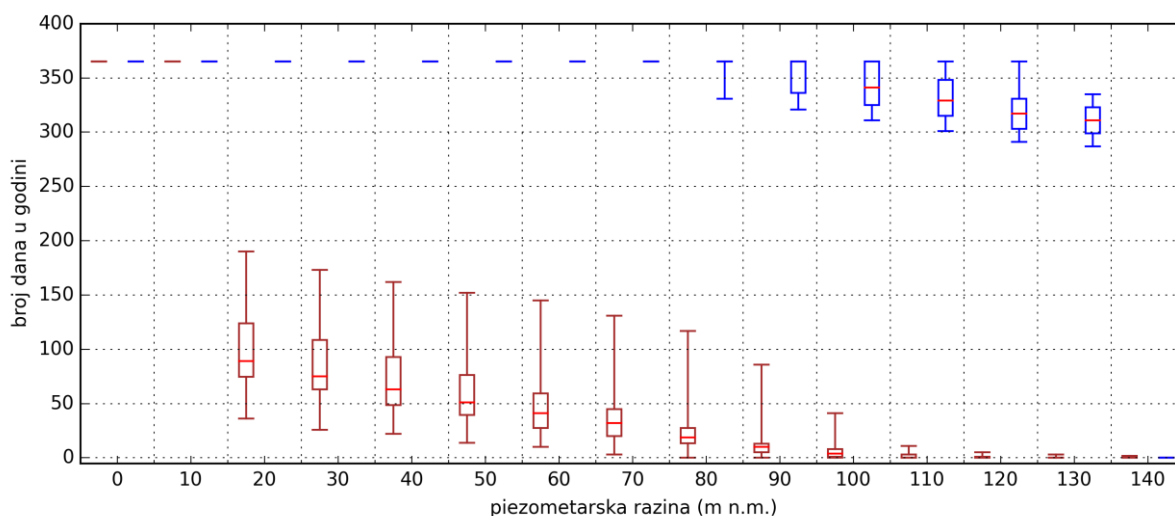
ono traje i tjedan dana, a može se (na nižim nadmorskim visinama) protegnuti i do dva tjedna neprekidnog trajanja.

3. Na nadmorskim visinama od 40 - 80 m (srednja etaža Viline špilje) približno polovina epizoda potapanja traje duže od tjedan dana, brojne su epizode potapanja koje traju 2 – 3 tjedna, a trajanje potapanja se može protegnuti i do mjesec dana neprekidnog trajanja.
4. Gore iznesenom se može dodati da je donja etaža Viline špilje u području piezometra O9 većinom u prirodnom stanju u cijelosti potopljena tijekom godine, uz kratkotrajna suha razdoblja tijekom ljetnog razdoblja (nije uočljivo na na Slici 2.19., ali jest usporedbom Slika 2.15., 2.16. i 2.17.).

U uvjetima nakon izgradnje injekcijske zavjese gore opisana prostorna i vremenska varijabilnost razina vode u podzemlju u odnosu na prirodno stanje (prikazano na Slici 2.14.– dolje i Slici 2.18.) bitno će se smanjiti, jer će nastati nova retencija nizvodno od dolomitske zapreke, koja će biti povezana s onom koja već postoji u području uzvodno od zapreke (Slika 2.10.). Stoga će podzemni prostori nizvodno od dolomitske zapreke i bočno od glavnog špiljskog kanala postati dio jedinstvene podzemne retencije s onom kakva danas već postoji uzvodno. To će, u usporedbi s prirodnim stanjem, bitno smanjiti brzine tečenja u bočnim kanalima, dok će u glavnom špiljskom kanalu te brzine ostati nepromijenjene. Time će sav podzemni prostor bočno od glavnog špiljskog kanala u ekološkom smislu postati vrlo sličan onome iz postojeće prirodne podzemne retencije u Hercegovini. Ova činjenica ima značajne reperkusije na skupne i prekogranične utjecaje HE Ombla na sastavnice prirodne bioraznolikosti.

Kada se na kraju posljednjeg vodnog vala prije ljetnog sušnog razdoblja razina podzemne vode izjednači na velikom prostoru uzvodno i nizvodno od dolomitske zapreke i ostane na koti 130 m n.m. u uvjetima izgrađene injekcijske zavjese, zbog nedovoljnog bi gradijenta postupno dolazilo do smanjenja minimalnih vrijednosti protoka Omble. Kako bi se to spriječilo i da bi na Ombli uvijek tekla minimalna količina propisana vodoprivrednom suglasnošću potrebno je (da bi se stvorili potrebni gradijenti) postupno smanjivati razinu vode u podzemnoj retenciji do one razine koja će omogućiti istjecanje propisanog protoka. Zbog toga će tijekom ljetnog razdoblja razina vode u retenciji uvijek biti niža od maksimalne (130 m), a najniža na koti 75 m n.m.

Usporedba ukupnog godišnjeg trajanja potapanja (sve epizode potapanja tijekom godine) u različitim visinskim klasama na lokaciji piezometra O9 prije i poslije izgradnje prikazana je na Slici 2.20. Stanje prije izgradnje dobiveno je statističkom obradom podataka sa Slike 2.17., dok je stanje nakon izgradnje izvedeno iz projektne dokumentacije za HE Ombla koja uvažava gore iznesenu potrebu za stvaranjem gradijenta tlaka tijekom ljetnog razdoblja.



Slika 2.20. Statistika ukupnog godišnjeg trajanja potapanja (sve epizode potapanja tijekom konkretne godine kroz razdoblje 1968. – 2012.) u različitim visinskim klasama za stanje prije (lokacija O9) i poslije izgradnje HE Ombla (uzvodno od injekcijske zavjese). Crvena linija – medijana, pravokutnik – interkvartilni opseg vrijednosti, dužina – opseg vrijednosti (raspon minimalnih i maksimalnih zabilježenih vrijednosti).

Na Slici 2.20. mogu se uočiti sljedeće činjenice (važne za razumijevanje stanišnih prilika u podzemlju prije i poslije izgradnje HE Ombla):

1. Trajanje potapanja tijekom godine u području gornje etaže Viline špilje neće se promijeniti nakon izgradnje HE Ombla u cjelokupnom njezinom dijelu koji je na nadmorskim visinama većim od 130 m, kao i u dijelu neposredno uz injekcijsku zavjesu koji će zbog implementacije posebnih mjera trajno biti izvan zone potapanja (iako je na nadmorskim visinama nešto nižim od 130 m). Jedini dio u gornjoj etaži koji će biti potopljen veći dio godine (izvan ljetnog razdoblja) bit će njezin stražnji dio niži od 130 m.
2. Na nadmorskim visinama iznad 80 m, a ispod 120 m (zona spoja između srednje i gornje etaže Viline špilje), ukupno trajanje potapanja će nakon izgradnje postati znatno duže nego u prirodnom stanju, izostat će nagle izmjene (karakteristične za prirodno stanje) epizoda kratkotrajnijih potapanja (usporedi Sliku 2.19.) i više dužih međuepizoda suhog stanja (tijekom iste godine), a pojavit će se samo jedan vremenski interval sa suhim stanjem kontinuiranog trajanja karakterističnog za ljetno razdoblje.
3. Sve nadmorske visine ispod 80 m, za koje je u prirodnom stanju bila karakteristična stalna izmjena epizoda potapanja dužeg trajanja i kraćih međuepizoda suhog stanja tijekom godine, nakon izgradnje bit će trajno potopljene.

Ove su činjenice vrlo važne za procjenu utjecaja izgradnje HE Ombla na podzemna staništa u zaleđu izvora Omble, posebno u dijelu koji se tiče narušavanja staništa koji za terestričke organizme nastaje zbog periodičnog potapanja podzemnog prostora.

Važno je istaknuti kako se rezultati sa Slika 2.17., 2.19. i 2.20. mogu izravno primijeniti samo na lokaciju piezometra O9. S obzirom da je na lokaciji izvora piezometarska razina po definiciji jednaka nuli (zbog izlaska iz podzemlja na površinu), piezometarske razine između O9 i izvora postupno se smanjuju. Krivulja koja opisuje to smanjivanje (piezometarska linija; usporedi Sliku 2.13.), a koja je važna za problematiku periodičnog potapanja podzemnih staništa u podzemnom sustavu Vilina špilja – izvor Omble, ne može se točno odrediti zbog nedostatka podataka. Stoga smo je za potrebe procjene utjecaja na podzemna staništa aproksimirali pomoću jednadžbe

$$H_x = a X^b$$

gdje je H_x piezometarska razina na ciljanoj lokaciji, a empirijski parametar koji (kao varijabla zavisna o razini na O9) definira odnos piezometarske razine na ciljanoj lokaciji s aktualnom piezometarskom razinom na O9, X je horizontalna udaljenost ciljane lokacije do izvora Omble, dok je b empirijski parametar koji (kao konstanta) definira oblik krivulje i koji je određen proizvoljno pomoću iskustvenih kvalitativnih informacija o razini vode u podzemlju, uključujući: a) podatak da se izvorska špilja periodično (za velikih voda) potpuno potapa, b) razine blata zabilježene u špiljama kao indikator čestog i dugotrajnijeg potapanja koje omogućava sedimentaciju i c) podatak da se Vilina špilja nikada ne potapa. Rezultat takvog aproksimativnog postupka prikazan je u Prilogu 6.1 ove knjige.

Izgradnjom injekcijske zavjese te nastankom podzemne retencije doći će do podizanja potencijala vode u zaleđu izvorišta Omble na razinu od 130 m n. m., što će za okolne izvore (Palata, Slavjan, Zavrelje) imati pozitivne efekte. Izvorište Palata koje se koristi za vodoopskrbu Elafitskih otoka imat će dovoljno vode za podmirenje rastućih potreba, naročito tijekom ljetnih mjeseci. Izvorište Slavjan koje je od davnina zahvaćeno za vodoopskrbu starog Dubrovnika, a danas se njegova voda koristi u Onofrijevim česnama na Stradunu imat će ustaljenije protoke, a izvorište Zavrelje možda će postati stalno. Sva ta izvorišta imaju uređene vodotokove do mora koji su u funkciji tijekom kišnog razdoblja godine kada se njihova izdašnost višestruko poveća. Maksimalna izdašnost spomenutih izvorišta će ostati kao i danas, jer kanalski provodnici voda u njihovim zaleđima nisu u stanju propustiti veće količine.

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

U okviru projekta Ombla predviđen je zahvat za opskrbu vodom Dubrovnika na dva mjesta - u prirodnoj špilji oko 500 m u podzemlju gdje se nalazi i zahvat za elektranu, kapaciteta 560 l/s i u vertikalnom oknu na koti 55,0 m n. m., kapaciteta 1 500 l/s. Time će se postići poboljšanje vodoopskrbe Dubrovnika. Naime, zbog izdizanja razine vode neće biti potrebna upotreba crpki, a još je važnije da će se eliminirati današnji problemi vezani za povećanu mutnoću i pojavu povremenog onečišćenja vode.

Dokazano je da zamućenja vode Omble nema ako kiša padne na prostor uzvodno od dolomitske zapreke, iako se količina na izvoru poveća i preko 70 m³/s (Milanović 1977.god.). Kada se izgradi

injekcijska zavjesa i kada se u prostoru nizvodno od dolomitske zapreke stvore isti uvjeti tečenja kao i u uzvodnom dijelu, tada nestaju uvjeti za zamućenje vode za piće. Zamućenja tada može biti samo u najnižim bočnim i glavnom špiljskom kanalu, gdje se brzine tečenja zbog mjesta zahvata za hidroelektranu neće smanjivati, ali ne i u onim koji su smješteni na višim kotama, zbog čega se projektom predviđa izdizanje vodozahvata u špilju srednje etaže koja se trajno potapa.

Potencijalni utjecaj nastanka podzemne retencije na termičke uvjete u sustavu Vilina špilja – izvor Omble

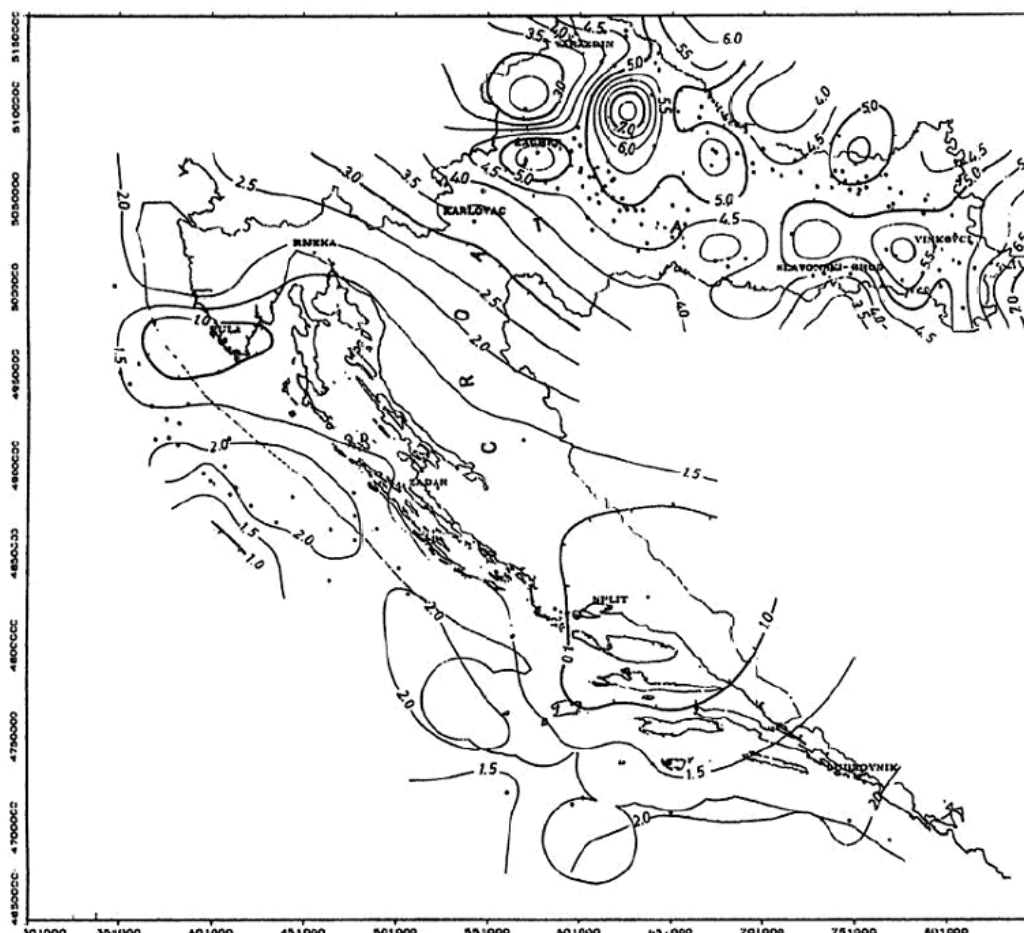
Nastanak podzemne retencije potencijalno bi mogao promijeniti termičke uvjete u podzemlju. Da bi se procijenili razmjeri tih promjena (što je bitno za ocjenu prihvatljivosti zahvata za ciljeve očuvanja ekološke mreže, prvenstveno za faunu šišmiša), prvo je potrebno objasniti termičke uvjete u prirodnom stanju.

Općenito govoreći, temperatura zraka u podzemlju može biti uvjetovana:

- 1) geotermalnim gradijentom, odnosno povećanjem temperature stjenske mase s dubinom zbog kontinuiranog zagrijavanja Zemljine kore kondukcijom topline iz Zemljine jezgre (čija se temperatura u središtu planeta prema najnovijim istraživanjima procjenjuje na oko 6000°C i predstavlja stalni izvor topline) koji dominantno zavisi o toplinskoj vodljivosti stjenske mase i njezinoj poroznosti,
- 2) zagrijavanjem stjenske mase Sunčevom energijom na površini Zemlje (i kondukcijom tako akumulirane topline u dublje slojeve stijene), s dubinskim dosegom utjecaja koji također zavisi od toplinske vodljivosti i poroznosti stjenske mase, ali i o količinama dozračene Sunčeve energije (zavisnim od geografske širine, nadmorske visine, makroklimе i utjecaja reljefa) te o procesima u atmosferi (makroklimatski utjecaji),
- 3) strujanjem zraka u podzemlju, odnosno izjednačavanjem temperatura zraka u podzemlju s onima u prizemnom sloju atmosfere,
- 4) dotokom vode u podzemlje čija se temperatura razlikuje od temperature stjenske mase pa utječe na lokalno hlađenje ili zagrijavanje podzemlja u području dotoka.

Na području zahvata geotermalni gradijent iznosi približno 2°C / 100 m (Jelić, 1997; vidi Sliku 2.21.).

Nadalje, prema Kurevija i Vulin (2010), za lokaciju meteorološke postaje Dubrovnik (52 m n.m.) određena je dubina na kojoj temperatura stijene više nije utjecana dozračenom Sunčevom energijom i makroklimom (odnosno, godišnje variranje je manje od 0,1 °C). Ta dubina na meteorološkoj postaji Dubrovnik iznosi 12,3 m, a prosječna temperatura na toj dubini 17,4 °C. Iz toga (uz pretpostavljeni geotermalni gradijent od 2°C/100 m) proizlazi da bi temperatura stjenske mase (uvjetovane samo geotermalnim gradijentom) na razini mora (donja etaža špiljskog sustava Vilina špilja – izvor Omble) trebala biti oko 18,2°C, da bi se nadalje temperatura stjenske mase na nadmorskim visinama u intervalu 40 – 80 m n.m. (srednja etaža) trebala kretati u intervalu 17,4 – 16,6 °C, dok bi se temperatura stjenske mase na nadmorskim visinama u intervalu 120 – 150 m n.m. (gornja etaža) trebala kretati u intervalu 15,8 – 15,2 °C (sve uz variranje temperatura na istoj nadmorskoj visini tijekom godine za manje od 0,1°C).



Slika 2.21. Karta geotermalnih gradijenata Republike Hrvatske (izraženo u °C/100 m). Izvor: Jelić, 1997.

U slučaju u kojemu bi temperatura zraka u špiljskom sustavu Vilina špilja – izvor Omble zavisila isključivo od geotermalnog gradijenta, vrijednosti temperature zraka u podzemlju trebale bi se kretati u istim intervalima kao i temperature stjenske mase (uz porast od 2°C na svakih 100 m pada nadmorske visine) i ne bi varirale tijekom godine za više od 0,1°C. Do sada provedena mikroklimatska mjerenja pokazuju ne samo da nije tako, nego i da su odstupanja od vrijednosti očekivanih prema geotermalnom gradijentu znatna:

1. Hamidović je u lipnju 2009. zabilježila u gornjoj etaži temperaturu od 16,3 °C.
2. Mikroklimatska mjerenja koja je proveo HBSD (2012) donijela su vrijednosti temperature a) za donju etažu od 13,7 – 13,9 °C u ožujku, a 13,9 – 14,4 °C u lipnju, b) za srednju etažu od 14,8 y– 15,6 °C u ožujku, a 14,8 – 16 °C u lipnju i c) za gornju etažu od 15,4 – 15,5 u ožujku , a 15,4 – 17,5 u lipnju.
3. Mikroklimatska mjerenja koja je proveo Oikon (2012) donijela su vrijednosti temperatura za gornju etažu od 15,4 °C u ožujku, 16,3-17,5 °C u svibnju i 15,9-19,2 °C u lipnju.
4. Oikon i Geonatura (2014) zabilježili su u listopadu vrijednost temperature u gornjoj etaži od 16,4 °C.

5. Kontinuirana mikroklimatska mjerenja koja u 2015. godini provode Oikon i Geonatura do sada su donijela vrijednosti u gornjoj etaži od 15,5-16,4 °C u siječnju, 13,2-17,8 °C u veljači, 10,7 – 15,9 °C u ožujku i 14,3 – 15,9 °C u travnju.

Iz navedenih se rezultata do sada provedenih mikroklimatskih mjerenja može zaključiti sljedeće:

1. U donjoj i srednjoj etaži (HBSD, 2012) redovito su bilježene znatno (i do 4 °C u donjoj etaži) niže temperature od onih koje bi se očekivale prema geotermalnom gradijentu.
2. Sva mjerenja provedena u gornjoj etaži redovito su rezultirala znatno (i do 4 °C) višim vrijednostima od onih koje bi se očekivale prema geotermalnom gradijentu.

Prvi zaključak (niže temperature od očekivanih u donjoj i srednjoj etaži) može se objasniti kontinuiranim utjecajem hlađenja stjenske mase podzemnim tokom Omble (čija temperatura tijekom godine varira između 12,4 – 13,3 °C, uz prosjek 12,8 °C), što je dokazano geofizikalnim istraživanjima provedenim za potrebe projektiranja HE Ombla (koja su, među ostalim, bila ključna za određivanje prostornog položaja Glavnog kanala) i prikazano u radu Ravnika i Rajvera (1998, vidi Sliku 2.22.).

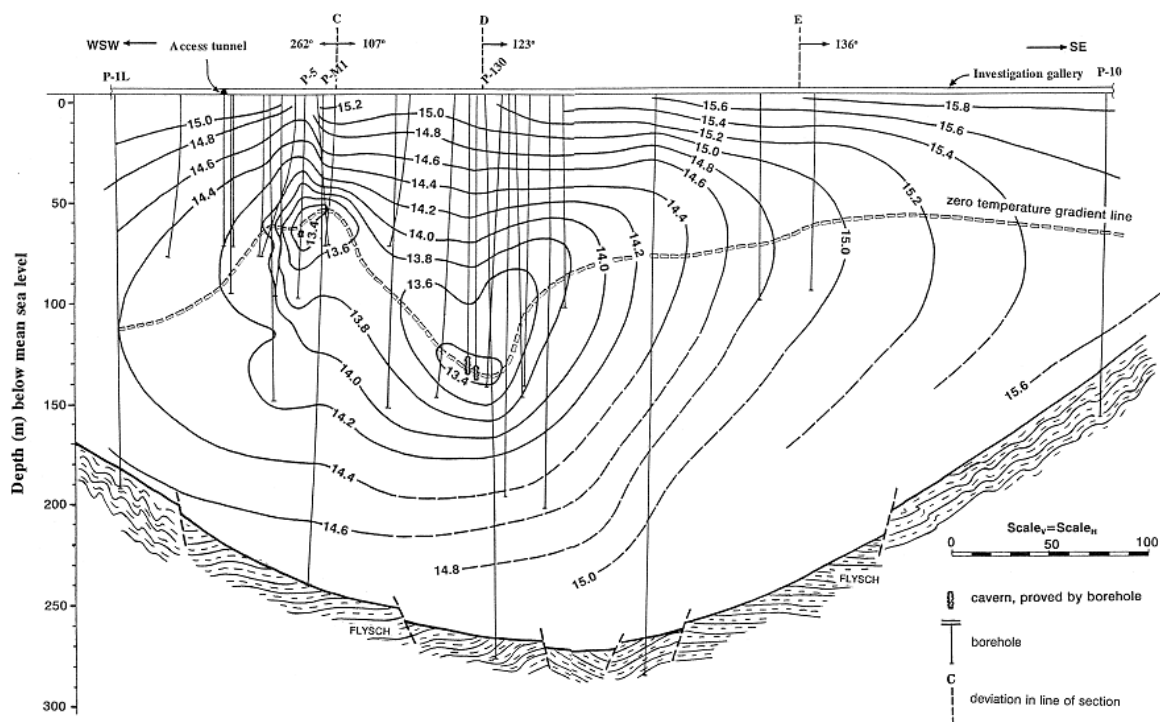


Fig. 6. Vertical section of the temperature field between the investigation gallery and the impermeable flysch barrier (see Fig. 4).

Slika 2.22. Temperaturno polje približno okomito na podzemni tok rijeke Omble. Izoterme su interpolirane iz temperatura mjerenih na bušotinama (preuzeto iz Ravnik i Rajver, 2012).

Iz rezultata istraživanja prikazanih u radu Ravnika i Rajvera (1998) za potrebe ovog razmatranja se može zaključiti kako podzemni tok Omble u Glavnom kanalu na dubini od - 140 m n.m. i uz prosječnu temperaturu vode od 12,8 °C hladi svu okolnu stjensku masu u znatnoj mjeri, čega je posljedica da se na razini mora (0 m n.m.), umjesto očekivanih približno 18,2 °C prema geotermalnom gradijentu,

postizu temperature od približno 15,5 °C, što je približno srednja vrijednost između temperature podzemnog toka Omble i temperature stjenske mase očekivane prema geotermalnom gradijentu. Dodatno (što nije bilo obuhvaćeno istraživanjima čiji su rezultati prikazani kod Ravnika i Rajvera, ali se može izvesti usporedbom dosadašnjih mikroklimatskih mjerenja HBSD-a i očekivanih vrijednosti prema geotermalnom gradijentu – vidi gore), sa sigurnošću se može zaključiti da je i srednja etaža redovito osjetno hladnija od očekivanog prema geotermalnom gradijentu, čemu, osim sada vjerojatno već u manjoj mjeri prisutnog statičkog (pasivnog) hlađenja s dubine na kojoj je u Glavnom kanalu matica Omble, vjerojatno značajno doprinose povremena, a često i relativno dugotrajna potapanja špiljskih kanala za velikih protoka Omble koja podrazumijevaju izravni (aktivni) dotok hladne vode na veće nadmorske visine (usporedi Knjigu 2, Poglavlje 2.10).

Drugi zaključak (više temperature od očekivanih u gornjoj etaži) može se objasniti a) utjecajem zagrijavanja stjenske mase Sunčevim zračenjem i kondukcijom topline u dublje slojeve, što je na lokaciji zahvata sigurno pospješeno relativno visokim solarnim potencijalom južnodalmatinskog područja, ali jednako tako i orijentacijom padine prema jugu bez ikakvog zasjenjenja okolnim reljefom (čime se dotok Sunčeve energije maksimizira) i/ili b) strujanjem zraka u Vilinoj špilji koji dovodi do temperaturnih izjednačenja s prizemnim slojem atmosfere (na što za sada izravno ne ukazuju mikroklimatska mjerenja u dubini gornje etaže, iako na mjestu bliže ulazu u Vilinu špilju gdje je u prošlosti provedeno miniranje (i omogućeno naseljavanje šišmiša) postoji stalno i relativno jako strujanje zraka.

Ovim su razmatranjem prirodnog stanja stečeni uvjeti za razmatranje termičkih uvjeta nakon izgradnje zahvata. Nakon izgradnje zahvata matica rijeke Omble premjestit će se približno na razinu mora, što znači da će se sličan efekt hlađenja stjenske mase kao prije izgradnje (na razini mora, uz maticu na -140 m n.m.) osjetiti upravo na nadmorskim visinama Viline špilje (u prosjeku 140 m n.m.). Primjenjujući analogiju (uz činjenicu da se radi o istom litološkom supstratu) s rezultatima prikazanim u radu Ravnika i Rajvera (1998), odnosno, računajući srednje vrijednosti između temperature podzemnog toka (godišnji srednjak od 12,8 °C, a tijekom porodičnih kolonija u prosjeku više, do maksimalno 13,3 °C) i očekivanih temperatura stjenske mase na nadmorskim visinama Viline špilje prema geotermalnom gradijentu od (15,2 – 15,8 °C), proizlazi da bi se nakon izgradnje HE Ombla (bez utjecaja zagrijavanja Sunčevom energijom i strujanja zraka) trebale očekivati temperature zraka u intervalu od 14 – 14,3 °C (odnosno za maksimalno 1,2 – 1,5 °C niže nego u stanju prije izgradnje).

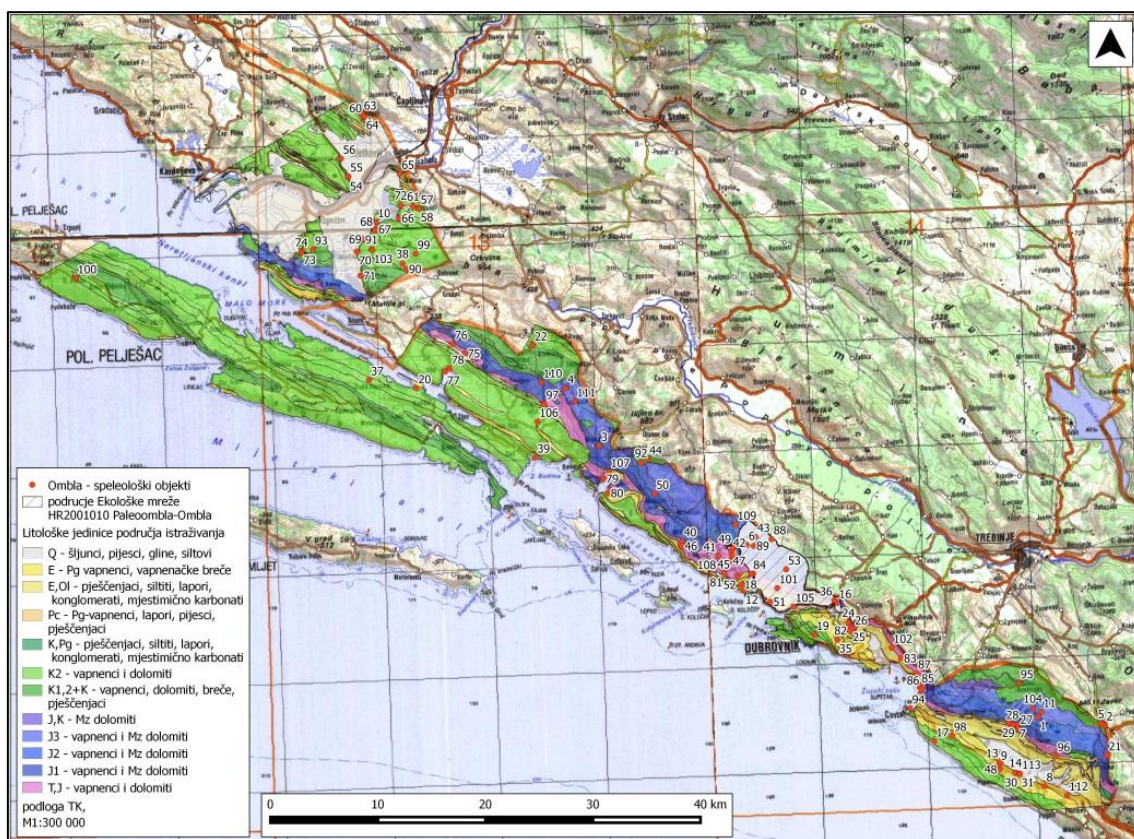
Ovo bi očekivanje bilo realno samo uz pretpostavku da će kota vode u retenciji biti na 130 m n.m. tijekom 365 dana u godini. S obzirom da će u ljetnom dijelu godine ta kota biti znatno niža (do minimalno 75 m n.m.), a imajući u vidu da je toplinska vodljivost zraka približno 25 puta manja od toplinske vodljivosti vode, proizlazi da bi sniženje temperature zraka u podzemlju bilo u prosjeku manje od gore procijenjenog (i dalje bez utjecaja zagrijavanja Sunčevom energijom i strujanja zraka). Dodatno, kako je gore pokazano na temelju provedenih mikroklimatskih mjerenja, nema dvojbe da se Vilina špilja značajnije zagrijava i iz drugog (drugih) izvora (Sunčevo zračenje i/ili strujanje zraka), što se nakon izgradnje HE Ombla neće promijeniti. To znači da će snižavanje temperature zraka u gornjoj etaži nakon izgradnje HE Ombla svakako biti značajno manje od 1,5 °C, a postoji mogućnost i da uopće neće biti mjerljivo.

Cjelokupno gornje razmatranje uzima u obzir samo statičko hlađenje okolne stjenske mase podzemnim tokom Omble (kondukcijom topline s toplije stijene na hladniju vodu) pa se ovdje još postavlja pitanje eventualnog dinamičkog hlađenja (miješanjem hladnije i toplije vode u budućoj podzemnoj retenciji). S obzirom da je hladnija voda teža, a HE Ombla protočnog karaktera, razložno je zaključiti da će pri svim protocima manjim ili jednakim $60 \text{ m}^3/\text{s}$ (koji će u cijelosti prolaziti kroz turbine smještene približno na razini mora) u potpunosti izostati hlađenje gornjih slojeva sustava Vilina špilja – izvor Omble dotokom svježe vode (osim u manjoj mjeri drugim vodozahvatom za dubrovački vodovod na 55 m n.m., uz količine do $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$, što se može zanemariti). Pri protocima većim od $60 \text{ m}^3/\text{s}$ aktivirat će se vrtložni preljev (i prelijevanje vode iz podzemne retencije), što će za posljedicu imati vertikalno tečenje i dotok hladnije vode u gornje slojeve podzemnog sustava. Međutim, ima li se na umu da su epizode takvih većih protoka Omble tijekom razdoblja (svibanj - rujanj) vrlo rijetke (tek približno svake dvadesete godine, vidi gore Sliku 2.15), a uvijek vrlo kratkotrajne (najviše 1 – 2 dana) i ovaj se utjecaj može zanemariti.

3 Volumen pornog prostora na predmetnom području

3.1 Procjena volumena karbonatnih naslaga

Volumen karbonatnih naslaga okvirno je procijenjen množenjem površine koju karbonatne naslage zauzimaju u istraživanom području i debljine tih naslaga preuzete s listova OGK Dubrovnik, Ston, Trebinje, Metković, Korčula, Ploče mjerila 1:100 000 (Slika 3.1., Tablice 3.1. i 3.2.).



Slika 3.1. Izrez iz listova geoloških karata M 1 : 100 000 (OGK Dubrovnik, Ston, Trebinje, Metković, Korčula, Ploče) s prikazanim litološkim jedinicama na širem području istraživanja i lokacijama špiljskih objekata koji su bili predmet istraživanja u ovom projektu (podloga TK M 1 : 300 000).

Tablica 3.3.1. Površine koje karbonatne naslage zauzimaju na području ekološke mreže Paleoombla - Ombla te njihove debljine i volumeni.

Karbonatne naslage	Površina karbonatnih naslaga (km ²)	Srednja debljina (km)	Volumen karbonatnih naslaga (km ³)
Trijas	5,09	0,1	0,509
Jura	25,62	0,3	7,686
Gornja kreda	0,434	0,28	0,122
Ukupno	31,244		8,317

Tablica 3.3.2. Površine koje karbonatne naslage zauzimaju na širem dubrovačkom području te njihove debljine i volumeni.

Karbonatne naslage	Površina karbonatnih naslaga (km ²)	Srednja debljina (km)	Volumen karbonatnih naslaga (km ³)
Trijas	47,88	0,1	4,788
Jura	182,05	0,3	54,615
Donja kreda	113,6	0,2	22,72
Gornja kreda	413,13	0,25	103,283
Ukupno	756,66		185,406

Na širem dubrovačkom području karbonatne naslage nalaze se na površini od 756,66 km², a s obzirom na debljinu naslaga, zauzimaju volumen od 185,406 km³. Na području ekološke mreže karbonatne naslage zauzimaju površinu od 31,244 km², a volumen od 8,317 km³.

3.2 Procjena poroznosti

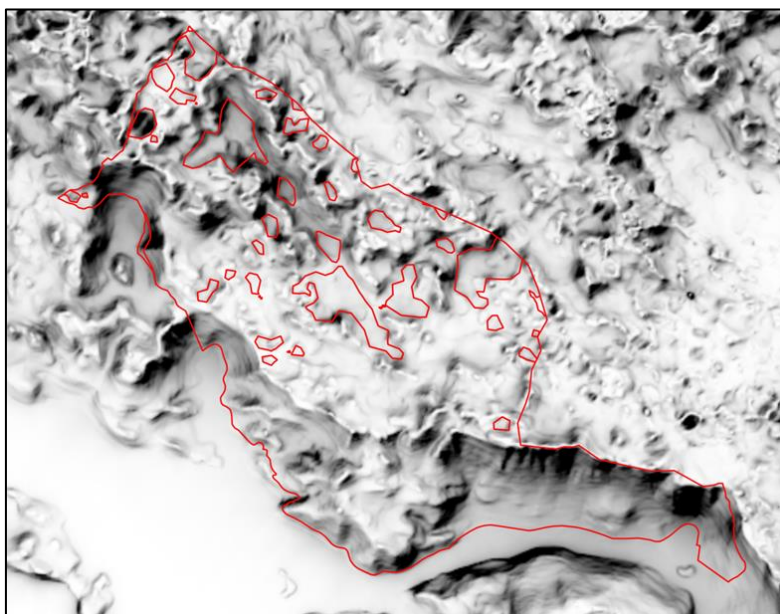
Da bi se mogao procijeniti ukupni volumen pornog prostora u karbonatnim naslagama, osim procjene volumena tih naslaga potrebno je procijeniti i njihovu prosječnu poroznost. Pri tome je prikladno istaknuti kako je za regionalno mjerilo ovakvo osrednjavanje valjano unatoč činjenici da je u karbonatnim stijenama vrlo velika lateralna i vertikalna varijabilost poroznosti, tim više što je za potrebe Glavne ocjene prihvatljivosti zahvata HE Ombla na ekološku mrežu bitan red veličine, zbog potrebe komparacije s volumenom špiljskog sustava pod potencijalnim utjecajem zahvata. Poroznost je u ovom elaboratu procijenjena na nekoliko nezavisnih načina.

3.2.1 Ukupna poroznost za okršene vapnence preuzeta iz literature

U svrhu obračuna ukupnog volumena pornog prostora preuzet je raspon vrijednosti ukupne poroznosti (usporedi također poglavlje 1.3.) za okršene vapnence od 5 do 50 % prema Domenico i Schwartz (1998).

3.2.2 Geomorfometrijske indicije tercijarne poroznosti

Površina područja ekološke mreže Ombla - Paleoombla iznosi 37 4776 km² (3 747,76 ha). Površina pod ponikvama i depresijama (izvedena geomorfometrijskim modeliranjem na temelju digitalnog modela terena visoke prostorne razlučivosti), kao indikator poroznosti karbonatnih naslaga, unutar područja ekološke mreže iznosi 4 1663 km² (416,63 ha) odnosno 11,12 % površine područja (Slika 3.2.), što je unutar intervala ukupne poroznosti za okršene vapnence prema Domenico i Schwartz (1998). Ovi brojni krški oblici razvijeni na površini karbonatnih naslaga govore u prilog značajnoj tercijarnoj poroznosti. Prisutne brojne ponikve i depresije svjedoče i o brzom vertikalnom poniranju vode u podzemlje.



Slika 3.2. Prostorna razdioba ponikvi i krških depresija (crveni poligoni) unutar područja ekološke mreže Paleoombla - Ombla (crvena granična linija) kao indikator tercijarne poroznosti.

3.2.3 Procjena efektivne poroznosti u slivu Omble

Kao što je već opisano u uvodnom dijelu, efektivnu poroznost čine pore koje su međusobno povezane. Ona se može definirati količinom vode koja će se gravitacijski ocijediti iz uzorka stijene. Za ocjeđivanje vode iz uzorka potrebno je vrijeme pa se stoga može reći da efektivna poroznost nije stalna veličina već je funkcija vremena.

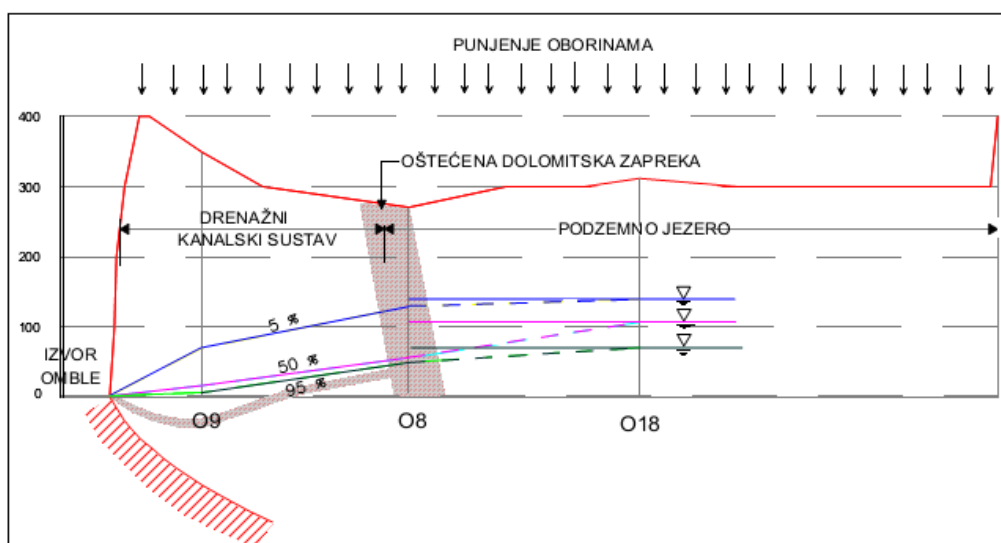
Za potrebe numeričkog modela punjenja i pražnjenja podzemne retencije izgrađenog za sliv Omble poroznost je određena kalibracijom na podmodelu u odnosu na piezometar O8, koji se nalazi na nizvodnom rubu podzemnog jezera (Jović 1997). Pri tome se pošlo od toga da piezometar O8 reprezentira vodostaj u podzemnom jezeru iz kojeg se glavnim kanalskim sustavom odvija pražnjenje (uspoređi Sliku 3.3.) pa je za taj slučaj postavljena jednačica:

$$A_{sliva} S(h) \frac{dh_{O8}}{dt} = Q_{kiša} - Q_{Ombla}$$

A_{sliva} – površina sliva

h_{O8} – vodostaj, odnosno piezometarska visina u piezometru O8

$S(h)$ – poroznost u području položaja vodostaja, odnosno specifični kapacitet akumuliranja vode difuznog prostora ako je difuzni prostor pod tlakom, promjenjiva s visinom.

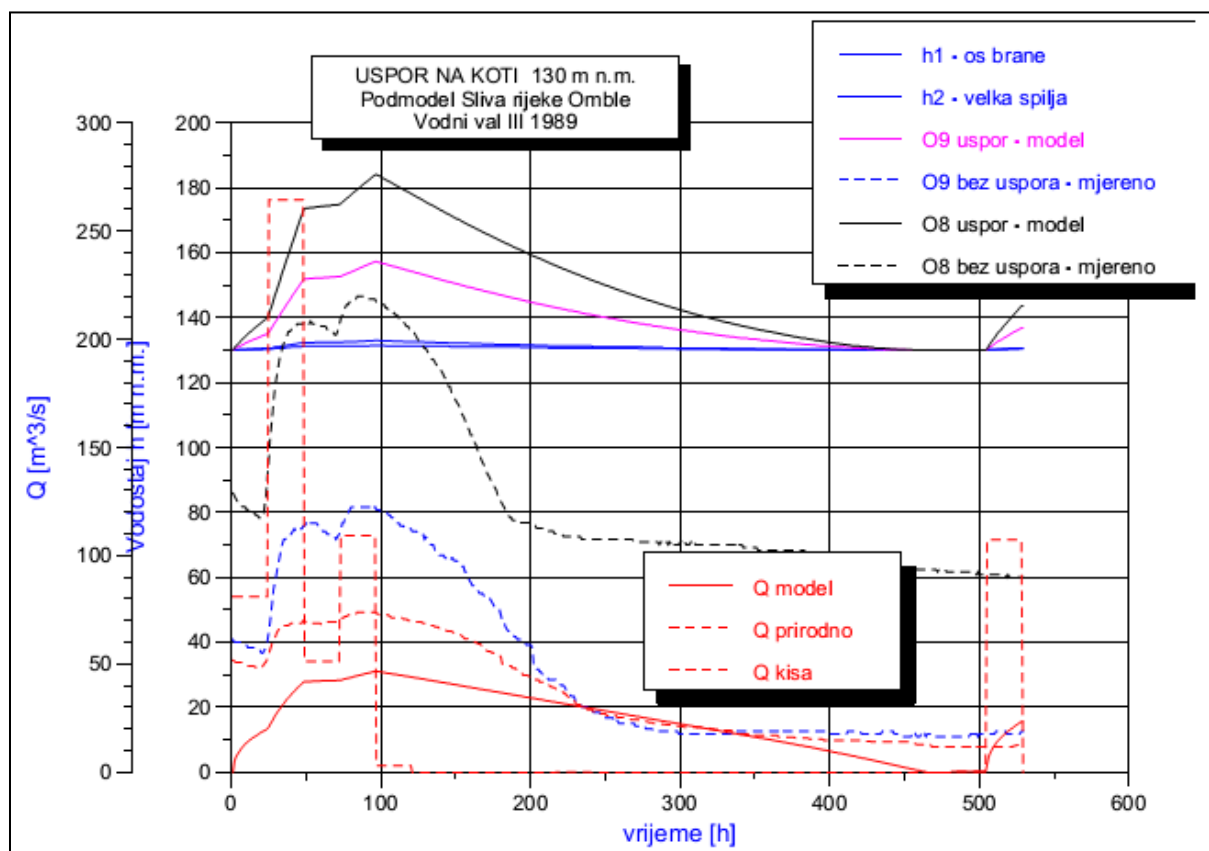


Slika 3.3. Shematski prikaz punjenja i pražnjenja podzemne retencije na izvoru Omble (preuzeto iz Jović 1997.).

Ova diferencijalna jednačba riješena je Runge - Kutta metodom, na način da je pretpostavljena početna promjena poroznosti po visini $S(h)$. Rješenje jednačbe je modelska vrijednost vodostaja u jezeru, odnosno piezometru h_{O8} , koja je uspoređena s izmjerenim vrijednostima. Na temelju kakvoće i veličine odstupanja modelskih i izmjerenih veličina zaključeno je o potrebnim korekcijama funkcije poroznosti. Postupak je ponavljan sve dok se nije dobilo zadovoljavajuće podudaranje izmjerenih i izračunatih vrijednosti.

Utvrđeno je da je poroznost podzemnog prostora promjenjiva s visinom. Dobiveni rezultati pokazuju postojanje povećane efektivne poroznosti na dubinama ispod 70 m n. m., gdje ona iznosi oko 0,5 %. Znatno manje vrijednosti od samo 0,05 % dobivene su za stijensku masu u dubinskom intervalu između 70 m n. m. i 130 m n. m. To ukazuje na uslojenu okršenost, odnosno na to da se najvjerojatnije radi o etažama kanalskih sustava na dubinama ispod 70 m n. m. Pri tome je važno istaknuti da se piezometar O8 ne nalazi u području okršenih vapnenaca (nego u području dolomitskih stijena), što znači da se može smatrati kako su ove procjene efektivne poroznosti podcijenjene, ako se primjenjuju na područje s okršenim vapnencima.

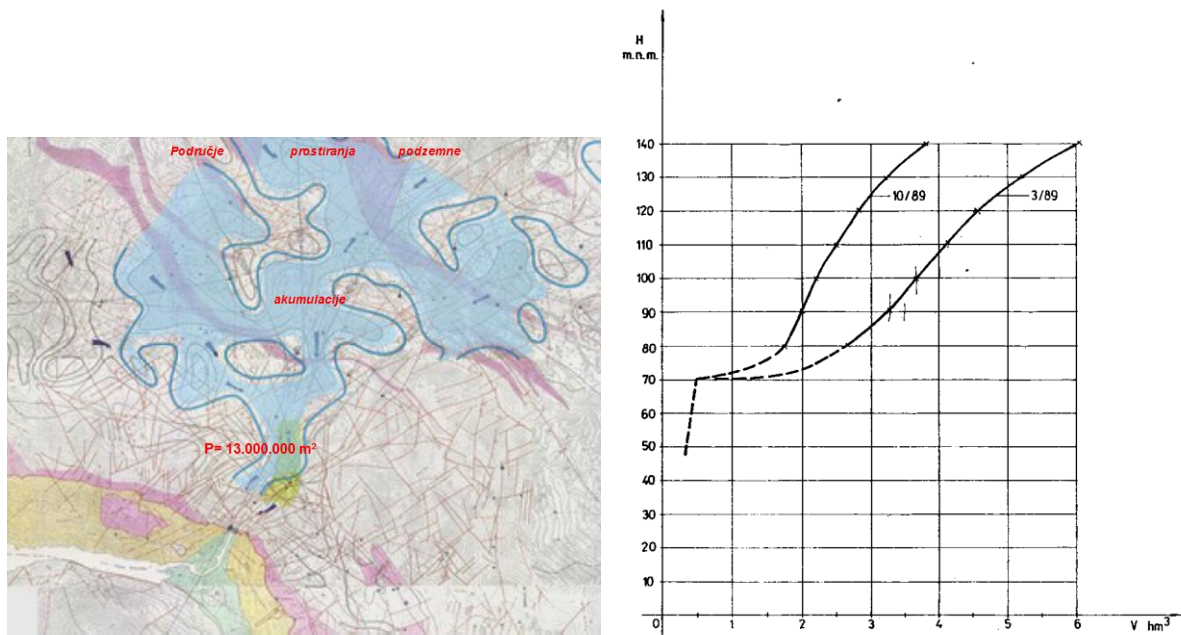
Do procjene efektivne poroznosti u neposrednom zaleđu izvora Omble može se doći i na drugi način. Intepretirajući iz dijagrama (Slika 3.4.) preuzetog iz elaborata V. Jovića (1997) relevantne mjerene vrijednosti (crtkane linije), vidljivo je da je jaka kiša relativno brzo (za cca 2 dana) rezultirala znatnim porastom razina podzemne vode u piezometrima O8 i O9 što znači da je infiltracija bila veća od količine istjecanja na izvoru Omble pa je najveći dio „aktivnog“ pornog prostora bio saturiran vodom. Uslijedilo je razdoblje bez kiše od 400 sati (16,6 dana) kroz koji se podzemlje praznilo. Pred kraj tog razdoblja ustalile su se i količina istjecanja i razine podzemne vode u piezometrima. Iz krivulje Q_{prirodno} izračunato je da je kroz to razdoblje (400 sati) na Ombli isteklo $43,83 \times 10^6 \text{ m}^3$ vode. To je ujedno i približna veličina pornog prostora u zoni između maksimalnih i minimalnih razina podzemne vode koji se ispraznio tijekom razdoblja bez kiše.



Slika 3.4. Uspor na koti 130 m n. m., vodostaji i protoci (preuzeto iz Jović 1997.).

S obzirom na relativno kratko razdoblje pražnjenja vodonosnika istjecanjem na Omblu između dvije kiše od 400 sati (odnosno 16,6 dana), realno je pretpostaviti da je tijekom tog razdoblja istekla količina vode ($43,83 \times 10^6 \text{ m}^3$) koja se tijekom kiše akumulirala u kavernskom i kanalskom prostoru razvijenom u okršenoj vapnenačkoj stijenskoj masi u zaleđu Omble u kojoj će se formirati i podzemna retencija nakon izgradnje injekcijske zavjese (usporedi Slika 3.5). U tom slučaju u izračun efektivne poroznosti može se ući s površinom od $13 \times 10^6 \text{ m}^2$ što uz srednju vrijednosti razlika između maksimalnih i minimalnih razina podzemne zabilježenim u piezometrima od 76 m daje efektivnu poroznost od 4,44 %.

Na sličan način izračunat je i volumen buduće podzemne retencije (Paviša 1993), uspoređivanjem volumena istekle vode za slučaj kada je kiša pala na područje uzvodno od dolomitske zapreke i u drugom slučaju uglavnom na prostor nizvodno od nje (odnosno na prostor buduće podzeme retencije). Taj volumen zavisi od nadmorske visine (Slika 3.5 – desno), a za kotu od 130 m n. m. kreće se od minimalno $3,2 \times 10^6 \text{ m}^3$ do maksimalno $5,2 \times 10^6 \text{ m}^3$.



Slika 3.5. Područje prostiranja (lijevo, preuzeto iz Buljan 2008) i volumen (desno; preuzeto iz Paviša 1993) podzemne retencije u zaleđu Omble nakon izgradnje injekcijske zavjese.

3.3 Procjena volumena pornog prostora

Ukupni volumen pornog prostora u karbonatnim naslagama predmetnog područja procijenjen je iz volumena tih naslaga (vidi poglavlje 3.1.) i njihove prosječne poroznosti (vidi prethodno poglavlje). Pri tome je obračun (čije rezultate treba shvatiti aproksimativno) proveden zasebno za vrijednosti poroznosti od:

- 1) 0,275 % - srednja vrijednost iz modelnih procjena od Jovića (1997), izračunata kao aritmetička sredina vrijednosti za stijensku masu u dubinskom intervalu između 70 m n. m. i 130 m n. m. (0,05 %) i vrijednosti za stijensku masu na dubinama manjim od 70 m n. m. (0,5 %) i
- 2) 4,4 % - efektivna poroznost dobivena nezavisnom procjenom procjeđivanja velike oborine kroz podzemlje u zaleđu izvora Omble, koja je bliska vrijednosti minimalne ukupne poroznosti za okršene vapnence (5 %) prema Domenico i Schwartz (1998.).

Odabirom gore navedenih vrijednosti poroznosti težište se u izračunu stavlja na efektivnu poroznost (pri čemu se unaprijed zna da je niža odabrana vrijednost poroznosti podcijenjena, jer se odnosi na dolomitne stijene, a ne na okršene vapnence), što je prikladno za potrebe ove studije imajući u vidu opskrbljivanje podzemnih staništa vodom kao temeljnim preduvjetom za život špiljskih organizama. Tako se cijeli obračun stavlja na stranu sigurnosti, jer su minimalne vrijednosti volumena pornog prostora dobivenog izračunom sasvim sigurno manje od stvarnih volumena. To najbolje ilustrira postojanje tzv. „fosilnih špilja“, odnosno dijelova podzemlja koji su kroz geološku povijest bili hidrološki aktivni, a danas su izvan zone otjecanja podzemnih tokova, iako znatno doprinose ukupnoj poroznosti, predstavljajući k tome važna podzemna staništa za špiljske organizme (npr. upravo Vilina špilja u blizini izvora Omble). Zbog toga se procjene volumena pornog prostora dobivene na opisani način mogu interpretirati kao „raspon minimalnog očekivanog volumena pornog prostora“, definiran s a) procijenjenim volumenom karbonatnih naslaga i b) dvije pretpostavljene vrijednosti poroznosti (0,275 % i 4,4 %). Tablica 3.3. prikazuje rezultate obračuna volumena pornog prostora na području ekološke mreže Paleoombla - Ombla i na širem dubrovačkom području.

Tablica 3.3. Procjena volumena pornog prostora na području ekološke mreže Paleoombla – Ombla i na širem dubrovačkom području.

	volumen karbonatnih naslaga (km ³)	volumen pornog prostora (m ³) uz poroznost od 0,275%	volumen pornog prostora (m ³) uz poroznost od 4,4%
Područje EM Paleoombla - Ombla	8,317	22.871.750	365.948.000
Šire dubrovačko područje	185,406	509.866.500	8.157.864.000

Na području ekološke mreže Paleoombla - Ombla do sada je istraženo 178 325,755 m³ podzemnog prostora (zbroy volumena poznatih špiljskih objekata), odnosno prema gornjim procjenama između 0,049 % i 0,780 % od ukupnog volumena pornog prostora. Na cijelom istraživanom području je do sada istraženo 732 483,655 m³ podzemnog prostora, odnosno prema gornjim procjenama između 0,009 % i 0,144 % od ukupnog volumena pornog prostora. Ti rezultati vode k zaključku da je do sada na predmetnom području istražen vrlo mali dio ukupnog podzemnog prostora, pogotovo imajući u

vidu da su ove procjene dobivene u gore opisanom kontekstu „raspona minimalnog očekivanog volumena“.

Do sada istraženi podzemni prostor špiljskog sustava Vilina špilja – izvor Omble zaprema približno 68 102 m³, što je procijenjeno za potrebe ove studije na temelju kompilacije postojećih speleoloških nacрта. Kada se tome doda a) volumen (većim dijelom još neistraženog) glavnog dovodnog kanala koji je u sklopu ove studije aproksimiran s 28 125 m³ i b) sav volumen već postojećih antropogenih istražnih tunela (danas uglavnom napuštenih od čovjeka i već bogatih nalazišta rijetkih špiljskih vrsta) koji iznosi 6 250 m³, dobiva se ukupni volumen od 96 854 m³ podzemnog prostora. Ako se taj volumen stavi u relaciju s očekivanim volumenom podzemnog prostora (Tablica 3.3.) područja ekološke mreže (procijenjenim krajnje konzervativno u terminima efektivne poroznosti), dobiva se da špiljski sustav Vilina špilja – izvor Omble zaprema najviše između 0,0265 – 0,4234 % očekivanog podzemnog prostora u tom području (pri čemu se može argumentirati da je navedena gornja granica već precijenjena, zbog korištenja vrijednosti poroznosti koja se ne odnosi na okršene vapnence). Identičnim konzervativnim izračunom, uspoređujući očekivani volumen podzemnog prostora za šire dubrovačko područje, dolazi se do udjela špiljskog sustava Vilina špilja – izvor Omble najviše između 0,0012 – 0,0189 %.

Ove se vrijednosti mogu koristiti kao komparativne u procjeni eventualnih gubitaka podzemnih staništa zbog izgradnje HE Ombla.

4 Zaključak

Temeljem provedenih hidrogeoloških analiza na širem području zahvata HE Ombla može se zaključiti:

1. Područje sliva Omble izgrađeno je od karbonatnih naslaga gornjotrijaske, jurske, kredne i eocenske starosti, eocenskih flišnih naslaga i različitih naslaga kvartara. Vapnenci su raspucani i okršeni i čine krški vodonosnik u kojem se nakupljaju i kojim podzemno teku oborinske vode koje se u njega infiltriraju. Dolomiti su manje propusni i čine relativne barijere koje usmjeravaju i usporavaju podzemne tokove. Naslage fliša ispred Omble i lateralno debljine su od 350 m i hidrogeološki predstavljaju potpunu barijeru.
2. Dio karbonatnih naslaga u zaleđu izvorišta Ombla zbog tektonske razlomljenosti, hidrauličkog pritiska u tom dijelu sliva i velikog protoka u glavnim kanalskim provodnicima izvrnut je intenzivnom procesu okršavanja koji rezultira sekundarnom efektivnom poroznosti iako je prostorno smješten ispod zone istjecanja na razini mora.
3. Najveći dio podzemne vode iz unutrašnjosti sliva Omble najprije se slijeva u zonu rasjeda Hum - Ombla duž koje su razvijeni privilegirani provodnici vode do izvorišta. Ta zona u čitavoj svojoj širini predstavlja glavni drenažni prostor promatranog hidrogeološkog sustava. Analize Q - H dijagrama pokazale su da se podzemni retencijski prostor zaleđa Omble, s obzirom na režim tečenja, može podijeliti na dva dijela. Uzvodno područje obuhvaća podzemni prostor u kojem je tečenje dominantno laminarno i u kojem se akumuliraju veće količine vode. Nizvodno područje predstavlja uski i duboki prostor unutar kojeg, uslijed postojanja privilegiranih krških kanala do zone istjecanja, voda teče turbulentnim tokom pod pritiskom.
4. Temeljni tokovi u širem području tih krških kanala nalaze se na 50 - 60 m n. m. U toj zoni se skuplja glavina podzemnih voda sliva i dalje koncentriranim kanalskim provodnicima otječe do izvorišta Ombla koje je ispod razine mora, na mjestu završetka glavnog kanalskog provodnika vode do izvorišta. Lokacija izvorišta Ombla je strukturno uvjetovana. Nastala je unutar tektonikom zdrobljene zone čije je obilježje "snop" rasjeda pružanja SI - JZ u okviru zone Hum - Ombla. Spomenuti rasjedi u najvećoj su mjeri odredili privilegirane smjerove cirkulacije podzemnih voda iz zaleđa. Samo izvorište je sifonskog oblika, uzlazno sa srednjom godišnjom izdašnjošću od 23,9 m³/s. Postoje tri izvora, a na glavni istječe 80% protoka.
5. Litološka građa, strukturni položaj i međusobni odnos dijelova stijenske mase različite poroznosti i propusnosti te hidrogeološke značajke šireg područja pokazuju da je u zaleđu kraškog izvora Ombla moguće formirati podzemnu retenciju. Razrađena projektna rješenja pojedinih objekata potvrđuju da je ideja o izgradnji podzemne retencije i pripadajuće hidroelektrane tehnički ostvariva te da je cjelokupni projekt isplativ. Dodatno, izgradnjom ovog objekta postići će se znatno poboljšanje vodoopskrbe Dubrovnika.
6. Sustav je projektiran tako da se izbjegne potapanje gornje etaže Viline špilje, a instalacijom drenažnih cijevi smanjit će se dodatno nakupljanje vode procjeđivanjem zbog općeg podizanja

razina vode unutar sustava. Gornja etaža neće biti blokirana niti će je na neki drugi način presijecati injekcijska zavjesa.

7. Zbog zahvata vode na 55 m n. m. na vertikalnom oknu koje se spaja na srednju špiljsku etažu, postojat će stalan protok kroz potopljeni dio špiljskog sustava, čime će se omogućiti stalna cirkulacija vode i dotok organske tvari u stalno potopljeni dio srednje etaže špiljskog sustava. Dio špiljskog sustava nizvodno od injekcijske zavjese ostat će relativno nepromijenjen, iako vjerojatno može doći do promjene u strujanju zraka i na mahove do drenaže vode iz Viline špilje unutar tog područja. Injekcijska zavjesa može ograničiti i količinu procijeđene vode koja dospjeva do te razine kroz pukotine koje presijecaju tu etažu i dovode procijeđenu vodu iz planine iza nje.
8. Neće više biti značajnog protoka u glavnom špiljskom kanalu, što bi moglo utjecati na biologiju vode (npr. smanjiti količinu otopljenog kisika i hranjivih tvari), jer će se začepljenjem tog kanala veći dio protoka preusmjeriti u zonu gdje će se nalaziti vodozahvat. S druge strane, Velika dvorana koja se nalazi u toj zoni bit će trajno potopljena.
9. Gradnja HE uključuje bitno povećanje Izvorske špilje i skretanje gotovo cjelokupnog toka u nju kroz različite komponente zahvata (tlačni cjevovod, cjevovod biološkog minimuma, spiralni preliv). Nova glavna trasa protoka ići će kroz dovodni tunel, a zatim dalje kroz različite komponente HE.
10. U prirodnom stanju (prije izgradnje HE Ombla), na nadmorskim visinama iznad 120 m potapanje nikada ne traje duže od 1 do 2 dana, što znači da je potapanje u gornjoj etaži Viline špilje (koje je i kao događaj rijetko) uvijek vrlo kratkotrajno. Jednako tako, na nadmorskim visinama iznad 80 m, a ispod 120 m (zona spoja između srednje i gornje etaže Viline špilje), potapanje također najčešće traje 1 – 2 dana, ali su relativno česte epizode kada ono traje i tjedan dana, a može se (na nižim nadmorskim visinama) protegnuti i do dva tjedna neprekidnog trajanja. Na nadmorskim visinama od 40 - 80 m (srednja etaža Viline špilje) približno polovina epizoda potapanja traje duže od tjedan dana, brojne su epizode potapanja koje traju 2 – 3 tjedna, a trajanje potapanja se može protegnuti i do mjesec dana neprekidnog trajanja. Donja etaža Viline špilje u području budućeg vodozahvata većinom je u prirodnom stanju u cijelosti potopljena tijekom godine, uz kratkotrajna suha razdoblja tijekom ljetnog razdoblja.
11. U uvjetima nakon izgradnje injekcijske zavjese gore opisana prostorna i vremenska varijabilnost razina vode u podzemlju u odnosu na prirodno stanje bitno će se smanjiti, jer će nastati nova retencija nizvodno od dolomitske zapreke, koja će biti povezana s onom koja već postoji u području uzvodno od zapreke. Stoga će podzemni prostori nizvodno od dolomitske zapreke i bočno od glavnog špiljskog kanala postati dio jedinstvene podzemne retencije s onom kakva danas već postoji uzvodno. To će, u usporedbi s prirodnim stanjem, bitno smanjiti brzine tečenja u bočnim kanalima, dok će u Glavnom špiljskom kanalu (do vodozahvatnih bunara) te brzine ostati nepromijenjene. Time će sav podzemni prostor bočno od glavnog špiljskog kanala u ekološkom smislu postati vrlo sličan onome iz postojeće prirodne podzemne retencije u Hercegovini. Ova činjenica ima značajne reperkusije na skupne i prekogranične utjecaje HE Ombla na sastavnice prirodne bioraznolikosti.

12. Kada se na kraju posljednjeg vodnog vala prije ljetnog sušnog razdoblja razina podzemne vode izjednači na velikom prostoru uzvodno i nizvodno od dolomitske zapreke i ostane na koti 130 m n. m. zbog izgrađene injekcijske zavjese, zbog nedovoljnog bi gradijenta postupno dolazilo do smanjenja minimalnih vrijednosti protoka Omble. Kako bi se to spriječilo i da bi na Omblu uvijek tekla minimalna količina propisana vodoprivrednom suglasnošću postupno će se smanjivati razina vode u podzemnoj retenciji do one razine koja će omogućiti istjecanje propisanog protoka. Zbog toga će tijekom ljetnog razdoblja razina vode u retenciji uvijek biti niža od maksimalne (130 m n. m.), a najniža na koti 75 m n. m.
13. Trajanje potapanja tijekom godine u području gornje etaže Viline špilje neće se promijeniti nakon izgradnje HE Ombla u cjelokupnom njezinom dijelu koji je na nadmorskim visinama većim od 130 m, kao i u dijelu neposredno uz injekcijsku zavjesu koji će zbog implementacije posebnih mjera trajno biti izvan zone potapanja (iako je na nadmorskim visinama nešto nižim od 130 m). Jedini dio u gornjoj etaži koji će biti potopljen veći dio godine (izvan ljetnog razdoblja) bit će njezin stražnji dio niži od 130 m. Na nadmorskim visinama iznad 80 m, a ispod 120 m (zona spoja između srednje i gornje etaže Viline špilje), ukupno trajanje potapanja će nakon izgradnje postati znatno duže nego u prirodnom stanju, izostat će nagle izmjene (karakteristične za prirodno stanje) epizoda kratkotrajnijih potapanja i više dužih međuepizoda suhog stanja (tijekom iste godine), a pojavit će se samo jedan vremenski interval sa suhim stanjem kontinuiranog trajanja karakterističnog za ljetno razdoblje. Sve nadmorske visine ispod 80 m, za koje je u prirodnom stanju bila karakteristična stalna izmjena epizoda potapanja dužeg trajanja i kraćih međuepizoda suhog stanja tijekom godine, nakon izgradnje HE Ombla bit će trajno potopljene.
14. Nastanak podzemne retencije mogao bi imati posljedicu hlađenje stjenske mase, a posljedično i temperature zraka u špiljskim kanalima. Međutim, to snižavanje temperature će nakon izgradnje HE Ombla svakako biti značajno manje od 1,5 °C (što je prema literaturnim navodima manje od graničnog utjecaja na porodiljne kolonije šišmiša), a postoji mogućnost i da uopće neće biti mjerljivo.
15. Na temelju procjene volumena karbonatnih naslaga i njihove poroznosti može se procijeniti da je na području ekološke mreže Paleoombla - Ombla do sada istraženo najviše između 0,049 % i 0,780 % od ukupnog volumena pornog prostora, dok je na cijelom istraživanom području do sada istraženo najviše između 0,009 % i 0,144 % tog volumena. Može se zaključiti da je čovjeku još nepoznata glavnina pornog prostora na oba područja. Na temelju istog obračuna može se procijeniti da špiljski sustav Vilina špilja – izvor Omble zaprema najviše između 0,0288 – 0,4601 % ukupnog pornog prostora područja ekološke mreže Paleoombla – Ombla, odnosno najviše između 0,0013 – 0,0206 % ukupnog volumena pornog prostora na širem dubrovačkom području (pri čemu su gornje granice oba intervala sigurno precijenjene).

5 Izvori podataka

ANDRIĆ, M & SVIBEN, D. (1989): Izveštaj o plitkim refleksijskim mjerenjima u podzemnim galerijama Omble. Geofizika, Zagreb.

ANDRIĆ, M. (1990): Izveštaj o seizmičkim mjerenjima u bušotinama podzemne galerije Ombla. Geofizika, Zagreb.

ANDRIĆ, M. (1995): Izveštaj o plitkim refleksijskim mjerenjima područja Rožat - Dračevo selo kraj Dubrovnika. Hrvatska elektroprivreda, Dubrovnik.

ARANĐELOVIĆ, D. (1970): Izveštaj o električnim ispitivanjima u bližem i daljem zaleđu vrela Omble (kod Dubrovnika). Geozavod, Beograd.

ARANĐELOVIĆ, D. (1984): Izveštaj o geoelektričnim ispitivanjima u području vrela Omble. Geofizički institut, Beograd.

ARANĐELOVIĆ, D. (1989): Izveštaj o geoelektričnim ispitivanjima u širem području podzemne akumulacije Omble i Zavrelja, na brdskoj padini oko izvorišne zone Zavrelja, na flišnom području u okolini vrela Omble i na području "dolomitne kape" iznad Dračeva sela. Geofizički institut, Beograd.

BIONDIĆ, B. & PAVIČIĆ, A. (1995): HE Ombla, ocjena maksimalne kote uspora podzemne akumulacije. Arh. str. dok. Inst. za geol. istr., br. 109/95, Zagreb.

BOJANIĆ, L. & IVIČIĆ, D. (1984): Hidrogeološka studija područja Metković - Dubrovnik - Konavle. Arh. struč. dok. Geol. zavoda, br. 186/84, Zagreb.

BORJE, N. (1990): Results from borehole radar tests in Ombla tunnel. Mala, Sweden.

BOŽIČEVIĆ, S. (1987): HE Dubrovnik, Izveštaj o speleološkim istraživanjima Vilina pećina - Izvor Ombla. Institut za geološka istraživanja, Zagreb.

BULJAN, R. (1999): Značenje strukturnog modela u razradi zahvata i zaštite podzemnih voda izvorišnog područja Ombla kraj Dubrovnika. Disertacija, Rudarsko-geološko-naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, 176 str., Zagreb.

BULJAN, R. (2008): HE OMBLA- Rekapitulacija rezultata istražnih radova i Program mjera zaštite okoliša prije početka i tijekom gradnje hidroelektrane, Zagreb, svibanj 2008.

CLEGG, M., PALMER, T. & BEATON, S. (2013): PLAN UPRAVLJANJA BIORAZNOLIKOŠĆU, Informacije za ocjenu prema Direktivi o staništima i Plan upravljanja bioraznolikošću za utjecaje HEP-ovog projekta Hidroelektrane Ombla na područje Paleoombla-Ombla predloženo za mrežu Natura 2000.

CRNOJEVIĆ, L. (1989): Izveštaj o geoelektričnom ispitivanju između bušotina u istražnom potkopu HE Ombla. Geofizički institut, Beograd.

FRITZ, F. & BULJAN, R. (1995): HE Ombla, hidrogeološka građa područja izvora Slavjan. Institut za geol. istr., Zagreb.

JELIĆ, K. (1997): Plitka geotermalna energija u Hrvatskoj. 6. Forum Hrvatskog energetskeg društva u Zagrebu. Hrvatsko energetskeg društvo, 181 – 190.

JOVIĆ, V. (1997): HE Ombla, numerički model ponašanja podzemne akumulacije u prirodnim i projektom definiranim uvjetima. Aquarius Engineering, Split.

KRAŠOVAC, M. (1985): Speleoroničko istraživanje rijeke Dubrovačke - Omble. Geološki zavod, Ljubljana.

KRAŠOVAC, M. (1987): Elaborat o hidrogeološkim istraživanjima zaleđa izvora Ombla kod Dubrovnika. Geološki zavod, Ljubljana.

KUREVIJA T. & VULIN D. (2010): Determining undisturbed ground temperature as part of shallow geothermal resources assessment. Rudarsko – geološko – naftni zbornik 22, 27 – 36.

RAVNIK, D. & RAJVER, D. (1998): The use of inverse geotherms for determining underground water flow at the Ombla karst spring near Dubrovnik, Croatia. Journal of Applied Geophysics 39: 177 – 190.

MILANOVIĆ, P. (1971): Pokušaj utvrđivanja trase podzemnog toka karsnog sistema Ponikve u Popovom polju pomoću radioaktivnog izotopa Br-82. Geološki glasnik 15. Sarajevo, 1975.

MILANOVIĆ, P. (1976): Režim voda u dubokom karstu na primeru sliva vrela Ombla.

Hidrogeologija i vodno bokatstvo krša. Zbornik Jugosl-amer. simp. Dubrovnik, 131-150, Sarajevo.

MILANOVIĆ, P. (1977): Hidrogeologija karsne izdani Ombla. Geološki glasnik 22, Sarajevo.

PERIĆ, J. (1980): Ideja o izgradnji višenamjenske krške podzemne akumulacije “Dubrovačka rijeka”. Zbornik 6 Jug. simp. hidroheol. inž. geol., 1, 255-275, Portorož.

MILANOVIĆ, P. i dr. (1984): Studija mogućnosti energetskeg iskorištenja izvorišta Omble. Institut za korištenje i zaštitu voda na kršu. Trebinje.

MILANOVIĆ, P. i dr. (1989): HE Ombla, idejni projekt, geološki elaborat. Knjiga I-V, Energoprojekt, Beograd.

PAVIŠA T. & KAVURIĆ, M. (1991): Izveštaj o termokarotaži bušotina u potkopu. Hrvatska elektroprivreda, Dubrovnik.

PAVIŠA T. (1993): Analiza ponašanja podzemne akumulacije Ombla u prirodnim uvjetima. Elektroprivreda Hrvatske, Dubrovnik.

PAVIŠA T. & Sever, Z. (2008): HIDROELEKTRANA OMBLA- PROJEKT ZA ENERGETSKO ISKORIŠTENJE PODZEMNIH VODA U KRŠU



RENIĆ, A. (1995): Izvještaj o rezultatima provedenog trasiranja tokova podzemne vode kroz bušotinu O-21. Arh. str. dok. Inst. za geol. istr., br. 62/95, Zagreb.

RENIĆ, A. (1996): Izvještaj o rezultatima provedenog trasiranja tokova podzemne vode kroz bušotinu O-19. Arh. str. dok. Inst. za geol. istr., br. 32/96, Zagreb.

SEVER, Z. i dr. (1998): HE Ombla, Idejni projekt. Hrvatska elektroprivreda, Elektroprojekt, Zagreb.

SEVER, Z. i dr. (1999): HE Ombla, Studija utjecaja na okoliš. Hrvatska elektroprivreda, Elektroprojekt, Zagreb.

ŽUGAJ, R. & BONACCI, O. (1994): HE Ombla, hidrološka obrada. Hrvatska elektroprivreda - Direkcija za razvoj i inženjering, Avenija Vukovar 37, Zagreb.

ŽUGAJ, R., ANDREIĆ, Ž., PAVLIĆ, K., & FUŠTAR, L. (2011): Krivulje trajanja protoka, Građevinar (63)12, 1061-1068.

Tractebel Engineering GDF Svez & PB- Projektni biro Split (2011): OMBLA HYDROPOWER PROJECT EUROPEAN BANK FOR RECONSTRUCTION AND DEVELOPMENT TECHNICAL DUE DILIGENCE FINAL REPORT, Rev. F NOVEMBER 2011.



6 Prilozi

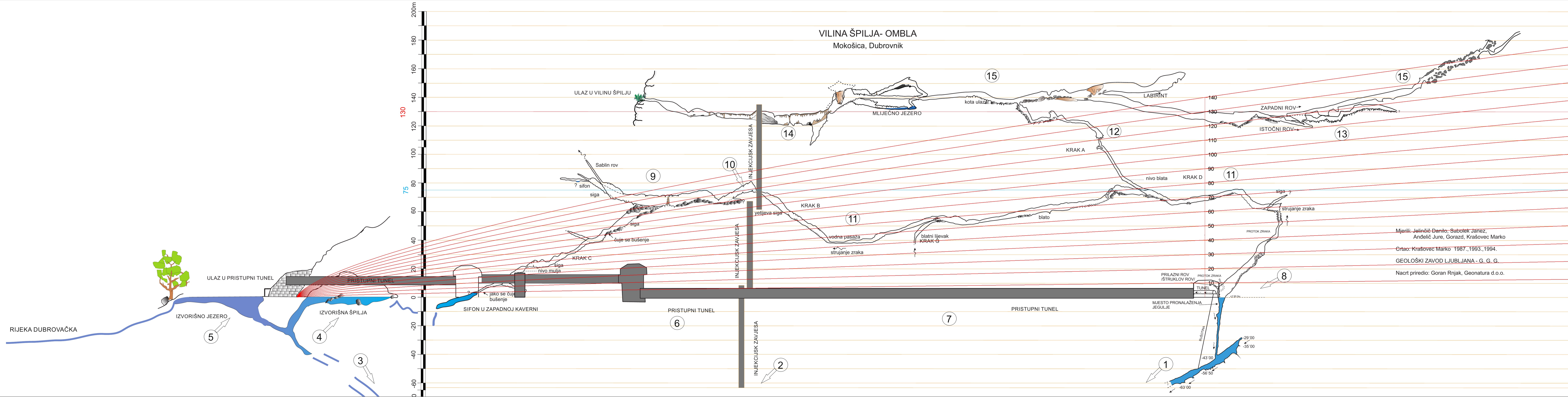


6.1 Prikaz piezometarske linije u sustavu Vilina špilja – izvor Omble



VILINA ŠPILJA- OMBLA

Mokošica, Dubrovnik



Mjerili: Jelinčić Danilo, Sabolek Janež, Anđelić Jure, Gorazd, Krašovec Marko

Crtao: Krašovec Marko 1987., 1993., 1994.

GEOLOŠKI ZAVOD LJUBLJANA - G. G. G.

Nacrt priredio: Goran Rnjak, Geonatura d.o.o.