

# HIDROLOŠKA ANALIZA POJAVE MUTNOĆE NA IZVORIMA U KRŠU: INTERPRETACIJA PODATAKA MJERENIH NA IZVORU OMBLE

prof. emeritus Ognjen Bonacci, dipl. ing. građ.

## 1. UVOD

Cilj, u ovom radu izvršenih analiza, je pokušaj hidrološkog interpretiranja pojave mutnoće vode na krškim izvorima. Radi se o potrebi povezivanja posljedica (naglih promjena mutnoće) s uzrocima koji su ih izazvali, a koji mogu biti vrlo brojni. Neki su prirodni, dok su drugi antropogeni. Danas, kada na područjima krša u cijelom svijetu čovjek poduzima sve češće i sve masovnije, ali slabo ili nikako kontrolirane zahvate, nerijetko dolazi do njihovih interakcija s neočekivanim posljedicama. Podatci mutnoće izmjereni na izvoru Omble poslužiti će kao primjer u interpretiranju opće problematike pojave mutnoće na krškim izvorima. Radi se o problematici o kojoj se nedovoljno zna ne samo u Hrvatskoj, već i mnogo šire.

Bilo bi logično očekivati da su glavni uzroci naglih pojava mutnoće vode bilo kojeg krškog izvora, pa tako i onog izvora Omble, prvenstveno uzrokovani pojavom kratkotrajnih intenzivnih oborina koje izazivaju eroziju materijala na površini sliva i njegovo naglo unošenje u krško podzemlje. Međutim, upravo na primjeru izvora Omble pokazat će se da je problematika mnogo kompleksnija. Istraživanja na nekim drugim krškim izvorima ukazala su da se radi o bitno složenijem procesu (Nebbache et al., 2001.; Massei et al., 2006.; Pronk et al., 2006.) u kojem ključnu ulogu igra nepoznata struktura podzemnih krških oblika (jama, špilja, krških provodnika itd.), razina podzemne vode, ali i brojni drugi prirodni, kao i antropogeni čimbenici i procesi. Kako se radi o mogućem utjecaju velikog i nedovoljno definiranog broja faktora na pojavu mutnoće vode, za pouzdano objašnjavanje bilo bi neophodno raspolagati s adekvatnim kontinuiranim monitoringom brojnih parametara (hidroloških, hidrogeoloških, klimatoloških, pedoloških, agronomskih, vegetacijskih itd.). Ova nužna pretpostavka rijetko je bilo gdje ispunjena, pa je logična posljedica toga da su saznanja o pojavi mutnoće na izvorima u kršu općenito nedovoljna.

U slučaju analiza pojave mutnoće vode na izvoru Omble, izvršenih u ovom radu, nažalost se ni iz daleka

ne raspolaže s dovoljno informacija koje bi omogućile donošenje pouzdanih zaključaka. Raspolagalo se samo s dnevnim vrijednostima mutnoće i protoka izvora Omble i dnevnim oborinama izmjerenim na kišomjernoj postaji Dubrovnik u razdoblju od 1. siječnja 2005. do 31. prosinca 2010. Bez obzira na navedeni nedostatak, došlo se do važnih zaključaka. Stoga autor smatra da je bilo neophodno stručnoj javnosti prezentirati izvršene analize te ukazati na potrebu organiziranja pouzdanog monitoringa ne samo na slivu izvora Omble, već i na brojnim drugim krškim izvorima u Hrvatskoj.

Činjenica je da grad Dubrovnik, koji se snabdijeva vodom iz izvora Omble, nerijetko mora obavještavati građane da vodu ne koriste za piće zbog povećane zamućenosti. U razdoblju povećane zamućenosti vode postoji realna opasnost bakteriološki opasnog zagađenja vode. Izgradnja i funkcioniranje pročištača vode za grad Dubrovnik zasigurno će utjecati na poboljšanje kakvoće vode za piće, ali neće utjecati na smanjivanje mutnoće vode koja iz ovog izvora izbija na površinu i koja nerijetko duž cijelog toka Rijeke Dubrovačke i na ušću u Jadransko more stvara estetski ružnu sliku zamućenja, ali i negativno utječe na ekološki sustav.

Brojni krški izvori u Hrvatskoj i u cijelom svijetu danas se koriste za opskrbu vodom stanovništva, a čini se da je taj trend u porastu. Voda koja iz njih istječe na površinu u našoj državi generalno je dobre kakvoće, tako da je potreba za njenim kondicioniranjem najčešće neznatna. Problemi se javljaju tijekom iznenadnih i naglih pojava velike zamućenosti.

Ovaj rad stoga treba shvatiti kao poticaj na sustavno izučavanje problematike zamućenja ne samo izvora Omble, već i brojnih drugih izvora u kršu iz kojih se naši brojni gradovi i regije snabdijevaju vodom. Očito je da je neophodno bolje shvatiti procese pojave mutnoće na krškim izvorima. Za ispunjavanje tog cilja potreban je nov, interdisciplinarni i kompleksan pristup kao neophodan preduvjet za učinkovito gospodarenje i zaštitu voda krških izvora. Bez detaljnih saznanja o tome što i na koji način

utječe na pojavu naglih porasta mutnoće vode, posebno pojavu onih ekstremnih mutnoća, nije moguće niti poduzeti mjere za, ako ne sprječavanje, onda barem ublažavanje čestih negativnih posljedica kojih nažalost nismo niti dovoljno svjesni. Pri tome treba računati na činjenicu da će klimatske varijacije, sve veće potrebe za vodom, zagađenje okoliša, kao i brojni nekontrolirani antropogeni zahvati u krškim slivovima vjerojatno intenzivirati procese na površini, ali i u podzemlju slivova krških izvora, što će utjecati na intenziviranje ovih opasnih procesa.

## 2. MUTNOĆA VODE, BISTRINA VODE I PRONOS SUSPENDIRANOG NANOSA

Mutnoća fluida može se definirati kao smanjenje prozirnosti otopine zbog prisutnosti suspendiranih i nekih otopljenih supstanci koje uzrokuju da upadajuća svjetlost bude raspršena, reflektirana i oslabljena umjesto da bude odaslana u ravnoj liniji (Ziegler, 2002.). Mutnoća je fenomen u kojem određeni dio zraka svjetlosti prolazeći kroz tekućinu biva skrenut od strane neotopljenih čestica koje se nalaze u njoj. Čimbenici koji utječu na proces zamućenja vode su: (1) koncentracija čestica u vodi, tj. odnos indeksa loma svjetlosti čestice i okolnog medija; (2) veličina čestica; (3) valna duljina ulaznog zračenja. Vrijednost zamućenja ovisi i o orijentaciji čestica u suspenziji kao posljedica činjenice da su čestice različitih oblika, tj. mnoge od njih nisu sferične.

Zamućenost vode javlja se kad sitne suspendirane čestice gline, pijeska, organske i anorganske materije, planktona i drugih mikroskopskih organizama budu pokupljeni vodom tijekom njenog prolaska kroz sliv, kako onaj njegov površinski, tako i onaj podzemni dio. Ključnu ulogu pri zamućenju vode krških izvora igra cirkulacija vode kroz mrežu krških provodnika najrazličitijih dimenzija od onih mikronskih do onih metarskih pa i većih.

Mjerni instrument kojim se mjeri mutnoća naziva se nefelometar. Njime se mjeri intenzitet elastično raspršenog zračenja na česticama u suspenziji pod kutom od uglavnom 90°, na smjer početne zrake svjetlosti. Što je veći intenzitet raspršenosti i slabljenja svjetlosti to je veća vrijednost mutnoće.

Postoji više mjernih jedinica mutnoće. Češće od ostalih koristi se NTU (kratica za engleski naziv „Nephelometric Turbidity Unit” – hrvatski prijevod „Nefelometarska jedinica mutnoće”). Spomenutom jedinicom izražene su i mutnoće vode izvora Omble, čija je analiza izvršena u ovom radu. Osim prethodno navedene jedinice koriste se i još neke druge, kao npr.: (1) FNU-„Formazine Nephelometric Unit”; (2) FTU-„Formazine Turbidity Units”; (3) FAU-„Formazine Attenuation Units”; itd. Neke od spomenutih jedinica daju slične rezultate kao na pr. FTU i NTU. U kanadskim propisima definiran je pojam indeksa mutnoće povezan s NTU jedinicom. Ako je  $NTU < 1$  smatra

se da je indeks mutnoće dobar („good”). U slučaju kad se  $NTU > 5$  smatra se pogodnim („fair”). Ako je  $NTU > 5$  tretira se kao loš („poor”).

Bistrina ili prozirnost („clarity”) vode je mjera koliko duboko svjetlost prodire kroz vodu. Što je dublje prodiranje svjetlosti to je voda bistrija. Davies-Colley i Smith (2001.) naglašavaju činjenicu da je bistrina vode ključan ekološki čimbenik vezan s procesom fotosinteze, a uz to bitno utječe na mogućnost razvoja ribljih vrsta (Holdren, 2002.). Mogućnost prodora svjetlosti u vodu izravno utječe na ekološke aspekte vodnih sustava ([www.https://ngwa.confex.com/ngwa/karst09/webprogram/Paper6117.html](https://ngwa.confex.com/ngwa/karst09/webprogram/Paper6117.html)), ali i na one vezane s rekreacijom i korištenjem voda u turističke svrhe, što je osobito važno imati na umu u turističkoj regiji oko grada Dubrovnika. Vizualna bistrina vode utječe na ponašanje akvatičnih organizama, kao i na čovjekovu percepciju kakvoće vode. Mutnoća vode često se, ali ne i dovoljno kritički, uzima kao mjera za bistrinu vode.

Pošto suspendirane čestice imaju dominantnu ulogu u zamućenju prirodnih voda, logično je fenomen mutnoće vode povezati s količinama pronosa suspendiranog nanosa (Davies-Colley i Smith, 2001.). Korelacija između mutnoće izražene u NTU ili nekim drugim prethodno spomenutim jedinicama koristi se kao učinkovit, ali ne potpuno pouzdan postupak za određivanje (bolje rečeno manje ili više pouzdanu procjenu) koncentracije suspendiranog nanosa u otvorenim vodotocima (Pavanelli i Bigi, 2005.; Chanson et al., 2008.; Susfalk et al. 2008.; Low Hui Xiang Daphne et al., 2011; Line et al., 2013.; Hughes et al., 2014.).

Davies-Colley i Smith (2001.) naglašavaju da je do sada odnos koncepata mutnoće vode i njene bistrine, a osobito njihova veza s količinom prenošenja suspendiranog nanosa, nedovoljno znanstveno objašnjen. Napominju da do danas nije pouzdano određen kvantitativni odnos između ova tri svojstva vode, što bi bilo vrlo bitno s praktičnog aspekta. Zavisnost odnosa koncentracije suspendiranog nanosa i mutnoće postoji, ali je ona promjenjiva tijekom vremena u funkciji brojnih čimbenika. Na nju utječe: (1) veličina protoka; (2) vrijeme proteklo od pojave oborina; (3) intenzitet oborina; (4) dio sliva zahvaćen oborinama; (5) geološka i hidrogeološka svojstva sliva; (6) vegetacijska i pedološka svojstva tla; (7) agrotehničke mjere na slivu; (8) namjena zemljišta na slivu; (9) sezona u godini; (10) klimatski faktori; (11) antropogeni zahvati itd.

Prilikom izučavanja procesa pronosa nanosa tekućom vodom ne smije se zanemariti činjenica da količina suspendiranih čestica u vodi zavisi o tome koliko u određenom trenutku na slivu postoji nataloženog nanosa koji može biti unesen u masu vode i njom transportiran. Intenzivne oborine kratkog trajanja utječu na proces erozije, ispiranja i unosa čestica u podzemlje, ali koliko će stvarno biti uneseno zavisi o tome kakvi su trenutačno uvjeti vladali na dijelu sliva na koji je pala intenzivna

oborina. Ako je taj dio bio pokriven vegetacijom, erozija, ispiranje i unos bit će znatno manji nego u slučaju ako je ista kišna epizoda pala na golo tlo. Uz to se mora imati na umu da površina koju može zahvatiti jedan intenzivni kišni događaj iznosi između 1 km<sup>2</sup> do najviše 10 km<sup>2</sup>. Ako su slivovi znatno veći (kao što je slučaj izvora Omble), tada pojava mutnoće zavisi i o tome na koji je dio sliva pala ta oborina. Prethodno iznesenim objašnjenjima željelo se naglasiti da oborine predstavljaju potencijalno važan čimbenik povećanja mutnoće, smanjivanja prozirnosti i mogućnosti pronosa nanosa, ali da na taj proces istovremeno utječu još i brojni drugi čimbenici.

Primjera radi, navodi se da je izmjereno da kod dugotrajnog beskišnog perioda odnos između mutnoće, NTU, i pronosa suspendiranog nanosa, SN, (izraženog u mg l<sup>-1</sup>) na rijekama u Singapuru bio:

$$SN = (0,3-0,5) \times NTU \quad (1)$$

dok bi kratkotrajno poslije pojave intenzivnih oborina narastao na

$$SN = (3-5) \times NTU \quad (2)$$

Brojni autori, osobito u slučajevima pronosa suspendiranog nanosa u otvorenim vodotocima, pokušavaju dublje shvatiti dinamiku međudnosa mutnoće i količine suspendiranog nanosa, jer smatraju da bi se mjerenjem mutnoće moglo mnogo ekonomičnije doći do relativno pouzdanih vrijednosti koncentracije suspendiranog nanosa (Ziegler, 2002.; Low Hui Xiang Daphne et al., 2011.; Hughes et al., 2014.). Osnovna prednost njihovih napora leži u činjenici da se mutnoća danas može kontinuirano mjeriti na više mjesta i u više profila otvorenih vodotoka, dok je mjerenje suspendiranog nanosa dugotrajan i skup posao.

Suspendirani nanos tvore sitne frakcije čvrstih čestica koje se ne otapaju u vodi, a koje voda transportira kao dvofazni fluid. Ove su čestice u vodi podržane vertikalnim komponentama sila koje postoje u turbulentnom toku. Klasični način mjerenja količina suspendiranog nanosa zasnovan je na uzimanju uzoraka vode i njihovoj filtraciji, što je dugotrajan i relativno skup postupak. U novije vrijeme eksperimentira se s primjenom ADCP („Acoustic Doppler Current Profiler“) uređaja, tj. pronalaze se odnosa između prigušenja ultrazvučnog signala i količina suspendiranog nanosa koje se pronose određenim vodotokom, a koje utječu na prigušenje spomenutog signala (Oskoruš, 2015.).

Ruegner et al. (2013.) su vršili usporedna mjerenje pronosa suspendiranog nanosa, SN, i mutnoće, TSS, na pet bliskih slivova u jugozapadnoj Njemačkoj. Ustanovili su zadovoljavajuću međuzavisnost, uz napomenu da se ona

razlikuje od sliva do sliva, što zavisi o karakteristikama površine sliva.

Hughes et al. (2014.) su istraživali vezu između bistrine vode, mutnoće i pronosa suspendiranog nanosa na rijekama Hoteo i Wairoa (Novi Zeland). Svaki od dva analizirana vodotoka pokazuje drugačije međuovisnosti između tri mjerena parametra. Zaključili su da svojstva pokrovnog tla na slivovima, kao i njihove opće geološke karakteristike bitno utječu na izučavani odnos. Autori sugeriraju da je kontinuiranim mjerenjem optičkih varijabli, kombinirano s povremenim mjerenjem količina suspendiranog nanosa, moguće doći do zadovoljavajućih saznanja o pronosu suspendiranog nanosa.

Uspoređujući mjerenja ukupnog pronosa suspendiranog nanosa, SN, s mjerenjima vizualne bistrine vode i mutnoće, na brojnim rijekama u Novom Zelandu utvrđena je visoka međuzavisnost između ta tri parametra (Ballantine et al., 2014.). Na pojedinim mjestima ovaj je međudnos omogućio dovoljno precizno određivanje ukupnog pronosa suspendiranog nanosa, SN, koristeći jeftinije načine mjerenja, prije svega, kontinuirana mjerenja mutnoće, nego skupa mjerenja koncentracije suspendiranog nanosa. U Novom Zelandu se već duže od 25 godina parametar bistrine rutinski mjeri i koristi kao pokazatelj kakvoće vode, a ide se za tim da ga se koristi i za procjenu ukupnog pronosa suspendiranog nanosa.

Mutnoća predstavlja značajan izvor degradiranja kakvoće vode. S aspekta zaštite kakvoće vode treba imati na umu da je transport hidrofobnih organskih zagađivača povezan s transportom suspendiranih čestica. Osobito treba voditi računa da je taj transport u uvjetima krških terena mnogo brži, teže predvidljiv nego u granuliranim sredinama.

### 3. SPECIFIČNOSTI KRŠA SA STANOVIŠTA POJAVE MUTNOĆE VODE I PRONOSA SUSPENDIRANOG NANOSA

Proces cirkulacije vode u prostorima krša izrazito je kompleksan. To je posljedica postojanja brojnih složenih površinskih, a osobito nepoznatih podzemnih krških oblika. Interakcija površinskih i podzemnih voda u prostoru krša međusobno je snažno uvjetovana. Složene, podložne stalnim i brzim promjenama, uz to i nepoznate veze među raznolikim krškim oblicima utječu na sve procese vezane s kretanjem vode unutar krških prostora. Izravno se odražavaju ne samo na promjenu količina vode koja izbija na površinu iz krških izvora, već i na sve ostale karakteristike vode, pa tako i na njenu mutnoću, bistrinu i količinu pronosa suspendiranog nanosa.

U nekrškim terenima razina mutnoće je uobičajeno veća u vodi koja dotječe s površine nego iz podzemlja. U krškim terenima situacija je bitno drugačija. Osnovni razlog leži u činjenici složene strukture krškog podzemlja u kojem postoje brojni i prostrani podzemni prostori u kojima je moguće akumuliranje značajnih količina

sitnih čestica koje u određenim uvjetima mogu biti brzo transportirane kroz prostrane krške provodnike do izlaznih otvora krških izvora.

Ekstremna složenost, brze i nagle promjene procesa otjecanja, nepoznavanje strukture podzemnih veza i kao posljedica toga nemogućnost dovoljne izučenosti cirkulacije vode u kršu osobito se manifestira na pojave mutnoće vode na krškim izvorima (Nebbache et al., 2001.; Massei et al., 2006.; Pronk et al., 2006.).

Na velikoj većini izvora u kršu maksimalni protok koji potencijalno pronosi i maksimalne količine suspendiranog nanosa ograničen je zbog niza karakteristika tečenja vode u krškim uvjetima kao što su npr.: (1) ograničene dimenzije izlaznog otvora; (2) tečenje pod tlakom; (3) skladištenje vode u vadoznoj zoni; (4) prelijevanje vode iz jednog sliva u susjedne slivove; (5) pojave sifona; (6) retencioniranje podzemne vode u špiljama velike zapremine itd. (Bonacci, 2001.). Navedeni razlozi zasigurno, i to na vrlo različite načine, utječu i na pojavu i promjene koncentracije suspendiranih čestica tijekom vremena, a time i na mutnoću i bistrinu vode te u konačnici i na količinu pronosa suspendiranog nanosa.

Površinska topografija i podzemna geomorfologija krških slivova bitno utječu na procese formiranja, deponiranja i transporta suspendiranog nanosa. Nebbache et al., (2001.) naglašavaju da su ti procesi osobito složeni u krškim terenima koji imaju strme padine i čija je površina terena osjetljiva na vodnu i eolsku eroziju. Na povećanje mutnoće vode posebno snažan utjecaj mogu imati šumski požari koji su inače česti u prostorima mediteranskog krša, pa prema tome i na slivu Omble. Požari, koji se najčešće javljaju ljeti, uzrokuju degradaciju vegetacijskog pokrova, što kao posljedicu ima ekstremno povećanje erozije terena prilikom padanja prvih jesenskih kiša.

Antropogeni utjecaji, prije svega veliki zemljani radovi na površini terena, bušenja i injektiranja materijala u krško podzemlje, masovne agrotehničke mjere mogu uzrokovati povećanje mutnoće, tj. porast količine suspendiranog nanosa na izvorima u kršu (Low Hui Xiang Daphne et al., 2011.).

U posljednjih nekoliko desetljeća na krškim terenima se kao agrotehnička mjera koristi masovno čišćenje kamenja i suhozidova („stone clearing“) (Conora et al., 2008.). Praksa je pokazala da je taj zahvat rezultirao s mnogo više štete od koristi. Od 1980. do 2003. godine na čak 40 % površine karbonatne formacije južne Murgia-e (Italija) razdobljeno je kamenje te je uništen sustav suhozidova star više stotina godina koji je sprječavao eroziju, služio za zadržavanje vlage, te kao stanište za brojne biljne i životinjske vrste. Došlo je do povećanja erozije terena i zagađenja krškog vodonosnika koji je u prirodnom stanju bio čist. Zagađen je priobalni dio Jadranskog mora jer se poslije intenzivnih oborina u njega transportiraju velike količine suspendiranog nanosa kroz brojne stalne i povremene krške izvore. Zbog uništavanja suhozidova i time uzrokovane erozije isprani su slojevi plodnog

površinskog tla tako da farmeri moraju dovoziti novo tlo kako bi mogli osigurati poljoprivrednu proizvodnju. Osim toga, intenzivna poljoprivredna proizvodnja koja koristi velike količine umjetnih gnojiva utjecala je na zabrinjavajuće zagađenje vode u podzemnom krškom vodonosniku koji je ključan za opskrbu vodom cijele regije.

Anderson (2015.) naglašava da je pojava naglog povećanja koncentracije suspendiranih čestica manifestiranog zamućenjima podzemne vode krških vodonosnika Velike Britanije česta, ali da je taj proces nedovoljno izučen. Terenskim mjerenjima i analizama njihovih rezultata je utvrđeno da su porijeklo i uzroci povećanja koncentracije suspendiranih čestica u prostorima krša Velike Britanije mnogo složeniji nego u njenim nekrškim terenima. Prije ovih detaljnih istraživanja općenito se vjerovalo da je i u kršu nagli porast koncentracije suspendiranih čestica prvenstveno uzrokovan pojavom intenzivnih oborina. Detaljnije analize su pokazale da to predstavlja jedan od razloga koji često nije najvažniji. Utvrđeno je da ključnu ulogu mogu igrati brojni drugi uzroci, a prije svega: (1) nagle promjene razina podzemne vode i njihov raspon koji može prelaziti i 100 m; (2) izvori suspendiranih čestica koji mogu biti na površini terena, ali i u krškom podzemlju (što je najčešće nemoguće locirati); itd.

Geneza, tj. porijeklo i transport suspendiranih čestica u kršu posljedica su složene površinske, a osobito nepoznate podzemne strukture krša. Drugi bitni razlog složenosti ovog procesa leži u funkcioniranju dualne poroznosti krša koja utječe na istovremeno postojanjem brzog turbulentnog tečenja kroz velike krške provodnike (tečenje može biti pod tlakom i sa slobodnim vodnim licem, a kratkotrajno može dosegnuti brzine veće od 5 m s<sup>-1</sup>) i difuznog laminarnog, vrlo sporog tečenja kroz kršku matricu. Većina transporta podzemnih voda u kršu vrši se kroz velike krške provodnike brzim turbulentnim tečenjem, dok je najveći dio mase akumulirane vode (više od 95 %) uskladišten unutar krške matrice.

Površinske vode sa suspendiranim česticama erodiranim s površina krških terena izravno i brzo prodiru u krški vodonosnik kroz brojne pukotine različitih dimenzija (Ford i Williams, 2007.; Kaufmann i Braun, 2000.). Unutar krškog vodonosnika one se pronose kroz mrežu krških kanala različitih dimenzija, ali se povremeno i talože unutar špilja ili većih krških prostora. Nerijetko se događa da suspendirane čestice začepi pojedine provodnike te na taj način utječu na nagle promjene procesa cirkulacije vode u krškim vodonosnicima. Uz to se ne smije zanemariti činjenica da je proces karstifikacije u geološkom smislu vrlo brz. Za manje od stotinjak godina podzemna struktura krša se značajno i relativno naglo mijenja (zatvaraju se postojeći, a otvaraju novi krški provodnici), što može trenutačno i bitno utjecati na promjenu procesa geneze i transporta suspendiranih čestica kroz taj prostor (Ford i Williams, 2007.).

Porast razina podzemne vode u kršu može biti vrlo brz. U par sati razina podzemne vode može se dići i za



više od 100 m, što rezultira velikim i naglim porastom hidrostatskog pritiska u krškom vodonosniku. Posljedica toga nerijetko je izbacivanje čepova u podzemlju nataloženog materijala te stavljanje u funkciju fosilnih, tj. neaktivnih provodnika (Bonacci, 1995.; Bonacci et al., 2009.; Bonacci i Roje-Bonacci, 2012.). Ovi procesi mogu uzrokovati nagli porast mutnoće vode krških izvora. Naglo dizanje razine podzemne vode može biti izazvano intenzivnim oborinama kratkog trajanja, ali i antropogenim radovima, kao npr. gradnjom injekcijskih zavjesa (Bonacci et al., 2009.; Bonacci i Roje-Bonacci, 2012.).

Povećanje hidrostatskog pritiska nerijetko uzrokuje izbijanje čepova stvorenih u krškim provodnicima, ali i naglo pokretanje mase nanosa nataloženog u spiljama tijekom dugog razdoblja. Ti se procesi manifestiraju naglim povećanjem mutnoće vode koja izbija na površinu kroz krške izvore. S druge strane pretjerano crpljenje podzemnih voda uzrokuje snižavanje razine vode u regionalnim vodonosnicima koje može biti znatno te veće od 10 m. Time se u krškom podzemlju otvaraju novi prostori za odlaganje materijala erodiranog s površine terena, ali se istovremeno za transport otvaraju prostori davno nataloženih slojeva koji mogu biti toksični i kancerogeni, jednom riječju opasni za ljudsko zdravlje i okoliš.

Anderson (2015.) je detaljnim monitoringom transporta sedimenata kroz podzemlje krških područja Velike Britanije ustanovio da oni na svom složenom i nepoznatom putu (a time ga je nemoguće kontrolirati) apsorbiraju teške metale, radioaktivne minerale, toksične organizme i mikrobiološke vrste. Prema tome, podzemne krške vode u suspenziji ne pronose samo bezopasne i često hranjive minerale koji stvaraju vizualno neugodnu mutnu vodu. Problemi mogu biti i značajno ozbiljniji jer neki sastojci mogu biti vrlo opasni zagađivači vode koja se koriste za piće ili neku drugu vrstu upotrebe. Zbog toga analizi i kontroli mutnoće i pronosa suspendiranog nanosa u krškim terenima treba posvetiti mnogo veću pažnju od one koja joj se danas pridaje. Taj se zaključak ne odnosi samo na našu zemlju, već vrlo vjerojatno i mnogo više na sve krške terene na planeti.

Dodatan problem predstavlja činjenica što su čestice koje se nalaze u zamućenoj vodi iz podzemlja krša vrlo sitne te ih je teško ili čak i nemoguće odstraniti uobičajenim procesima koagulacije i/ili filtracije. Alternativni procesi tretiranja ovih voda su značajno skuplji. Anderson (2015.) stoga upozorava na žurnu potrebu detaljnijeg izučavanja geneze i transporta sedimenta kroz podzemlje krša s ciljem da se nađu učinkovitija i jeftinija rješenja kontrole kvalitete ovih voda.

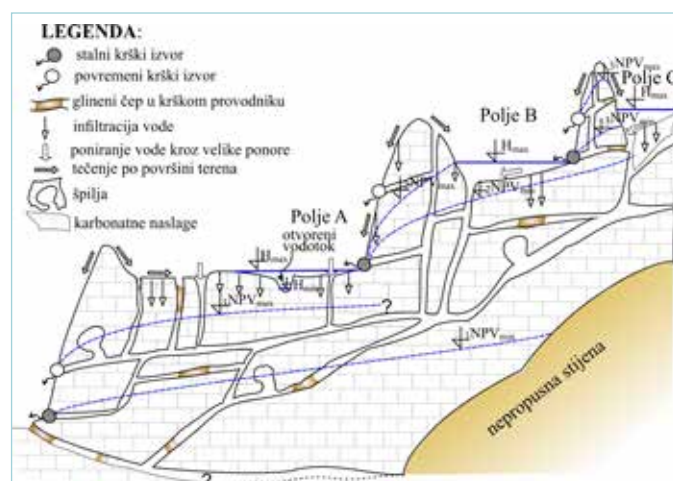
Pronk et al. (2007.) su mjerenjima mutnoće na nekoliko krških izvora u području Yverdon (Švicarska) utvrdili pojavu više vrhova mutnoće. Pojava prvog vrha, koji nema nužno i maksimalnu koncentraciju (nazvan primarnim), koincidira s pojavom maksimalnog protoka. Spomenuti autori smatraju da geneza te mutnoće potječe iz autohtonog dijela sliva koji je bliži otvoru

izvora. Sekundarni vrh javlja se nešto kasnije, što autore navodi na zaključak da bi porijeklo tih čestice moglo biti iz alohtonog dijela sliva. Moguće je da se radi o česticama ispranim s površine i u krško podzemlje unesenim kroz brojne ponore iz udaljenog dijela sliva ili česticama koje su u sliv razmatranog izvora unesene prelijevanjem iz susjednih ili udaljenih slivova krških izvora. Mikrobiološkim analizama ustanovili su da velik dio bakteriološkog zagađenja vode krških izvora dolazi iz ponora koji se nalaze na alohtonom području.

Nebbache et al. (2001.) su vršeci mjerenja mutnoće u području krša na sjeveroistoku Francuske (sliv rijeke Brionne) zaključili da je naglo povećanje mutnoće na izvorima u toj regiji općenito uzrokovano intenzivnim kišnim epizodama koje uzrokuju nagli dotok velikih količina vode u brojne ponore. Voda s površine nosi velike količine erodiranog materijala te ih kroz sustav ponora izravno unosi u krški vodonosnik (Kaufmann i Braun, 2000.).

Na slici 1 shematski je prikazano funkcioniranje krškog sustava prilagođeno za objašnjavanje mogućih dotoka suspendiranih čestica do krških izvora lociranih na različitim nadmorskim visinama. Ovim se prikazom željelo ukazati na specifičnost otjecanja vode u Dinarskom kršu koja je najintenzivnije izražena upravo na slivu Omble. Radi se o tome da u slivu postoje brojna krška polja kaskadno poredana od nadmorskih visina većih od 1000 m n.m. do praktično razine Jadranskog mora. Dotok vode, a s njom i suspendirane čestice iz viših horizonata pod izravnim je i stalno promjenjivim utjecajem razina podzemnih voda ovog kompleksnog sustava. Voda i s njom donesene suspendirane čestice mogu praktično biti u sustav unesene u bilo kojem od njenih dijelova.

Treba naglasiti da su u stvarnosti procesi čak i bitno složeniji od onih prikazanih na slici 1. Stoga će nastavno biti iznesena dodatna objašnjenja. Površina sliva u kršu stalno se mijenja pod utjecajem naglih promjena razina



Slika 1 Shematski prikaz funkcioniranja krškog sustava prilagođen za objašnjavanje mogućih dotoka suspendiranih čestica na krške izvore

podzemne vode uzrokovanih intenzivnim oborinama palim na pojedine dijelove sliva, ali sve češće i antropogenim radovima. Vrlo česti antropogeni zahvati u kršu su: (1) bušenja tunela; (2) izgradnja brana i akumulacija; (3) izgradnja autocesta i industrijskih postrojenja; (4) urbanizacija; (5) prenamjena zemljišta, najčešće vezana s intenziviranjem poljoprivredne proizvodnje na velikim površinama (masovno čišćenje kamena i uklanjanje suhozidova) (Conora et al., 2008.); itd. Pri tome dodatne i neshvaćene velike probleme predstavlja činjenica da su procesi koje uzrokuju antropogeni zahvati potpuno neusklađeni i nekontrolirani. Događa se da tek nakon nekog vremena (može biti i relativno dugo) njihove krajnje negativne posljedice izbiju na površinu. Tada je problematično pouzdano ustanoviti razloge njihove pojave, a obično je nemoguće učinkovito ih spriječiti, pa čak i sanirati.

#### 4. ANALIZA MUTNOĆE VODE IZVORA OMBLE

Sve prethodno navedeno osobito se snažno javlja u Dinarskom kršu, a posebno u slučaju sliva izvora Omble. Nastavno će biti obrađeni podatci dnevnih mutnoća ovog velikog krškog izvora mjereni u razdoblju od cjelovitih 6 godina (2005.–2010.). Sretna je okolnost da su se u tom razdoblju pojavile hidrološki vrlo različite godine. Najsušnija je bila 2007. godina, dok je 2010. bila jedna od najvlažnijih godina u cijelom razdoblju hidroloških mjerenja koja postoje na izvoru Omble od 1968. do 2014. godine.

Krški izvor Omble na površinu izbija na nadmorskoj visini od 2,5 m n.m. te se odmah preko preljeva ulijevaju u duboki zaljev Jadranskog mora nazvan Rijeka Dubrovačka. Minimalni protok je procijenjen na iznos od  $4,30 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ , dok je maksimalni protok procijenjen na  $117 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  (Bonacci et al., 2014.). Stabilnost i visoka vrijednost minimalnih protoka koje istječu i nakon dugotrajnih sušnih razdoblja navode na zaključak da se izvor Omble prihranjuje iz prostranog i vodom bogatog krškog vodonosnika. S druge strane niska vrijednost maksimalnih protoka ukazuje na to da se radi o tipičnom krškom izvoru s ograničenim maksimalnim kapacitetom istjecanja (Bonacci, 2001.). Srednji protok u prirodnom stanju u razdoblju opažanja od 1968. do 1980. iznosio je  $28,01 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Od 1981. do 2012. (bez 1991.–1992.), dakle u razdoblju kada je korito rijeke Trebišnjice, koja protječe kroz njegov sliv, regulirano i pretvoreno u betonski kanal u dužini od preko 60 km, srednji se godišnji protok smanjio za  $4,29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$  na vrijednost od  $23,71 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Kako je taj zahvat utjecao na promjenu mutnoće izvora nije poznato, jer o tome tada nitko nije vodio računa, ali je sigurno da je utjecaj postojao.

Granice i površina sliva izvora Omble nisu pouzdano određeni. Procjene zasnovane na hidrološkoj bilanci voda su da je površina sliva Omble promjenjiva tijekom vremena u zavisnosti od nepoznatih razina podzemne

vode. Bonacci et al. (2014.) su korištenjem hidroloških metoda procijenili da se površina sliva kreće između  $850 \text{ km}^2$  i  $1060 \text{ km}^2$ . Milanović (1996.) je na osnovi isključivo geološko-hidrogeoloških analiza zaključio da je ona nešto manja te da iznosi oko  $600 \text{ km}^2$ .

Bez obzira na to tko je u pravu, radi se o velikoj površini na kojoj je raspored padanja oborina vrlo različit. Prosječne godišnje oborine mjerene u Dubrovniku iznose u razdoblju 1960.–2012. 1140 mm. Na samo 7 km udaljenom kišomjeru Vuković prosječna godišnja oborina veća je za oko 600 mm (više od 50 %). Na kišomjeru Hum, udaljenom od Dubrovnika 12,5 km, prosječne godišnje oborine veće su za oko 900 mm (više od 75 %). U Trebinju su godišnje oborine veće nego u Dubrovniku za oko 550 mm. Očigledno je da faktori orografije i udaljenosti od mora igraju značajnu ulogu na prosječne količine oborina koje padnu na prostor sliva krškog izvora Omble. Situacija s intenzivnim oborinama koje imaju ključni utjecaj na pojavu mutnoće bitno je složenija od one prethodno opisane koja se odnosi na prosječne godišnje oborine pale u raznim točkama sliva Omble.

Denić-Jukić et al. (2012.) su analizirali dinamiku pojave mutnoće na izvoru Omble koristeći isti niz podataka koji je analiziran i u ovom radu. Naglasili su da su hidrogeološke karakteristike krških terena bitno složenije i značajno različite od karakteristika granuliranih sredina, što značajno utječe na sve procese koji se zbivaju u tom prostoru, a osobito se to manifestira u pojavama mutnoće vode krških izvora. Po njima ključnu ulogu na složenost procesa cirkulacije vode u kršu, a time i na pronos suspendiranih čestica kroz medij krša igraju: (1) brojne krške prsline i pukotine; (2) krški provodnici s različitim i naglo promjenjivim dimenzijama; (3) pojava nepropusnih i slabije propusnih slojeva; (4) rasjedi koji mogu biti hidrogeološki vrlo aktivni, a u slučaju da su zapunjeni glinovitim materijalima mogu predstavljati hidrogeološke barijere; (5) pojava špilja koje mogu biti fosilne, ali i aktivne, što zavisi u kojem se području krša nalaze; (6) promjenjiv odnos i nagle varijacije vadozne i freatične zone itd. Sve navedeno, a vrlo vjerojatno i neki drugi fenomeni, utječu na kreiranje značajnih prostornih i vremenskih varijacija i diskontinuiteta hidrauličkih i geometrijskih parametara podzemnog krškog sustava izvora Omble.

Prije nego što se iznesu te prokomentiraju rezultati analize mutnoće izvora Omble, treba napomenuti da su u njegovom slivu posljednjih nekoliko godina izvršeni (vrše se i danas) veliki i raznoliki antropogeni zahvati. Grade se tzv. gornji horizonti (Makropoulos et al., 2008.), obnavlja se injekcijska zavjesa ispod brane HE Gorica (Zubac i Bošković, 2012.), širi se i urbanizira grad Trebinje, osvajaju se nove poljoprivredne površine (osobito vinogradi), itd. Svi ti zahvati i brojni drugi o kojima ne raspoložemo niti s najosnovnijim informacijama mogli su i mogu u budućnosti utjecati na promjenu režima mutnoće i količinu suspendiranog nanosa koji izbija kroz otvor izvora Omble.

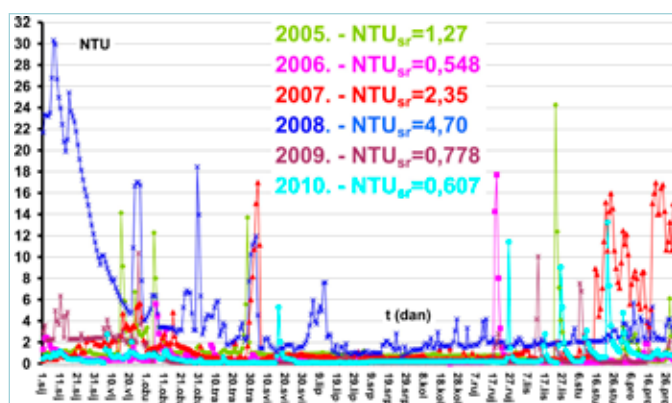
**Tablica 1** Prosječne godišnje vrijednosti mutnoće vode izvora Omble,  $NTU_{sr}$ , godišnje oborine Dubrovnika,  $P_{DUBROVNIK}$ , te prosječni godišnji protoci izvora Omble,  $Q_{OMBLA}$ , u razdoblju 2005.-2010.

Godina	$NTU_{sr}$	$P_{DUBROVNIK}$ (mm)	$Q_{OMBLA}$ (m <sup>3</sup> /s)
2005.	1,27	1276	25,9
2006.	0,548	1190	25,6
2007.	2,35	958	20,4
2008.	4,70	872	20,6
2009.	0,778	1590	30,2
2010.	0,607	1722	42,9

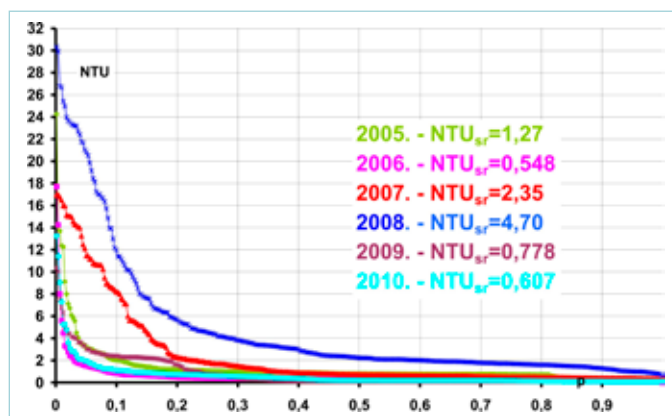
Na slici 2 nalazi se grafički prikaz dnevnih vrijednosti mutnoća, NTU, izmjerenih na izvoru Omble u razdoblju od 1. siječnja 2005. do 31. prosinca 2010. Uočava se velika razlika u srednjim godišnjim vrijednostima mutnoća tijekom šest raspoloživih godina. U tablici 1 upisane su prosječne godišnje vrijednosti mutnoće vode izvora Omble,  $NTU_{sr}$ , godišnje oborine Dubrovnika,  $P_{DUBROVNIK}$ , te prosječni godišnji protoci izvora Omble,  $Q_{OMBLA}$ , u razdoblju 2005.-2010. Treba uočiti da prosječne godišnje vrijednosti mutnoće,  $NTU_{sr}$ , nisu ni u kakvoj korelaciji ni s prosječnim godišnjim protocima izvora Omble,  $Q_{OMBLA}$ , niti s godišnjim oborinama izmjerenim na meteorološkoj postaji Dubrovnik,  $P_{DUBROVNIK}$ . Dok se nepovezanost mutnoće i oborina može donekle opravdati činjenicom da godišnje oborine pale u Dubrovniku nisu dovoljno reprezentativne za cijeli veliki sliv Omble, to se ne može tvrditi za srednje godišnje protoke. Neke pouzdanije zaključke iz ovih podataka nije preporučljivo donositi i zbog činjenice što se radi o nedovoljno velikom uzorku od samo šest godina. Ipak, treba uočiti da je 2010. godine, koja je bila jedna od najvlažnijih u povijesti motrenja na izvoru Omble, srednja mutnoća bila vrlo niska, dok je u sušnoj 2008. godini bila najviša i to skoro osam puta veća od 2010. godine, kada je srednji godišnji protok bio dva puta veći.

Slika 3 prikazuje krivulje trajanja dnevnih vrijednosti mutnoća, NTU, izmjerenih na izvoru Omble u razdoblju 2005.-2010. Na njoj je još uočljivija razlika mutnoća po pojedinim godinama, što je dodatno potvrđeno vrijednostima iznesenim u tablici 2 u kojoj je upisan broj dana godišnje s mutnoćom, NTU, manjom ili većom od graničnih vrijednosti prema kanadskim propisima. Treba uočiti da su u dvije najsušnije godine razmatranog razdoblja (2007. i 2008.) indeksi mutnoće  $NTU > 5$ , pojavili u čak 53 dana ili 14,5 % 2007. godine, te 81 dan ili 22,1 % 2008. godine. U najvlažnijoj 2010. godini vrijednost  $NTU > 5,0$  pojavila se samo 6 dana ili 1,7 % godine.

U tablici 3 upisane su vrijednosti broja dana godišnje s mutnoćom,  $NTU > 4,0$ , dakle većom od dozvoljenog zamućenja pitke vode prema hrvatskim propisima. Vrijednosti se kreću u velikom rasponu od minimalno 6 dana 2006. godine do maksimalno 105 dana godišnje 2008. godine.



**Slika 2** Grafički prikaz dnevnih vrijednosti mutnoća, NTU, izmjerenih na izvoru Omble u razdoblju od 1. siječnja 2005. do 31. prosinca 2010.



**Slika 3** Godišnje krivulje trajanja dnevnih vrijednosti mutnoća, NTU, izmjerenih na izvoru Omble u razdoblju 2005.-2010.

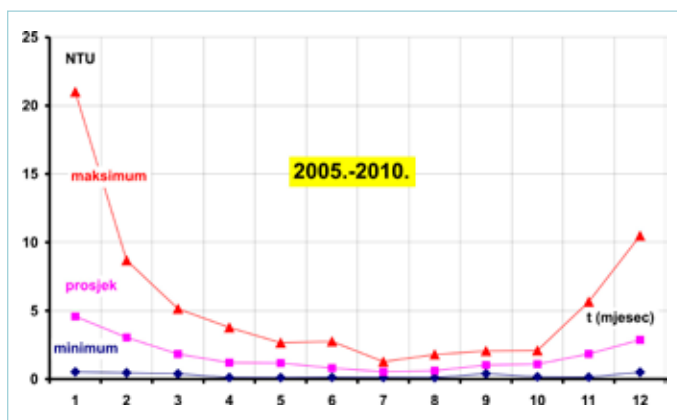
**Tablica 2** Broj dana godišnje s mutnoćom, NTU, manjom i/ili većom od graničnih vrijednosti prema kanadskim propisima

GODINA	NTU < 1,0		1,0 < NTU < 5,0		NTU > 5,0	
	dana	% godine	dana	% godine	dana	% godine
2005.	252	69,0	101	27,7	12	3,3
2006.	334	91,5	27	7,4	4	1,1
2007.	232	63,6	80	21,9	53	14,5
2008.	19	5,2	266	72,7	81	22,1
2009.	280	76,7	80	21,9	5	1,4
2010.	322	88,2	37	10,1	6	1,7

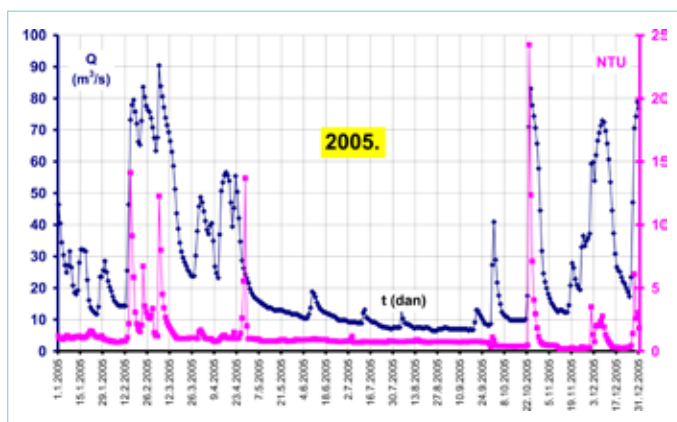
**Tablica 3** Broj dana godišnje s mutnoćom, NTU, većom od dozvoljenog zamućenja pitke vode prema hrvatskim propisima ( $NTU > 4,0$ )

GODINA	NTU > 4,0	
	dana	% godine
2005.	14	3,8
2006.	6	1,6
2007.	57	15,6
2008.	105	28,7
2009.	12	3,2
2010.	7	1,9

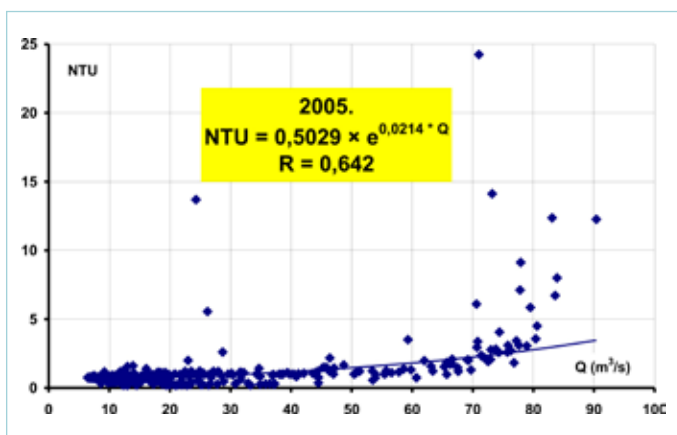
Sve prethodne analize ukazuju na činjenicu da u slučaju izvora Omble (barem za šest godina za koje se raspolagalo s podacima) ključnu ulogu u pojavi mutnoće ne igraju ni oborine pale na sliv (osobito one mjerene na meteorološkoj postaji Dubrovnik), niti protoci izvora Omble.



Slika 4 Grafički prikaz karakterističnih (minimalnih, prosječnih i maksimalnih) mjesečnih vrijednosti mutnoće, NTU, izmjerene na izvoru Omble u razdoblju 2005.-2010.



Slika 5 Usporedni grafički prikaz srednjih dnevnih protoka, Q, i dnevnih mutnoća, NTU, izmjerene na izvoru Omble u razdoblju od 1. siječnja do 31. prosinca 2005.



Slika 6 Grafički prikaz odnosa dnevnih vrijednosti mutnoće, NTU, u zavisnosti od srednjih dnevnih protoka, Q, izvora Omble tijekom 2005. godine s ucrtanom krivuljom eksponencijalne zavisnosti i indeksom korelacije

Na slici 4 grafički su prikazane karakteristične (minimalne, prosječne i maksimalne) mjesečne vrijednosti mutnoće, NTU, izmjerene na izvoru Omble u razdoblju 2005.-2010. Iz ovog je prikaza moguće zaključiti da se mutnoća vode, NTU >4,0, na izvoru Omble javljaju isključivo u hladnom dijelu godine od studenog do ožujka.

Na slici 5 nalazi se usporedni grafički prikaz srednjih dnevnih protoka, Q, i dnevnih mutnoća, NTU, izmjerene na izvoru Omble u razdoblju od 1. siječnja do 31. prosinca 2005., dakle tijekom jedne cjelovite godine. Iz ovog se prikaza može zaključiti da nagla povećanja mutnoće vode u pojedinim situacijama prate povećani protok iz izvora dok u drugim situacijama to nije slučaj. Kako bi se bolje izučila interakcija mutnoće s protocima vode, na slici 6 grafički je prikazan odnos dnevnih vrijednosti mutnoće, NTU, u zavisnosti od srednjih dnevnih protoka, Q, izvora Omble tijekom 2005. godine s ucrtanom krivuljom eksponencijalne zavisnosti definiranom metodom najmanjih kvadrata i indeksom eksponencijalne korelacije, R. Vrijednost indeksa relativno je visoka i statistički značajna te iznosi, R=0,642. Očito je da većim protocima odgovaraju i veće mutnoće vode, ali se nagla povećanja mutnoće mogu dogoditi i kod relativno manjih protoka.

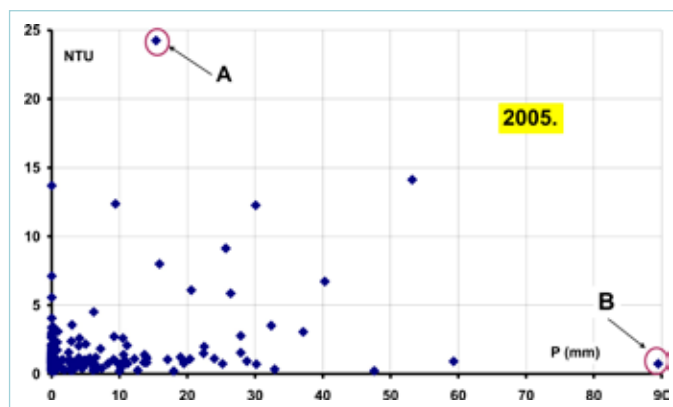
Na slici 7 nalazi se grafički prikaz odnosa dnevnih vrijednosti mutnoće, NTU, izvora Omble u zavisnosti od dnevnih oborina, P, izmjerene na meteorološkoj postaji Dubrovnik tijekom 2005. godine. Iz prikaza se jasno uočava da ne postoji međuzavisnost između oborina koje su pale u Dubrovniku i pojave mutnoće na izvoru Omble. To je moguće bar donekle objasniti činjenicom da se meteorološka postaja Dubrovnik nalazi na samom rubu prostranog i nedovoljno definiranog sliva Omble u neposrednoj blizini izvora te prema tome nije dovoljno dobar reprezentant oborinskog režima koji se na prostranom slivu javlja. Posebno je zanimljivo uočiti te prokomentirati dvije točke označene s A i B na slici 7. U slučaju točke A oborina u Dubrovniku je iznosila samo P=15,4 mm, ali je mutnoća bila maksimalna te godine te je iznosila NTU=24,3. Obratna se situacija dogodila kod točke B kada je oborina u Dubrovniku bila velika te je iznosila, P=89,5 mm, a mutnoća, NTU=0,73 je bila neznčajna. Bez dostatnih i to vrlo brojnih informacija do kojih nije bilo moguće doći, ako ih uopće i ima nemoguće je dati detaljna i pouzdana objašnjenja ovih fenomena

Međutim, očigledno je da na nagli porast mutnoće u vodi izvora Omble snažan utjecaj vrše ne samo oborine, već i brojni drugi čimbenici. To se očigledno može primijetiti iz prikaza koji je dan na slici 8 na kojoj su usporedno grafički prikazani srednji dnevni protoci, Q, dnevne mutnoće, NTU, izmjerene na izvoru Omble i dnevne oborine, P, izmjerene na meteorološkoj postaji

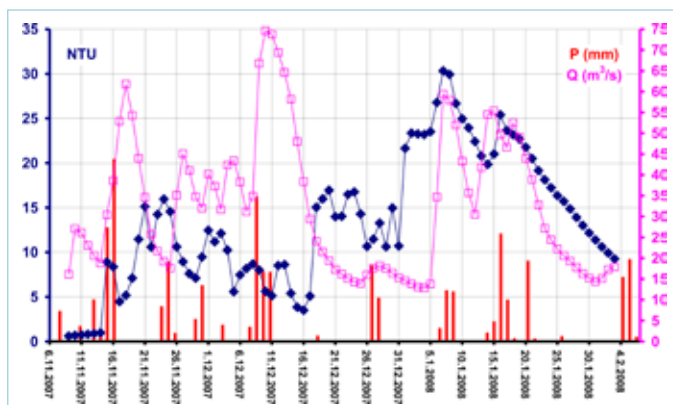


Dubrovnik u razdoblju od 6. studenog 2007. do 6. veljače 2008. Radi se o razdoblju trajanja oko četiri mjeseca kad su na izvoru opažene najveće mutnoće tijekom raspoloživih šest godina. Tijekom cijelog tog razdoblja NTU je bio veći od 5, što znači da je indeks mutnoće pokazivao lošu kvalitetu vode izvora Omble. Autor će biti slobodan iznijeti pretpostavku da je mogući razlog tako dugog razdoblja visokih mutnoća potrebno tražiti u antropogenim zahvatima koji su se u to doba vršili na slivu. Pri tome se ne smije nikako zanemariti i brojne druge prirodne utjecaje.

Da bi se ukazalo na složenost odnosa mutnoća vode izvora Omble s protocima izvora i oborinama Dubrovnika u [tablicama 4 i 5](#) dano je nekoliko karakterističnih primjera. U [tablici 4](#) navedeno je deset najvećih dnevnih mutnoća, NTU, opaženih na izvoru Omble u razdoblju 2005.-2010. s datumima pojave i dnevnim oborinama izmjerenim na meteorološkoj postaji Dubrovnik,  $P_{DUBROVNIK}$  i srednjim dnevnim protocima izvora Omble,  $Q_{OMBLA}$ . Niti u jednom od deset navedenih slučajeva oborine Dubrovnika nisu bile visoke. Očito je da bi za kontrolu mutnoće voda izvora Omble bilo potrebno da grad Dubrovnik instalira nekoliko automatskih registratora oborina na slivu. Problem je da se oni moraju nalaziti na području druge države. U [tablici 5](#) nalaze se podaci za četiri karakteristična slučaja odnosa mutnoće, NTU, i dnevnih oborinama izmjerenih na meteorološkoj postaji Dubrovnik,  $P_{DUBROVNIK}$ , te srednjih dnevnih protoka izvora Omble,  $Q_{OMBLA}$ . Podatci izneseni u [tablici 5](#) samo potvrđuju sve što je prethodno izneseno.



Slika 7 Grafički prikaz odnosa dnevnih vrijednosti mutnoće, NTU, izvora Omble u zavisnosti od dnevnih oborina, P, izmjerenih na meteorološkoj postaji Dubrovnik tijekom 2005. godine



Slika 8 Usporedni grafički prikaz srednjih dnevnih protoka, Q, dnevnih mutnoća, NTU, izmjerenih na izvoru Omble i dnevnih oborina, P, izmjerenih na meteorološkoj postaji Dubrovnik u razdoblju od 6. studenog 2007. do 6. veljače 2008.

Tablica 4 Deset najvećih srednjih dnevnih mutnoća, NTU, opaženih na izvoru Omble u razdoblju 2005.-2010. s datumima pojave i dnevnim oborinama izmjerenim na meteorološkoj postaji Dubrovnik,  $P_{DUBROVNIK}$  i srednjim dnevnim protocima izvora Omble,  $Q_{OMBLA}$

R. br.	NTU	datum	$P_{DUBROVNIK}$ (mm)	$Q_{OMBLA}$ (m <sup>3</sup> /s)
1.	30,3	7. I. 2008.	12	59,4
2.	29,9	8. I. 2008.	0,2	58,0
3.	26,8	6. I. 2008.	12,3	34,7
4.	26,7	9. I. 2008.	0,0	52,0
5.	25,4	16. I. 2008.	0,8	49,7
6.	25,0	10. I. 2008.	0,0	43,3
7.	24,3	23. X. 2005.	15,4	71,0
8.	24,0	11. I. 2008.	0,0	35,7
9.	23,7	17. I. 2008.	0,0	43,6
10	23,5	5. I. 2008.	3,2	13,8

**Tablica 5** Podaci za četiri karakteristična slučaja odnosa mutnoće, NTU, i dnevnih oborinma izmjerenih na meteorološkoj postaji Dubrovnik,  $P_{\text{DUBROVNIK}}$ , te srednjih dnevnih protoka izvora Omble,  $Q_{\text{OMBLA}}$

R. br.	Datum	NTU	$P_{\text{DUBROVNIK}}$ (mm)	$Q_{\text{OMBLA}}$ (m <sup>3</sup> /s)
1.	11. VII. 2005.	0,76	0,0	12,1
	12. VII. 2005.	0,73	89,5	13,1
	13. VII. 2005.	0,76	0,0	10,6
2.	22. X. 2005.	0,46	4,3	17,5
	23. X. 2005.	24,3	15,4	71,0
	24. X. 2005.	12,4	9,4	83,1
3.	17. IX. 2006.	0,29	14,2	7,49
	18. IX. 2006.	14,2	22,6	33
	19. IX. 2006.	17,7	35,2	72,7
	20. IX. 2006.	8,0	4,8	67
	21. IX. 2006.	3,3	0,0	56,7
	22. IX. 2006.	1,5	0,0	41,8
4.	18.12.2006	0,59	32,4	51,1
	19.12.2006	0,64	109,2	94,9
	20.12.2006	0,43	34,3	92,9

## 5. ZAKLJUČCI

O količinama suspendiranog nanosa koje izvor Omble iznosi na površinu svjedoče fotografije koje je u dva navrata u posljednjih nekoliko godina snimio Ivan Ivanković Fjaka. Fotografija na slici 9 snimljena je 4. veljače 2012., dok je na slici 10 snimljen događaj koji se desio 19. siječnja 2015.



Slika 9. Fotografija zamućenja Rijeke Dubrovačke na ušću u Jadransko more snimljena 4. veljače 2012. (snimio Ivan Ivanković Fjaka)



Slika 10. Fotografija zamućenja Rijeke Dubrovačke na ušću u Jadransko more snimljena 19. siječnja 2015. (snimio Ivan Ivanković Fjaka)

Činjenica je da su prethodno izvršene analize otvorile više pitanja nego što su dale pouzdanih odgovora, ali je isto tako činjenica da je namjera ovog rada bila da potakne sustavna istraživanja fenomena mutnoće na krškim izvorima u Hrvatskoj. Tom se velikom problemu kod nas, nažalost, do sada nije pridavala dovoljno pažnje. Čini se da odgovorni vjeruju da problem postoji samo s pitkom vodom te da će svi problemi biti riješeni izgradnjom pročistača.

U zaključnom razmatranju treba se suočiti s činjenicom da je odnos između mutnoće vode, njene prozornosti i količine suspendiranog nanosa u prostorima krša, osobito kod krških izvora, značajno složeniji nego kod nekrških terena. Očito je da će biti potrebno mnogo detaljnije izučavati i ovu, kod nas potpuno zanemarenu problematiku. Istine radi, niti u svijetu u tom području nije postignut veliki napredak, ali se čini da je problem konačno shvaćen, što se zaključuje na osnovi činjenice da se u literaturi sve više nailazi na analize vezane s ovim aspektom vodnih resursa krša. Pri tome treba imati na umu da je svaki krški izvor izrazito specifičan te da se čini da će biti potrebno dosta napora da se dođe do nekih općenito važećih zaključaka. Hrvatska koja koristi mnogo vode iz krških izvora trebala bi za napredak ovih izučavanja biti posebno zainteresirana. U tom bi smislu svakako trebao prednjačiti južni dio naše zemlje i grad Dubrovnik, kojemu voda iz krškog izvora Omble uistinu znači život. Radi se o interdisciplinarnom zadatku koji traži tijesnu, otvorenu i iskrenu suradnju brojnih struka i stručnjaka. ■

## LITERATURA

- Anderson, M.D. (2015): The special water quality issues of karst, dual porosity and fractured aquifers arising from the mobilisation and transport of sediment through aquifers (MWH) (<http://info.ngwa.org/gwol/pdf/090583734.pdf>) (posjet 24. srpnja 2015.)
- Ballantine, D.J.; Hughes, A.O.; Davies-Colley, R.J. (2014.): Mutual relationships of suspended sediment, turbidity and visual clarity in New Zealand rivers. *IAHS Publications*, 367, 265–271.
- Bonacci, O. (1995.): Ground water behaviour in karst: example of the Ombla Spring (Croatia). *Journal of Hydrology*, 165, 113–134.
- Bonacci, O. (2001.): Analysis of the maximum discharge of karst springs. *Hydrogeology Journal*, 9, 328–338.
- Bonacci, O.; Gottstein, S.; Roje-Bonacci, T. (2009.): Negative impacts of grouting on the underground in karst environment. *Ecohydrology*, 2, 492–502.
- Bonacci, O.; Fumet, M.; Šakić-Trogrlić, R. (2014.): Analiza vodnih resursa izvora Omble. *Hrvatske vode*, 22 (88), 107–118.
- Bonacci, O.; Roje-Bonacci, T. (2012.): Impact of grout curtains on karst groundwater behaviour: an example from the Dinaric karst. *Hydrological Processes*, 24(26), 2765–2772.
- Canora, F.; Fidelibus, M.D.; Sciortino, A.; Spilotro, G. (2008.): Variation of infiltration rate through karstic surface due to land use changes: a case study in Murgia (SE-Italy). *Engineering Geology*, 99(3–4), 210–227.
- Chanson, H.; Takeuchi, M.; Trevethan, M. (2008.): Using turbidity and acoustic backscatter intensity as surrogate measures of suspended sediment concentration in a small subtropical estuary. *Journal of Environmental Management*, 88, 1406–1416.
- Davies-Colley, R.J.; Smith, D.G. (2001.): Turbidity, suspended sediment and water clarity: a review. *Journal of the American Water Resources Association*, 37(5), 1085–1101.
- Denić-Jukić, V.; Juras, T.; Plenković, M.; Kadić, A.; Jukić, D. (2012.): Turbidity dynamics of the karst spring Ombla (Croatia). *EGU General Assembly, 22–27 April 2012, Vienna*. 2012EGUGA..1412428D.
- Ford, D.; Williams, P. (2007.): *Karst hydrogeology and geomorphology*, John Wiley, Chichester.
- Holdren, G.C. (2002.): Biological aspects of turbidity and other optical properties of water. *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV*.
- Hughes, A.O.; Davies-Colley, R.J.; Elliott, A.H. (2014.): Measurement of light attenuation extends the application of suspended sediment monitoring in rivers. *IAHS Publication*, 367, 170–176.
- Kaufmann, G.; Braun, J. (2000.): Karst aquifer evolution in fractured, porous rocks. *Water Resources Research*, 36(6), 1381–1391.
- Line, D.E.; Hall, K.R.; Blackwell, J.D. (2013.): Estimating suspended solids from turbidity in the Robeson Creek, NC Watershed. *Journal of the American Water Resources Association*, 49, 1412–1420.
- Low Hui; Xiang Daphne; Handojo Djati; Utomo Lim; Zhi Hao Kenneth. (2011.): Correlation between turbidity and total suspended solids in Singapore rivers. *Journal of Water Sustainability*, 1(3), 313–322.
- Makropoulos, C.; Koutsoyiannis, D.; Stanić, M.; Djordjević, S.; Prodanović, D.; Dašić, T.; Prohaska, S.; Maksimović, Č.; Wheeler, H. (2008.): A multi-model approach to the simulation of large scale karst flows. *Journal of Hydrology*, 348(3–4), 412–424.
- Massei, N.; Dupont, J.P.; Mahler, B.J.; Laignel, B.; Fournier, M.; Valdes, D.; Ogier S.; Nebbache, S.; Feeny, V.; Poudevigne, I.; Alard, D. (2006.): Investigating transport properties and turbidity dynamics of a karst aquifer using correlation, spectral, and wavelet analyses. *Journal of Hydrology*, 329, 244–257.
- Milanović, P. (1996.): Ombla Spring, Croatia. *Environmental Geology*, 27, 105–107.
- Nebbache, S.; Feeny, V.; I. Poudevigne, I.; Alard, D. (2001.): Turbidity and nitrate transfer in karstic aquifers in rural areas: The Brionne Basin case-study. *Journal of Environmental Management*, 62, 389–398.
- Oskoruš, D. (2015.): *Doprinos analizi suspendiranog nanosa na srednjem toku Save*. Doktorski rad, Građevinski fakultet Sveučilišta u Zagrebu.
- Pavanelli, D.; Bigi, A. (2005.): Indirect methods to estimate suspended sediment concentration: reliability and relationship of turbidity and settleable solids. *Biosystems Engineering*, 90, 75–83.
- Pronk, M.; Goldscheider, N.; Zopfi, J. (2006.): Dynamics and interaction of organic carbon, turbidity and bacteria in a karst aquifer system. *Hydrogeology Journal*, 14, 473–484.
- Rugner, H.; Schwientek, M.; Beckingham, B.; Kuch, B.; Grathwohl, P. (2013): Turbidity as a proxy for total suspended solids (TSS) and particle facilitated pollutant transport in catchments. *Environmental Earth Sciences*, 69(2), 373–380.
- Susfalk, R.B.; Fitzgerald, B.; Knust, A.M. (2008.): Characterization of turbidity and total suspended solids in the Upper Carson River, Nevada. *DHS Publication No. 41242*, Desert Research Institute, Nevada.
- Ziegler, A.C. (2002.): Issues related to use of turbidity measurements as a surrogate for suspended sediment. *Turbidity and Other Sediment Surrogates Workshop, April 30 – May 2, 2002, Reno, NV*.
- Zubac, Ž.; Bošković, Ž. (2012.): Problem vododrživosti akumulacije "Gorica"-Trebinje. *Vodoprivreda*, 44, 273–276.
- [www.https://ngwa.confex.com/ngwa/karst09/webprogram/Paper6117.html](http://www.ngwa.confex.com/ngwa/karst09/webprogram/Paper6117.html) (posjet 17. 7. 2015.)