https://doi.org/10.15255/KUI.2026.006
KUI-40/2026
Izvorni znanstveni rad
Prispjelo 10. veljače 2026.
Prihvaćeno 18. ožujka 2026.

Određivanje organskog opterećenja u površinskim vodama na području Varaždinske županije

A. Ptiček Siročić,[a*] *M. Šiljeg* [a] i *D. Begić Šinjori* [b]

[a] Sveučilište u Zagrebu Geotehnički fakultet, Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin
[b] Zavod za javno zdravstvo Varaždin, I. Meštrovića 1/11, 42 000 Varaždin

Ovo djelo je dano na korištenje pod Creative Commons Attribution 4.0 International License

Sažetak

Ključni parametri za procjenu stupnja onečišćenja površinskih voda su vrijednost ukupnog organskog ugljika (TOC), utrošak kalijeva permanganata ($KMnO_4$) i biokemijska potrošnja kisika (BPK_5) jer daju uvid u količinu i prirodu prisutne organske tvari te njezin utjecaj na potrošnju kisika u vodenom ekosustavu. U ovom istraživanju provedena je analiza uzoraka površinske vode na pet različitih lokacija Varaždinske županije u razdoblju od travnja 2023. do ožujka 2024. te je praćena sezonska varijabilnost navedenih pokazatelja organskog opterećenja. Rezultati ukazuju na povećano organsko opterećenje tijekom ljetnih mjeseci, pri čemu su najviše vrijednosti TOC-a zabilježene na lokacijama Lonja (14,3 mg l^{-1}) i Ljuba voda (16,7 mg l^{-1}). Sezonska dinamika BPK_5 i utrošak $KMnO_4$ ukazuju na miješano podrijetlo organskog onečišćenja, čiji intenzitet raste u toplijem dijelu godine uslijed pojačane biološke aktivnosti i otjecanja s okolnih površina. Vrijednosti omjera BPK_5/TOC na lokacijama Korušćak (0,65) i Presečno (0,64) ukazuju na prevladavanje biorazgradive organske tvari, što je u skladu s povremenim povišenjima BPK_5 u ljetnim mjesecima, kad pojačana biološka aktivnost ubrzava transformaciju organskog opterećenja.

Ključne riječi

Površinske vode, organsko opterećenje, ukupni organski ugljik (TOC), biokemijska potrošnja kisika (BPK_5), kalijev permanganat

1. Uvod

Pojavom industrijalizacije, povećanjem broja stanovništva i životnog standarda povećana je i potrošnja, ali i onečišćenost voda, te je samim time ugrožena neravnomjerna dostupnost tog važnog resursa. Prema UNESCO-u i FAO-u,[1,2] globalna potražnja za slatkom vodom kontinuirano raste po godišnjoj stopi od približno 1 % od 1980-ih godina prošlog stoljeća. Godišnja potrošnja iznosi oko 4000 km^3 slatke vode, pri čemu najveći udio u potrošnji ima poljoprivredni sektor s prosječno 70 % ukupne potrošnje, dok industrijski sektor i kućanstva čine oko 18 %, odnosno 12 % ukupne potražnje, uz stalni trend porasta u urbanim sredinama. Praćenje kvalitete površinskih voda vrlo je važno za održivo upravljanje vodnim resursima i zaštitu ekosustava. Povišene koncentracije organske tvari mogu negativno utjecati na kakvoću sirove vode, otežati procese obrade vode za piće te povećati potrebu za intenzivnijim postupcima pročišćavanja. Osim toga, organska tvar u vodi može reagirati s dezinfekcijskim sredstvima tijekom obrade vode, što može dovesti do stvaranja nusproizvoda dezinfekcije potencijalno štetnih za ljudsko zdravlje. Tijekom postupka kloriranja, koji je ključan za uklanjanje patogena, može doći do reakcije s prirodnim organskim tvarima prisutnim u sirovoj vodi, pri čemu mogu nastati trihalometani, koji su povezani s potencijalnim zdravstvenim rizicima.[3,4] Organsko opterećenje površinskih voda provodi se određivanjem ukupnog organskog ugljika (engl. *total organic carbon*, TOC), biokemijske potrošnje kisika (BPK) te utroška $KMnO_4$. Koncentracije ukupnog organskog ugljika variraju ovisno o sezonskim promjenama, a velik utjecaj na promjenu koncentracije ima ispiranje tla, strujanje, izmjena topline u vodenim slojevima kao i biološka razgradnja.[5,6] Biokemijska potrošnja kisika predstavlja količinu kisika koju mikroorganizmi troše tijekom aerobne razgradnje organske tvari u vodi. Povišene vrijednosti BPK_5 dovode do povećane potrošnje otopljenog kisika, čime se njegova koncentracija u površinskim vodama znatno smanjuje. Posljedica toga je pojava hipoksičnih uvjeta koji negativno utječu na vodene organizme ovisne o kisiku, uključujući ribe, beskralježnjake i aerobne mikroorganizme. Dugotrajno sniženje razine kisika može poremetiti fiziološke procese, smanjiti uspješnost razmnožavanja i preživljavanje organizama te dovesti do narušavanja međusobnih odnosa unutar hranidbenih lanaca i stabilnosti cijelog vodnog ekosustava.[7,8] Utrošak kalijeva permanganata pokazatelj je prisutnosti organskih tvari u vodi, koje potječu iz različitih izvora, uključujući oborinske vode, industrijske otpadne vode, komunalne sustave te otpadne vode iz poljoprivrednih i drugih gospodarskih aktivnosti, a mogu se oksidirati kalijevim permanganatom. Monitoring pokazatelja organskog opterećenja određuje se u skladu s Okvirnom direktivom o vodama (200/60/EC)[9] te Uredbom o standardu kakvoće vode[10] s ciljem ocjene kemijskog i ekološkog stanja površinskih voda. Dobiveni rezultati koriste se za procjenu utjecaja prirodnih i antropogenih onečišćujućih tvari te za utvrđivanje potrebe mjera zaštite poboljšanja stanja vodnih tijela. Cilj ovog rada bio je analizirati sezonsko organsko opterećenje uzoraka površinskih voda na nekoliko lokacija u Varaždinskoj županiji tijekom jednogodišnjeg razdoblja.

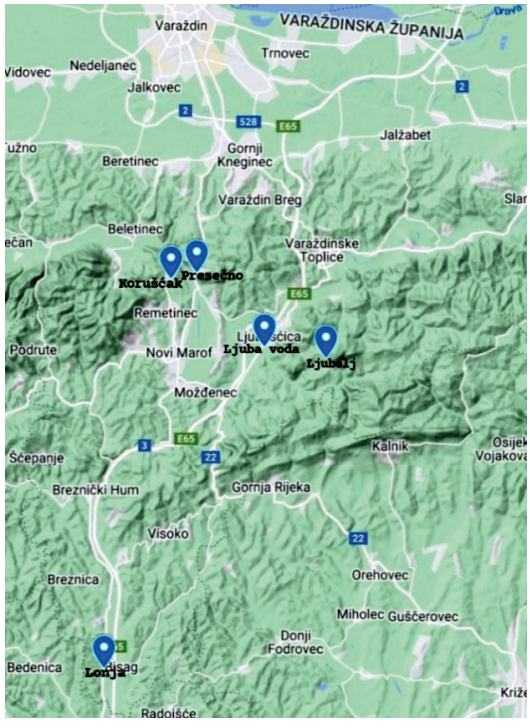
* Autor za dopisivanje: prof. dr. sc. Anita Ptiček Siročić
E-pošta: anita.pticek.sirocic@gfv.unizg.hr

2. Eksperimentalni dio

2.1. Opis lokacije

Varaždinska županija nalazi se u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske te obuhvaća površinu od oko 1262 km^2. Geografski, županija je smještena između Panonske nizine na istoku i predalpskog prostora na zapadu. Reljef je pretežno nizinski, s blagim uzvišenjima prema zapadnim granicama, dok je središnji i istočni dio uglavnom ravan, pogodan za poljoprivredu i naseljavanje. Sustav vodoopskrbe Varaždinske županije temelji se ponajprije na uporabi podzemnih voda vrlo dobre kakvoće, pri čemu su glavni vodonosnici razvijeni u aluvijalnim naslagama pijeska i šljunka. Takva geološka građa omogućava učinkovite procese prirodne filtracije, čime se osigurava visoka kakvoća vode pogodna za vodoopskrbu stanovništva.[11] Vodoopskrbni sustav Varaždinske županije organiziran je u četiri glavna područja, Ivanec, Ludbreg, Novi Marof i Varaždin, a za potrebe vodoopskrbe rabe se eksploatacijski zdenci i crpne stanice. Na godišnjoj razini isporučuje se ukupno 8 000 000 m^3 vode, od čega se 70 % upotrebljava u kućanstvima, dok preostalih 30 % upotrebljava industrijski sektor.[12]

Uzorkovanje površinskih voda u Varaždinskoj županiji provedeno je jednom mjesečno u razdoblju od travnja 2023. do ožujka 2024. godine na lokacijama Lonja, Presečno, Ljubelj, Ljuba voda i Korušćak (slika 1). Odabrane lokacije predstavljaju manje vodotoke i kanale smještene na području dravskog i savskog porječja unutar Varaždinske županije. Lokacije Lonja i Presečno gravitiraju slivu rijeke Lonje, dok lokacije Korušćak, Ljubelj i Ljuba voda pripadaju širem hidrografskom sustavu koji se veže uz sliv rijeke Bednje, odnosno Drave.



Slika 1 – Lokacije uzorkovanja
Fig. 1 – Sampling locations

2.2 Metoda određivanja TOC-a

Određivanje ukupnog organskog ugljika (TOC) provedeno je u skladu sa Smjernicama za određivanje ukupnog organskog ugljika i otopljenog organskog ugljika HRN EN 1484:2002.[13] Uzorak je blago zakiseljen da bi se uklonio anorganski ugljik, dok se organski ugljik u uzorku pomoću persulfata i kiseline prevodi u ugljikov dioksid. Za vrijeme digestije ugljikov dioksid difundira u pH indikator reagens u unutrašnjosti ampule. Adsorpcijom ugljikova dioksida u indikator nastaje ugljična kiselina. Ugljična kiselina mijenja pH indikatorske otopine koja uslijed toga mijenja boju, a jačina boje izravno je povezana s količinom ugljika u uzorku. Kao standard za određivanje ukupnog organskog ugljika upotrijebljen je TOC Standard Solution 1000 mg l^{-1} i set Hach Lange. Za slijepu probu upotrijebljena je redestilirana voda koja ne smije sadržavati više od 0,05 mg l^{-1} ugljika.

2.3 Određivanje potrošnje $KMnO_4$

Određivanje utroška $KMnO_4$ provedeno je za uzorke površinskih voda s pet lokacija tijekom 12 mjeseci u kontroliranim laboratorijskim uvjetima. U Erlenmeyerovu tikvicu od 300 ml stavljeno je 100 ml uzorka površinske vode te je dodano 5 ml 98 % H_2SO_4 i kuglice za ravnomjerno vrenje. Zatim je dodano 15 ml 0,002 mol dm^{-3} $KMnO_4$ i uzorak se zagrijava do ponovnog vrenja i kuha 10 min. U uzorak je dodano 15 ml 0,005 mol dm^{-3} $H_2C_2O_4$ i uzorak se zagrijava do potpunog obezbojenja otopine. Zatim se otopina titrira s 0,002 mol dm^{-3} $H_2C_2O_4$ do pojave slabo ružičaste boje.

Rezultat utroška $KMnO_4$ se izračunava prema jedn. (1) i izražava u mg l^{-1} O_2:

$$KMnO_4\ [mg\,l^{-1}\ O_2] = \\ = V_{KMnO4}\,[ml] \cdot \text{faktor}\ KMnO_4 \cdot 3{,}16 \cdot 0{,}253 \quad (1)$$

pri čemu je V_{KMnO4} [ml]=[(V_0+V_1)−V_2], V_0 = dodani volumen 0,002 M $KMnO_4$ u uzorak = 15 ml, V_1 = volumen $KMnO_4$ [ml] utrošen za titraciju, V_2 = volumen $KMnO_4$ [ml] utrošen prilikom standardizacije 0,002 mol dm^{-3} $KMnO_4$.

2.4 Određivanje BPK_5

Biokemijska potrošnja kisika tijekom pet dana (BPK_5) provedena je pomoću sustava BOD Direct Plus Hach Lange u području mjerenja od 0 do 4000 mg l^{-1} O_2. Prije samog postupka potrebno je provjeriti pH vrijednost za svaki uzorak površinske vode (idealna pH vrijednost je između 6,5 i 7,5). Uzorci vode stavljeni su u reakcijske boce, dodano je četiri kapi 45 % otopine KOH te je uzorak zagrijan na temperaturu ± 1 °C od temperature mjerenja, odnosno 20 °C ± 1 °C.

3. Rezultati i rasprava

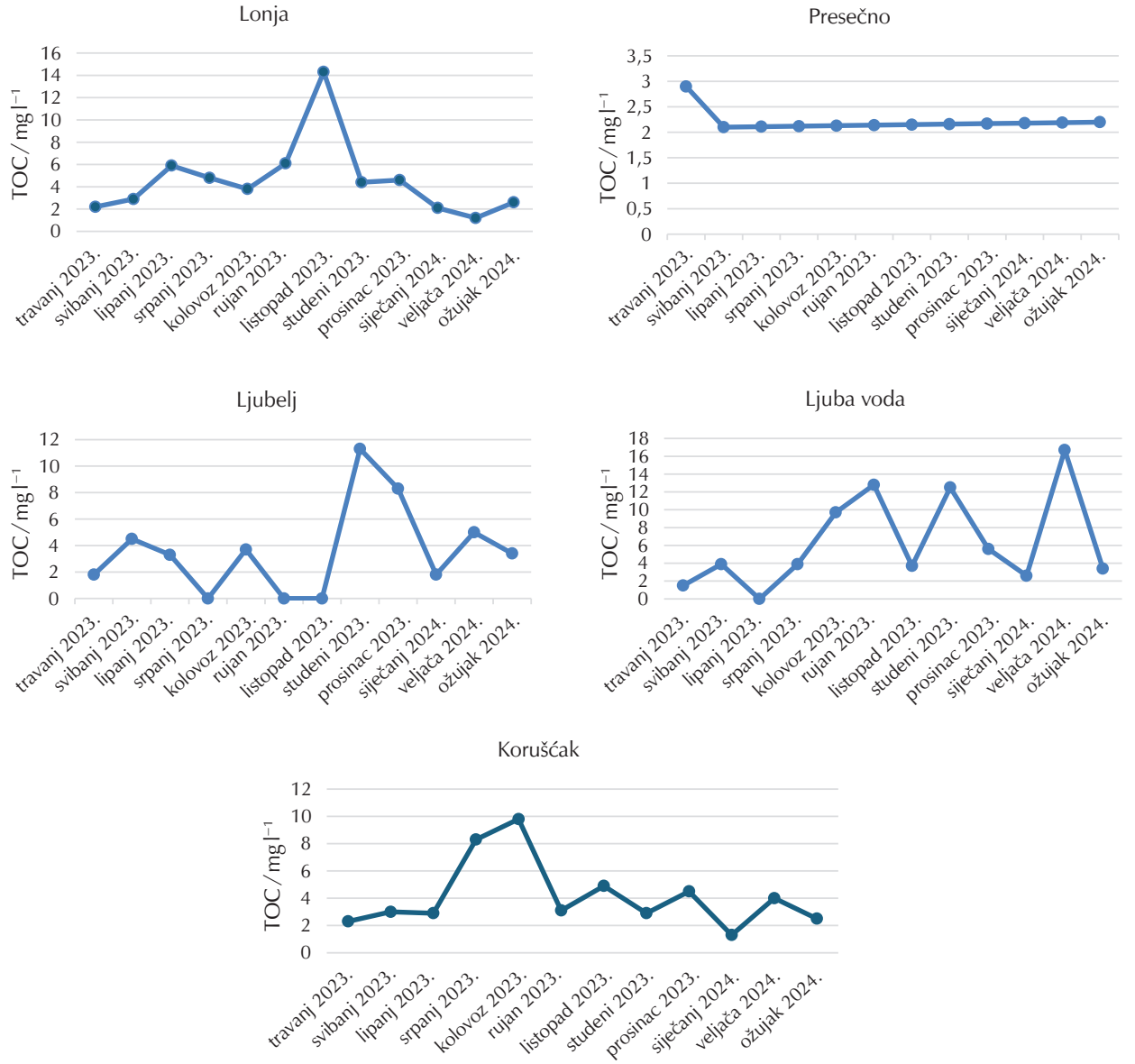
U svrhu procjene stanja površinskih voda na ispitivanim lokacijama Varaždinske županije dobiveni rezultati uspoređeni su s graničnim vrijednostima ekološkog stanja propisanim Uredbom o standardu kakvoće voda (NN 96/2019)[10].

U tablici 1 prikazani su kriteriji za razvrstavanje voda u kategorije od vrlo dobrog do vrlo lošeg stanja za ključne pokazatelje organskog opterećenja. Važno je istaknuti da utrošak $KMnO_4$ predstavlja opći pokazatelj oksidirajućih tvari u vodi i ne omogućava detaljno razlučivanje pojedinih izvora onečišćenja te se razmatra uz ostale pokazatelje kakvoće vode.

Vrijednosti koncentracije ukupnog organskog ugljika na ispitivanim lokacijama prikazane su na slici 2. Vidljivo je da koncentracije variraju tijekom mjeseci gotovo na svim lokacijama, jedino na lokaciji Presečno vrijednosti TOC-a su gotovo identične od svibnja 2023. do ožujka 2024. godine. Najviše vrijednosti zabilježene su na lokacijama Lonja u listopadu 2023. godine (14,3 mg l^{-1}) i na lokaciji Ljuba

Tablica 1 – Granične vrijednosti ekološkog stanja površinskih voda
Table 1 – Prescribed limit values for ecological status of surface waters

Pokazatelj Indicator	Jedinica Unit	I. kategorija (vrlo dobro) Class I. (very good)	II. kategorija (dobro) Class II. (good)	III. kategorija (umjereno) Class III. (moderate)	IV. kategorija (loše) Class IV. (poor)	V. kategorija (vrlo loše) Class V. (very poor)
BPK_5 / BOD_5	mg l^{-1} O_2	< 2,0	4,0	7,0	15,0	> 15,0
TOC	mg l^{-1}	< 2,0	5,0	9,0	15,0	> 15,0



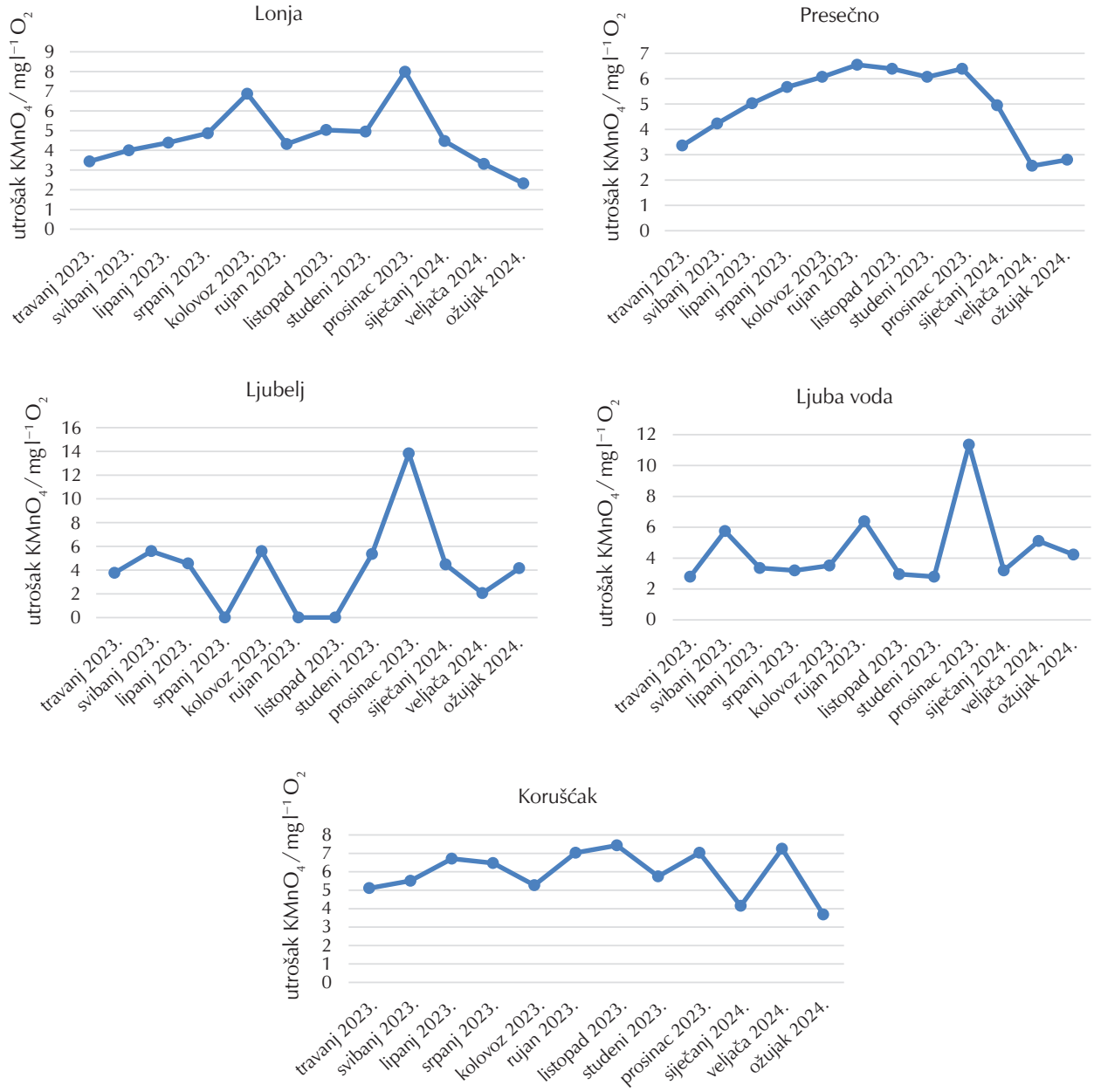
Slika 2 – Ukupni organski ugljik na pojedinim lokacijama
Fig. 2 – Total organic carbon at individual locations

voda u veljači 2024. godine (16,7 mg l^{-1}). Pretpostavlja se da je do povišenja vrijednosti došlo zbog povećanog unosa organske tvari, što može biti posljedica sezonskih oborina, otjecanja vode s poljoprivrednih površina ili razgradnje biljnog materijala.[14,15] Također, te pretpostavke potvrđuju i službeni klimatološki podatci DHMZ-a[16] za postaju Varaždin. Na lokaciji Lonja povišena vrijednost u listopadu 2023. godine (14,3 mg l^{-1}) korelira s kišnim prilikama zabilježenim krajem tog mjeseca. Ukupna količina oborina iznosila je približno 47 mm, što je oko 35 % više od višegodišnjeg prosjeka, pri čemu je posebno važan bio intenzivan kišni događaj krajem mjeseca s dnevnim iznosom od preko 20 mm, što je uzrokovalo naglo ispiranje organske tvari i biljnog materijala s okolnih površina. Slično tome, maksimalna vrijednost na lokaciji Ljuba voda u veljači 2024. godine (16,7 mg l^{-1}) može se pripisati neuobičajeno visokim temperaturama za to doba godine. Takvi meteorološki uvjeti u veljači, koja je ocijenjena kao ekstremno topla (8,1 °C viša od višegodišnjeg prosjeka), pogodovali su pojačanoj mikrobiološkoj aktivnosti i bržoj mineralizaciji organskih ostataka u tlu. Takvi uvjeti omogućili su mobilizaciju i prijevremeno ispiranje nakupljene organske tvari iz tla i okolne vegetacije u vodotok pri pojavi oborina. S druge strane, u veljači 2024. godine zabilježena je najniža vrijednost od 1,2 mg l^{-1} na lokaciji Lonja, dok na lokacijama Ljubelj i Ljuba voda u pojedinim mjesecima nije bilo vode. Takvo odstupanje u odnosu na ostale mjerne postaje može se pripisati učinku razrjeđenja, odnosno može se pretpostaviti da je oborinska vode koja je dospjela u korito Lonje vjerojatno uzrokovala znatno smanjenje koncentracije organske tvari. S druge strane, manji bujični vodotoci poput Ljubelja i Ljuba vode u pojedinim su mjesecima presušili, što je onemogućilo kontinuirano praćenje, ali i potvrdilo nestalan hidrološki karakter navedenih vodotoka.

Smanjenje koncentracije TOC-a tijekom zimskih mjeseci povezuje se s nižim temperaturama, smanjenom biološkom aktivnošću mikroorganizama i ograničenim unosom organske tvari iz vanjskih izvora. Nadalje, tijekom zimskog razdoblja vegetacija miruje, razgradnja organske tvari je usporena, a poljoprivredno otjecanje je znatno smanjeno, što rezultira nižim koncentracijama organskog ugljika u vodotocima.[17,18] Osim toga, hidrološki uvjeti zimi mogu dodatno ograničiti prisutnost i transport organske tvari u površinskim vodama. Međutim, iz rezultata je vidljivo povećanje koncentracije TOC-a na lokacijama Ljubelj (studeni i prosinac 2023.) te Ljuba voda (studeni 2023.), što odstupa od uobičajenog sezonskog ponašanja. To se povećanje može pripisati iznadprosječnoj količini oborina, koja je u studenome iznosila oko 110 mm, a u prosincu 75 mm.[16] Takvi uvjeti pogodovali su intenzivnom ispiranju organske tvari iz tla i razgradnji nakupljenog biljnog materijala u slivu vodotoka. Vrijednosti koncentracije TOC-a na lokaciji Presečno pokazuju kontinuiranost vrijednosti s vrlo malim varijacijama tijekom cijele godine. Vrijednosti se kreću se između 2,1 i 2,2 mg l^{-1}, s blagim porastom od 2,9 mg l^{-1} u travnju 2023. godine. Ta stabilnost upućuje na postojanost uvjeta u vodnom tijelu, što može sugerirati minimalan utjecaj sezonskih promjena i antropogenih faktora na kakvoću vode na toj lokaciji.

Slika 3 prikazuje vrijednosti utroška $KMnO_4$ na pojedinim lokacijama. Rezultati ukazuju na izražene sezonske promjene u oksidacijskom kapacitetu vode, koji je izravno povezan s prisutnošću organskih i anorganskih tvari u površinskim vodama. Najviše vrijednosti dobivene su na lokacijama Ljubelj (13,83 mg l^{-1} O_2) i Ljuba voda u prosincu 2023. godine (11,35 mg l^{-1} O_2), dok se na ostalim lokacijama vrijednosti kreću u intervalu od 2,05 do 7,99 mg l^{-1} O_2. Do povećanja prisutnosti oksidirajućih tvari u vodi, ponajprije organskog porijekla, moglo je doći zbog pojačanog otjecanja nakon oborina i unosom organske tvari iz okolnog sliva i razgradnje organskog materijala u kasno-jesenskom i zimskom razdoblju.[8,19] Iako se tijekom zimskog razdoblja u pravilu očekuju niže vrijednosti, povišeni utrošak $KMnO_4$ u kasnoj jeseni i početkom zime može biti posljedica razgradnje biljnog materijala i promijenjenih hidrometeoroloških uvjeta. Tijekom ljetnog razdoblja (srpanj, rujan i listopad 2023.) na lokaciji Ljubelj nije bilo vode za uzorkovanje, što ukazuje na hidrološke promjene odnosno presušivanje vodotoka. Vrijednosti utroška $KMnO_4$ zabilježene na ostalim lokacijama, koje se kreću u nižem rasponu, ukazuju na umjereno organsko opterećenje i stabilnije uvjete u vodotocima. Razlike u vrijednostima utroška $KMnO_4$ među promatranim lokacijama ukazuju na lokalne izvore organske tvari i specifične značajke slivnih područja, poput udjela poljoprivrednih površina ili prirodne vegetacije. Važno je istaknuti da utrošak $KMnO_4$ predstavlja opći pokazatelj oksidirajućih tvari u vodi i ne omogućava detaljno razlučivanje pojedinih izvora onečišćenja te se razmatra uz ostale pokazatelje kakvoće vode.

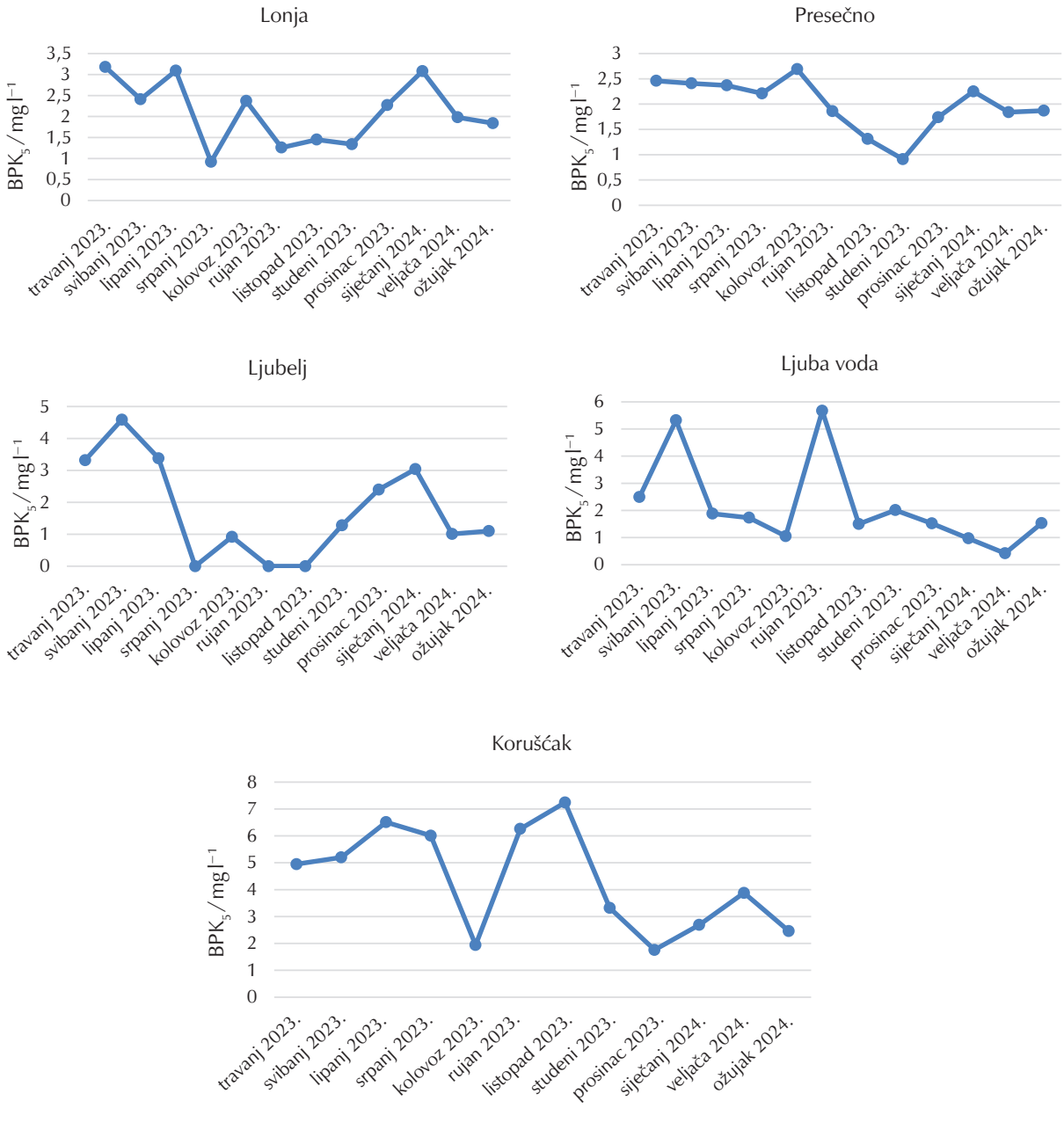
Biološka potrošnja kisika tijekom petodnevnog mjerenja (BPK_5) omogućuje procjenu količine biološki razgradive organske tvari kao i njezin utjecaj na potrošnju otopljenog kisika i funkcioniranje vodenog ekosustava. Rezultati BPK_5 dobiveni na pojedinim lokacijama prikazani su na slici 4 te je vidljivo da se izmjerene vrijednosti BPK_5 na svim lokacijama kreću u intervalu od 0,42 do 7,24 mg l^{-1}. Raspon izmjerenih vrijednosti BPK_5 ukazuje na varijabilno organsko opterećenje površinskih voda tijekom sezonskih promjena na promatranim lokacijama. Najviša vrijednost od 7,24 mg l^{-1} dobivena je na lokaciji Korušćak u listopadu 2023., a povišene vrijednosti zabilježene su i tijekom kasnog proljeća i ljetnih mjeseci (svibanj, lipanj i srpanj). Takvi rezultati su i očekivani s obzirom na to da tijekom ljetnih mjeseci dolazi do povećanja unosa biološki razgradive organske tvari uslijed pojačane biološke aktivnosti, viših temperatura te mogućeg otjecanja s okolnih površina.[14,20] Nadalje, analizom meteoroloških podataka DHMZ-a[20] za postaju Varaždin utvrđeno je da su tijekom svibnja i lipnja 2023. zabilježene povećane količine oborina, pri čemu je u svakom od navedenih mjeseci palo približno 120 mm oborine. Povećane količine oborina mogu uzrokovati intenzivnije površinsko otjecanje te ispiranje organske tvari s okolnih površina u vodno tijelo, što potencijalno doprinosi porastu vrijednosti biokemijske potrošnje kisika tijekom pet dana (BPK_5), pri čemu je u promatranom razdoblju zabilježena maksimalna vrijednost od 7,24 mg l^{-1}. Niže vrijednosti BPK_5 koje su dobivene na svim ostalim lokacijama mogu se povezati sa stabilnijim hidrološkim uvjetima, koji smanjuju unos biološki razgradive organske tvari u vodotok te doprinose ujednačenijoj kakvoći vode. Usporedbom s Uredbom o standardu kakvoće voda (NN 96/2019), većina lokacija održava dobro stanje, uz povremena odstupanja u III. i IV. kategoriji na lokacijama Korušćak, Lonja i Ljuba voda tijekom različitih sezonskih uvjeta.



Slika 3 – Vrijednosti utroška kalijeva permanganata
Fig. 3 – Potassium permanganate consumption values

Za bolje razumijevanje procjene podrijetla i prirode organskog opterećenja, izračunat je omjer biokemijske potrošnje kisika i ukupnog organskog ugljika (BPK_5/TOC), tablica 2, koji služi kao indikator biorazgradljivosti prisutnih tvari. Više vrijednosti upućuju na svježe, lako razgradivo organsko onečišćenje, dok niske vrijednosti ukazuju na prisutnost inertnih i teško razgradivih spojeva.

Prosječne vrijednosti omjera BPK_5/TOC na lokacijama Koruščak (0,65) i Presečno (0,64) pokazuju da je na tim lokacijama organska tvar dominantno biološki razgradiva, što se podudara s povremenim povišenjima BPK_5 tijekom ljetnih mjeseci uslijed pojačane biološke aktivnosti. Nasuprot tome, lokacije Ljuba voda (0,23) i Ljubelj (0,27) pokazuju znatno niže omjere, unatoč povremeno visokim koncentracijama TOC-a, koje su dosezale i do 16,7 mg l^{-1}. Takvi rezultati potvrđuju da na tim lokacijama prevladava stabilna organska tvar čija pojačana prisutnost u jesenskom i zimskom razdoblju vjerojatno potječe od ispiranja tla i razgradnje biljnog materijala, a ne od izravnih antropogenih ispusta bogatih lako razgradivim tvarima. Povećano organsko opterećenje u jesen očituje se kroz povišene vrijednosti TOC-a i utroška $KMnO_4$, što upućuje na prisutnost različitih oblika organskih tvari podložnih oksidaciji. Budući da izmjerene vrijednosti BPK_5 istodobno ne pokazuju značajniji rast, može se zaključiti da prevladava organska tvar stabilnijeg karaktera koja ne podliježe brzoj biološkoj razgradnji.



Slika 4 – Vrijednosti BPK_5
Fig. 4 – BOD_5 values

Tablica 2 – Srednje vrijednosti pokazatelja organskog opterećenja i biorazgradljivosti po lokacijama
Table 2 – Average values or organic loading indicators and biodegradability by location

Lokacija	TOC / mg l^{-1}	BPK_5 / mg l^{-1} O_2	$KMnO_4$ / mg l^{-1} O_2	Omjer BPK_5/TOC
Lonja	4,21	1,73	4,00	0,41
Presečno	2,19	1,41	3,11	0,64
Ljubelj	5,50	1,51	5,14	0,27
Ljuba voda	8,32	1,94	5,53	0,23
Korušćak	4,46	2,90	4,79	0,65

4. Zaključak

Kakvoća vode važan je pokazatelj stanja vodnih ekosustava i nužna je za održivo upravljanje vodnim resursima. Analiza kakvoće površinskih voda na pet lokacija u Varaždinskoj županiji pokazala je izražene sezonske varijacije pokazatelja organskog opterećenja. Koncentracije ukupnog organskog ugljika (TOC) kretale su se od 1,2 do 16,7 mg l^{-1}, pri čemu su najviše vrijednosti zabilježene u jesenskom i zimskom razdoblju, što upućuje na povećan unos organske tvari. Na lokaciji Presečno zabilježene su stabilne i niske vrijednosti TOC-a, što ukazuje na postojane hidrološke uvjete. Najviše vrijednosti utroška $KMnO_4$ zabilježene su u prosincu 2023. godine, što sugerira na povećanu prisutnost oksidirajućih tvari, vjerojatno povezanu s pojačanim otjecanjem i razgradnjom organskog materijala. Vrijednosti BPK_5 nalaze se u intervalu od 0,42 do 7,24 mg l^{-1}, pri čemu povišene vrijednosti upućuju na povećanu prisutnost biološki razgradive organske tvari, dok niže i stabilnije vrijednosti potvrđuju dobru kakvoću vode na pojedinim lokacijama. Analiza omjera BPK_5/TOC dodatno je potvrdila razliku u podrijetlu organskog opterećenja. Visoki omjeri na lokacijama Korušćak i Presečno (0,65) upućuju na prevladavanje lako biorazgradivih tvari, dok niski omjeri na lokaciji Ljuba voda (0,23) ukazuju na dominaciju inertnih organskih tvari, poput huminskog materijala, čiji se unos intenzivira u zimskom razdoblju. Iako je ovo istraživanje bilo usredotočeno na primarne indikatore organskog opterećenja, dobiveni rezultati pružaju bitan uvid u dinamiku površinskih voda na području Varaždinske županije. Također, rezultati naglašavaju važnost kontinuiranog monitoringa površinskih voda radi pravodobnog uočavanja sezonskih i antropogenih utjecaja te učinkovitog upravljanja vodnim resursima u skladu s važećim zakonodavnim okvirima. Buduća istraživanja trebala bi uključiti detaljniju karakterizaciju sastava organske tvari kao i mikrobiološke pokazatelje da bi se dobila potpunija slika o udjelu prirodnih i antropogenih procesa u promatranom slivu.

Literatura
References

1. URL: https://www.unesco.org/en/articles/united-nations-world-water-development-report-2024-water-prosperity-and-peace (4. 2. 2026.)
2. AQUASTAT – FAO's Global Information System on Water and Agriculture, URL: https://www.fao.org/aquastat/en/ (4. 2. 2026.)
3. *A. L. Srivastav, N. Patel, V. K. Chaudhary*, Disinfection by-products in drinking water: Occurrence, toxicity and abatement, Env. Pollut. **267** (2020) 115474, doi: https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115474.
4. *J. M. Allen, A. A. Cuthbertson, H. K. Liberatore, S. Y. Kimura, A. Mantha, M. A. Edwards, S. D. Richardson*, Showering in Flint, MI: Is there a DBP problem?, J. Environ. Sci. **58** (2017) 271–284, doi: https://doi.org/10.1016/j.jes.2017.06.009.
5. *H. Sučić, I. Damjanović, M. Kralj, D. Bezik, D. Kolarić, M. Habuda-Stanić, N. Turić, S. Benkotić, B. Petrovicky Šveigeri, I. Ruškan*, Seasonal variations of total organic carbon (TOC) concentrations in the surface waters of Kopački rit as part of the Naturavita project for the July 2021-June 2022 period Hrvatske, Vode **31** (2023) 265–271.
6. *A. Saturday, M. Herrnegger, S. Kangume, G. Stecher*, Spatiotemporal variability of surface water quality in tropical agriculture-dominated catchments: insights from water quality indices, Sci. Rep. **15** (2025) 42971, doi: https://doi.org/10.1038/s41598-025-27066-x.
7. *P. K. Singh, U. Kumar, I. Kumar, A. Dwivedi, P. Singh, S. Mishra, C. Shekhar Seth, R. K. Sharma,* Critical review on toxic contaminants in surface water ecosystem: sources, monitoring, and its impact on human health, Environ. Sci. Pollut. Res. **31** (2024) 56428–56462, doi: https://doi.org/10.1007/s11356-024-34932-0.
8. *D. Juan, X. Yang, P. Xu, X. Wan, P. Wang, D. Wang, Q. Yang, Q. Wang, A. Razzaq*, Linking Water Quality Indicators in Stable Reservoir Ecosystems: Correlation Analysis and Ecohydrological Implications, Water **16** (2024) 3600, doi: https://doi.org/10.3390/w16243600.
9. European Parliament and Council. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water policy, Official Journal of the European Communities, 2000., URL: https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2000/60/oj/eng (5. 2. 2026.)
10. URL: https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2019_10_96_1879.html (5. 2. 2026.)
11. Hrvatski geološki institut, Rudarsko-geološka studija Varaždinske županije, 2016.
12. URL: https://www.varkom.hr/stranica/vodovod (5. 2. 2026.)
13. Glasilo DZNM 1-2/2002. Ispitivanje vode – Smjernice za određivanje ukupnoga organskog ugljika (UOU) i otopljenoga organskog ugljika (OOU) (EN 1484:1997), 2002.
14. *M. Zeeshan, O. Ali, S. Tabraiz, S. A. S. Ruhl*, Seasonal variations in dissolved organic matter concentration and composition in an outdoor system for bank filtration simulation, J. Environ. Sci. **135** (2024) 252–261, doi: https://doi.org/10.1016/j.jes.2023.01.006.
15. *M. Matouskova, K. Fraindova, M. Bejckova, Z. Kliment, V. Vlach, L. Vlcek*, Response of dissolved organic carbon in streams draining peatbogs to extreme rainfall-runoff events: a case study from Šumava (Bohemian Forest) National Park, Czech Republic, Environ. Earth Sci. **83** (2024) 491, doi: https://doi.org/10.1007/s12665-024-11804-x.
16. URL: https://meteo.hr/klima.php?section=klima_pracenje&param=klel&Grad=varazdin&Mjesec=05&Godina=2023 (13. 3. 2026.)
17. *M. S. Begum, M. Kadjeski, C. Fasching, M. A. Xenopoulos*, Temporal variability in dissolved organic matter composition export in streams, Biogeochem. **168** (2025) 73, doi: https://doi.org/10.1007/s10533-025-01270-3.
18. *T. Rajendiran, C. Sabarathinam, B. Panda, V. Elumalai*, Influence of Dissolved Oxygen, Water Level and Temperature on Dissolved Organic Carbon in Coastal Groundwater, Hydrology **10** (2023) 85, doi: https://doi.org/10.3390/hydrology10040085.
19. *J. R. Laszakovits, A. Somogyi, A. A. MacKay*, Chemical Alterations of Dissolved Organic Matter by Permanganate Oxidation, Environ. Sci. Technol. **54** (2020) 3256–3266, doi: https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06675.
20. *J. Xu, G. Jin, Y. Mo, H. Tang, L. Li*, Assessing Anthropogenic Impacts on Chemical and Biochemical Oxygen Demand in Different Spatial Scales with Bayesian Networks, Water **12** (2020) 246, doi: https://doi.org/10.3390/w12010246.

SUMMARY

Determination of Organic Matter Content in Surface Waters in Varaždin County

Anita Ptiček Siročić,[a*] *Mladen Šiljeg*,[a] and *Dijana Begić Šinjori*[b]

Key parameters for assessing the level of surface-water pollution include total organic carbon (TOC), potassium permanganate consumption ($KMnO_4$), and biochemical oxygen demand (BOD_5), as they provide insight into the quantity and nature of organic matter present, as well as its impact on oxygen consumption in the aquatic ecosystem. In this study, surface water samples were analysed at five different locations in Varaždin County from April 2023 to March 2024, monitoring the seasonal variability of these organic loading indicators. The results indicate increased organic loading during the summer months, with the highest TOC values recorded at the Lonja (14.3 mg l^{-1}) and Ljuba voda (16.7 mg l^{-1}) sites. The seasonal dynamics of BOD_5 and $KMnO_4$ consumption suggest a mixed origin of organic pollution, the intensity of which increases during the warmer part of the year due to enhanced biological activity and runoff from surrounding surfaces. The BOD_5/TOC ratios at the Koruščak (0.65) and Presečno (0.64) locations indicate a predominance of biodegradable organic matter, which is consistent with the occasional increases in BOD_5 during the summer months when enhanced biological activity accelerates the transformation of the organic load.

Keywords
Surface waters, organic load, total organic carbon (TOC), biochemical oxygen demand (BOD_5), potassium permanganate

[a] *University of Zagreb Faculty of Geotechnical Engineering, Hallerova aleja 7, 42 000 Varaždin, Croatia*
[b] *Institute of Public Health Varaždin, I. Meštrovića 1/11, 42 000 Varaždin, Croatia*

Original scientific paper
Received February 10, 2026
Accepted March 18, 2026