

Pregledni članak (Review paper) | UDK: 556.54(497.5)(282.24 Krka)
Primljeno (Received): 03.06.2024.; Prihvaćeno (Accepted): 21.08.2024.

PREGLED ISTRAŽIVANJA I ZNANSTVENIH SPOZNAJA IZ ESTUARIJA RIJEKE KRKE

dr. sc. Damir Viličić, prof. emerit.
Sveučilište u Zagrebu
Prirodoslovno-matematički fakultet
Horvátovac 102a, Zagreb, Hrvatska
e-mail: damir.vilicic@biol.pmf.hr

Estuarij rijeke Krke je jedinstven, u svijetu prepoznat prirodni fenomen u kršu sjeverne Dalmacije. Voda siromašna nutrijentima iz male rijeke Krke ulazi u more u uvjetima male plime i oseke i stvara visoko stratificirani sustav - s oštrom haloklinom koja odjeljuje bočati i morski sloj. Visokostatificirani estuariji su rijetki i nalaze se uz male rijeke Sredozemlja. Iz riječnog proširenja - Visovačkog jezera u estuarij ulazi slatkovodni fitoplankton koji ugiba u gradijentu saliniteta (halokline). U haloklini se nakupljaju suspendirane čestice koje ljeti znatno zagrijavaju haloklinu. Mikrobn razgradnja organske tvari oslobađa nutrijente u morski sloj gornjeg dijela estuarija gdje se razvijaju potpovršinska cvjetanja morskog fitoplanktona. U donjem dijelu estuarija rijeke Krke cvjetanje je površinsko jer je razvoj na većoj dubini ograničen svjetlošću. Miješanje slatke vode i mora, pogotovo u graničnom sloju halokline, dramatično mijenja ravnoteže kemijskih reakcija. Haloklina je mikrosloj u kojem se nakupljaju toksične tvari. U estuariju je prisutno kruženje elemenata.

Ključne riječi: Krka, estuarij, haloklina, istraživanja, Jadransko more

UVOD

Prije 45 godina, 22. prosinca 1980., Institut "Ruđer Bošković" osnovao je Istraživačku postaju na Martinskoj, na zapadnoj obali estuarija rijeke Krke u Šibeniku (Teskeredžić i Teskeredžić 2015). Jedinstvenu prirodno-znanstvenu vrijednost estuarija prvi je prepoznao Marko Branica, voditelj tadašnjeg Laboratorija za fizikalnu kemiju tragova i pokrenuo istraživanja. Kreirana je metoda za uzorkovanje specifičnog stratificiranog vodenog sustava, a prvi radovi su potvrdili pretpostavke o vrijednosti sustava (Kniewald i sur. 1987; Žutić i Legović 1987). U prvom desetljeću intenzivnih istraživanja, prirodno-znanstvena vrijednost estuarija prepoznata je na međunarodnoj razini. U razdoblju od 1990. do 2000. objavljeno je mnogo znanstvenih radova vrhunske kvalitete. Istraživanja u estuariju rijeke Krke nastavljaju se do danas u okviru postojećih znanstvenih projekata Instituta, a također projekata drugih znanstvenih ustanova koje se bave morem. Danas, istraživanja Laboratorija za fiziku mora i kemiju vodenih sustava, Zavoda za istraživanje mora i okoliša Instituta "Ruđer

Bošković" imaju podršku Grada Šibenika.

Cilj ovog preglednog rada je sažeti spoznaje o estuariju rijeke Krke kako bi postale dostupnije mnogima koji pokazuju interes za taj jedinstveni sustav našega krša.

1. RIJEKA KRKA I PRIPADAJUĆI ESTUARIJ

Rijeka Krka izvire pod planinom Dinarom u zaleđu sjeverne Dalmacije i protječe 50 km kroz Sjevernodalmatinsku kršku zaravan (Roglić 1957). Njen kanjon probija se kroz dinarsku karbonatnu platformu (Herak 1972). Rijeka ima kompleksan podzemni tok, a površina sliva iznosi 469 km² (Bonacci i Ljubenkov 2005).

Za geomorfologiju doline rijeke Krke važne su promjene u posljednjem ledenom dobu. Prije 26 000 godina, u posljednjem glacijalnom maksimumu, razina mora, a time i erozijska baza rijeke Krke, bila je 135 m niža od današnje (Peltier i Fairbanks 2006). Dolina rijeke je formirana u razdobljima regresije i danas se može pratiti u moru do izobate 60 m (Juračić i Prohić 1991;

Cukrov i sur. 2010). U postglacijalnom razdoblju, prije 8500-8000 godina erozijska snaga rijeke Krke smanjena je, što je omogućilo stvaranje sedrenih barijera (Šegota 1968; Kniewald i sur. 2006). U recentnom estuariju rijeke Krke, na potezu od Skradina do početka Prokljanskog jezera otkriveno je sedam morem potopljenih sedrenih barijera čija je starost procijenjena na manje od 9000 godina (Smrkulj i sur. 2024).

Rijeka Krka stvara Visovačko jezero, prirodnu akumulaciju slatke vode i sedam sedrenih barijera biogenog porijekla, od kojih je posljednja najveća – Skradinski Buk (Pavletić 1960). Rijeka Krka je mala rijeka jadranskog sliva s prosječnim dotokom vode od $48,9 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ na Skradinskom buku (Bonacci i Roje-Bonacci 2017). Nakon Skradinskog buka voda se ulijeva u more – fino naliježe na morski (gušći) sloj i stvara visikostratificirani sustav estuarija (Žutić i Legović 1987).

Estuarij rijeke Krke dug je 22 km (slika 1). Gornji dio estuarija proteže se uz gradić Skradin, širi se u Prokljansko jezero i nastavlja kanjonom uz rukavac s naseljem Zatonom do šibenskog mosta i sljedećeg proširenja – šibenske luke gdje počinje donji dio estuarija. Takva podjela podudara se sa sedimentacijskim karakteristikama estuarija (Cukrov i sur. 2010). Iza

šibenske luke nastavlja se Kanal sv. Ante, a estuarij završava kod istoimene tvrđave gdje se os Kanala Sv. Ante siječe s obalnom linijom Šibenskog kanala. Dubina estuarija postupno raste od 2 m na čelu estuarija do 42 m na njegovom kraju.

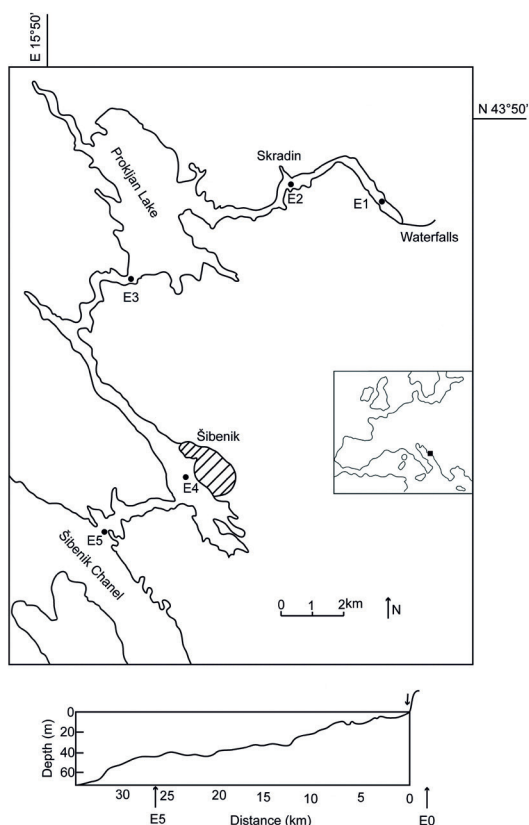
Rijeka Krka je oligotrofna rijeka s niskom koncentracijom fosfata ($\leq 0,1 \text{ } \mu\text{M PO}_4$) i za jedan red veličine većom koncentracijom nitrata u rijeci ($\sim 20 \text{ } \mu\text{M NO}_3$) nego u obalnom moru (Legović i sur. 1994). Najviše nitrata i silikata rijeka donosi u estuarij zimi i u proljeće što pokazuju negativne korelacije sa salinitetom (Cetinić i sur. 2006).

Donos terigenih čestica u estuarij je mali; $< 4 \text{ mg L}^{-1}$ u sloju iznad halokline. Glavnina suspendiranog materijala potječe iz okolnog fliša, a ulazi u more rječicom Gudučom i izvorom u Zatonu (Cukrov i sur. 2010, 2024). Brzina sedimentacije u srednjem dijelu estuarija iznosi $0,06 \text{ mm}$ godišnje (Hadži i sur. 1985; Juračić i Prohić 1991; Cukrov i Barišić 2006). Mali je donos organskog ugljika u estuarij (Cauwet 1991) i ukupne topljene organske tvari ($\sim 30 \text{ } \mu\text{M}$, Marcinek i sur. 2020).

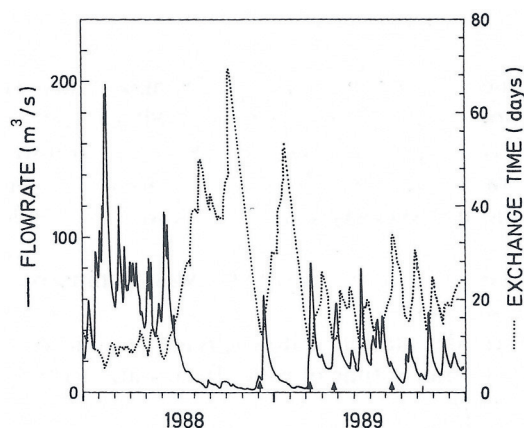
Uz pomoć protočne citometrije i drugim mogućnostima koje ta metoda nudi (diferencijalna inducirajuća fluorescencija i autofluorescencija), utvrđeno je da u estuariju dominiraju čestice manje od $2 \text{ } \mu\text{m}$, najčešće veličine od $0,74$ do $1,42 \text{ } \mu\text{m}$ (Moreira-Turcq i sur. 1993). Oko 80 % suspendiranih čestica su organske čestice, najveći udio imaju žive stanice manje od $2 \text{ } \mu\text{m}$ (pikoplankton) – cijanobakterije i njihova posebna linija proklorofiti (veličina stanica od $0,6$ do $0,8 \text{ } \mu\text{m}$). Određene su također male eukariotske stanice. Pikoplankton čini više od 50 % ukupne fitoplanktonske biomase, a 75 % suspendiranog organskog ugljika. Veličinska frakcija stanica od 10 do $15 \text{ } \mu\text{m}$ uglavnom su nanoplanktonske dijatomeje. Dijatomeje čine i krupniju veličinsku frakciju – mikrofitoplankton. Fotosintezom fitoplanktona oslobađaju se masne kiseline u estuariju (Scribe i sur. 1991).

Eufotički sloj u gornjem dijelu estuarija seže uvijek ispod halokline. Na temelju sedimentacije suspendirane organske tvari i usporedbom s podacima iz drugih svjetskih mora, estuarij rijeke Krke definiran je kao oligotrofni sustav (Svensen i sur. 2007). Uspoređujući stupanj trofije u uglavnom oligotrofnom Jadranu, šibenska luka pripada skupini lokaliteta s najvećom koncentracijom nutrijenata i najvećom učestalošću cvjetanja fitoplanktona (Viličić 1989). Česta su cvjetanja dijatomeja, npr. vrsta iz roda *Skeletonema* (Viličić i sur. 1990), dinoflagelata *Lingulodinium polyedricum* (Legović i sur. 1991b), *Prorocentrum minimum* (Marasović i sur. 1990) ili kriptofita (Šupraha i sur. 2014). Zooplankton je u estuariju sastavljen od estuarijsko-neritičkih vrsta (oitoonidni i kalanoidni kopepodi) koji za razliku od ostalih sličnih staništa uz našu obalu, postižu ekstremno velike abundancije (Kršinić 1987).

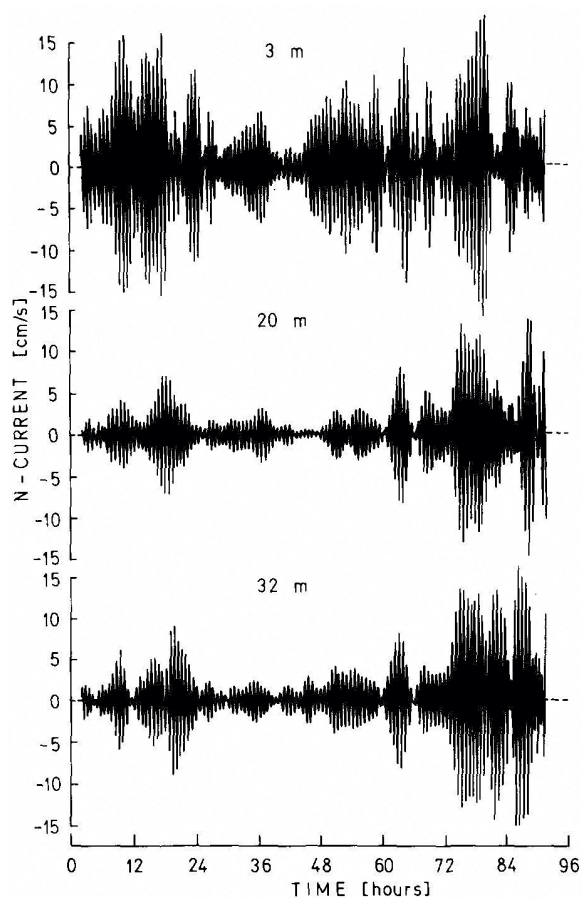
Vrijeme zadržavanja vode u estuariju rijeke Krke je šest dana (Legović 1991). Što je vrijeme zadržavanja vode kraće, uzdužni je prijenos biomase fitoplanktona



Slika 1: Pružanje estuarija Krke od Skradinskog buka do tvrđave Sv. Ante kod postaje E5. Standardne istraživačke postaje; iznad Skradinskog buka (E1), u gornjem (E2, E3) i u donjem dijelu estuarija (E4, E5). Precrtano iz rada Viličić i sur. (1989.).



Slika 2: Dotok vode rijekom u estuarij Krke (srednje dnevne vrijednosti iznad Skradinskog buka u $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) u 1988. i 1989. i vrijeme zadržavanja vode iznad halokline u danima. Kopirano iz rada Legović i sur. (1994.).



Slika 3: Oscilacije struja u cm s^{-1} u vodenom stupcu na kraju donjeg dijela estuarija. Komponente struja usmjerene prema sjeveru. Polazno vrijeme je 09:45 UTC, 14. veljače, 1986. Kopirano iz rada Orlić i sur. (1991.).

brži (slika 2).

Utvrđene su učestale i naizmjenične oscilacije struja u estuariju (Orlić i sur. 1991), što je vjerojatno rezultat internih valova duž estuarija koji nastaju interakcijom između topografije obale i površinskih seša (slika 3).

2. HALOKLINA I PROCESI VEZANI UZ HALOKLINU

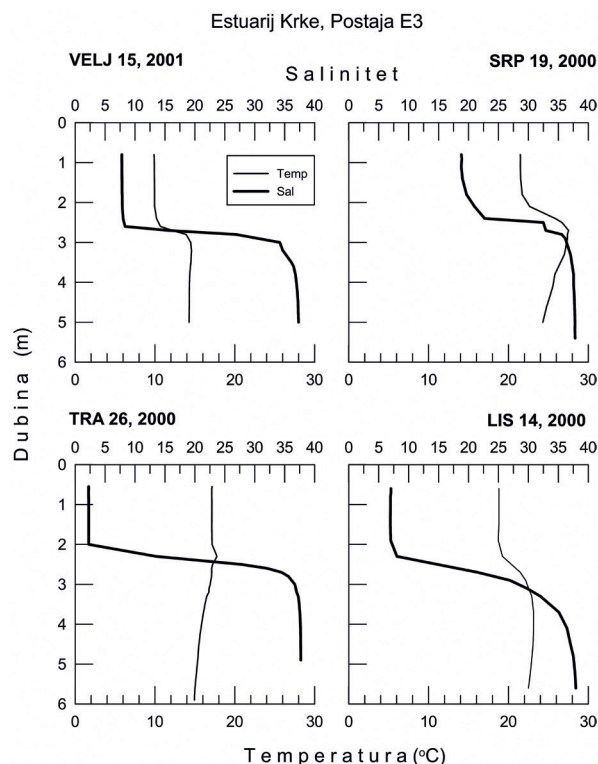
Visoko stratificirani estuariji su rijetki u svijetu (Dyer

1991). Stvaraju ih male rijeke Sredozemnog mora, uz mali rasponom plime i oseke. Uz istočnu obalu Jadrana to su Krka (Žutić i Legović 1987) i Zrmanja (Viličić i sur. 2008); u Španjolskoj – estuarij rijeke Ebro (Ibanez i sur. 1996) i u Grčkoj – estuarij rijeke Strymon (Haralambidou i sur. 2010).

Miješanje slatke vode i mora, pogotovo u haloklini, dramatično mijenja ravnoteže kemijskih reakcija (Mantoura 1987). U estuariju rijeke Tamar (između Cornwalla i Devona u Engleskoj, gdje je stratifikacija manja nego u estuariju rijeke Krke), već su ranije u haloklini dokazane biokemijske promjene, propadanje fitoplanktona zbog osmotskog šoka, nakupljanje otopljenih organske tvari i manjak kisika (Morris i sur. 1978).

U estuariju rijeke Krke raspon plime i oseke iznosi prosječno 20 cm. Oštra haloklina odvaja vodeni stupac u brakični sloj iznad halokline i morski sloj ispod halokline (slika 4). Kod dotoka vode između 10 i $100 \text{ m}^3 \text{s}^{-1}$, dubina halokline u gornjem toku estuarija na postaji E3 obično je na dubini između 1,8 i 3 m (Legović i sur. 1994). Haloklina je tamo dublja zimi, nalazi se na oko 5 m dubine.

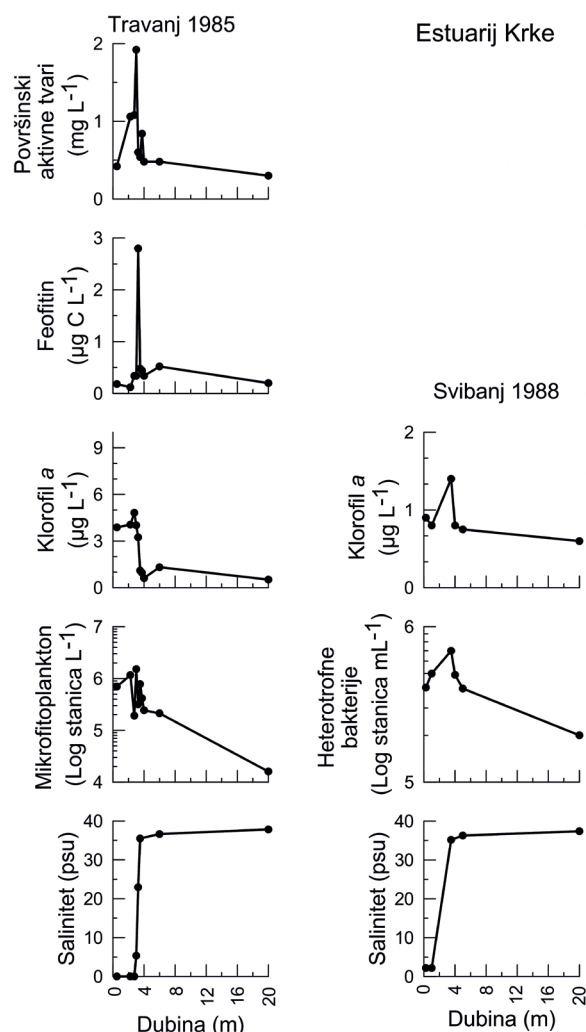
Snažan gradijent saliniteta (haloklina) i gustoće (piknoklina) nakuplja suspendirane čestice i organsku tvar, pa je donji dio tog sloja vidljiv odozdo ronioncu promatraču, a utvrđeno je više vidljivih mikroslojeva (Žutić i Legović 1987). Haloklina svuda nakuplja fitoplankton (Tiselius i sur. 1994; Viličić i sur. 1989), druge mikroorganizme (Soto i sur. 1993; Fuks i sur. 1991), zooplankton, kao što su ličinke kopepoda (Dagg i



Slika 4: Položaj halokline (salinitet) i termokline (temperatura) u estuariju rijeke Krke, na postaji E3, tijekom četiriju godišnjih doba (crtež D. Viličić). Položaj postaje E3 pokazuje slika 1.

Whitledge 1991) i bodljikaša (Metaxas i Young 1998), jaja i ličinke riba (Sabates 1990; Ropke i sur. 1993; Kingsford i Suthers 1994).

Događanja uz haloklinu estuarija rijeke Krke najbolje se vide u proljetnom hidrološkom režimu (slika 5). Koncentracija otopljenе organske tvari i njena površinska aktivnost te količina alohtone huminske tvari je u riječnoj vodi mala. Ukupne površinski aktivne tvari mjerene su elektrokemijskim metodama (Vojvodić i Čosović 1992). Oštra haloklina nalazi se na dubini od oko 3,5 m. U Visovačkom jezeru razvija se slatkovodni fitoplankton (limnoplankton) koji riječna voda donosi u površinski sloj estuarija, pa je abundancija fitoplanktona i koncentracija klorofila *a* veća iznad halokline. Stanice polagano tonu, u haloklini nailaze na snažan gradijent saliniteta i propadaju uslijed osmotskog šoka. Dokazano je da salinitet 4–7 djeluje na slatkovodni fitoplankton kao fiziološki stres koji narušava osmoregulaciju, aktivnost enzima i ionske pumpe, membranski potencijal i opstanak slatkovodnih organizama (Kinne 1971). Sličnu vrijednost graničnog saliniteta izdržljivosti za slatkovodni i morski fitoplankton pokazale su korelacije između saliniteta i koncentracije fitoplanktonskih pigmenata – biomarkera u estuariju rijeke Zrmanje (Viličić 2014: 10). Dezintegrirane stanice gube klorofil koji se raspada u produkte njegove razgradnje – feofitin čija koncentracija poraste 10 puta (tablica 1). Produkte razgradnje fotosintetskih pigmenata uz haloklinu pokazuju i preciznija kromatografska mjerenja (Ahel i sur. 1996). U haloklini se nakupljaju suspendirane čestice, partikulatni organski ugljik i površinski aktivni agregati. Površinski aktivni agregati su nežive čestice koje potječu od fitoplanktona i nanoflagelati sa stanicama veličine 0,5 – 10 μm , a prepoznaju se elektrokemijskim metodama i kao nezasićeni lipidi (Svetličić i sur. 1991). Gradijent saliniteta pogoduje kondenzaciji organskih molekula u agregate (Žutić i Legović 1987; Cauwet 1991; Sempéré i Cauwet 1995). Zbog raspadanja stanica fitoplanktona u haloklini raste količina otopljenе organske tvari i razvijaju se heterotrofne bakterije koje razgrađuju organski supstrat. Nakupljanje masnih kiselina u haloklini može se povezati s aktivnošću bakterija (Saliot i sur. 1997). Molekularnim metodama utvrđena je velika raznolikost bakterija (Korlević i sur. 2016). Nakupljanje nanoplanktona u haloklini dokazali su Denant i sur. (1991) jer su tamo povoljni uvjeti za razvoj heterotrofnih i miksotrofnih stanica. Pojačana biološka aktivnost u haloklini estuarija rijeke Krke okidač je za sintezu liganada koji kompleksiraju i tamo nakupljaju bakar (Louis i sur. 2009; Plavšić i sur. 1982). Na površini estuarija utvrđeno je da sintezu organskih liganada koji vežu bakar regulira taloženje peludi i aerosola nakon požara biomase na otvorenom (Strmečki i sur. 2024). U haloklini su Ahel i Terzić (2003) dokazali biotransformaciju aromatskih površinski aktivnih tvari i nakupljanje lipofilnih metabolita anionskih alkilfenolnih polietoksilata. Raspodjelu sterola kao mogućih pokazatelja izvora organske tvari (kopnene biljke;



File: HDDIProj/Krka ZO/Krka/KRKA 0485 hr

Slika 5: Struktura vodenog stupca u estuariju Krke, na postaji E3 u proljeće 1985. i 1988.; Salinitet (haloklina), abundancija mikrofitoplanktona, biomasa fitoplanktona (koncentracija klorofila *a*), koncentracija feofitina, količina površinski aktivne tvari i abundancija heterotrofnih bakterija. Prerađeno prema podacima objavljenim u Viličić i sur. (1989) te Fuks i sur. (1991). Položaj postaje E3 pokazuje slika 1.

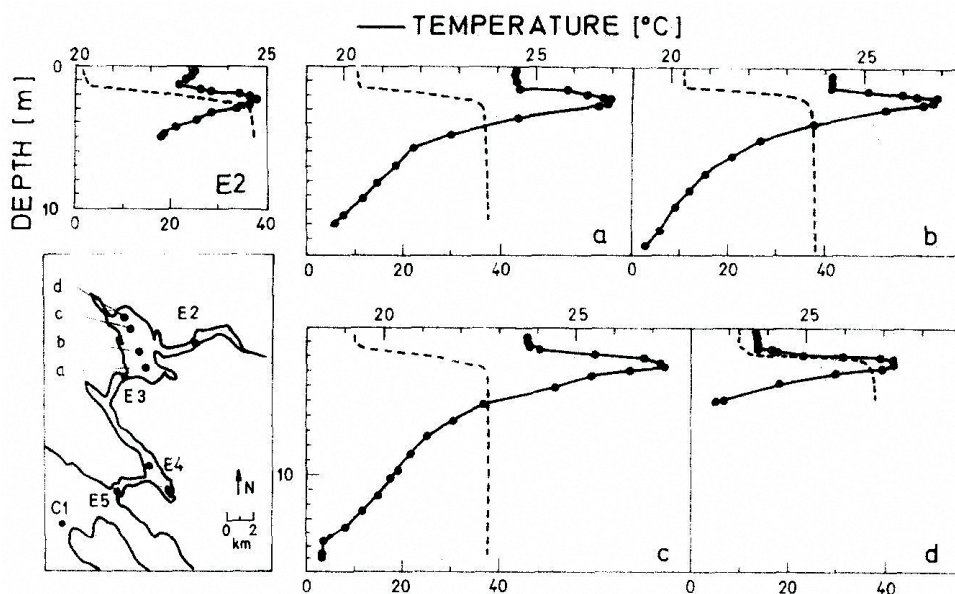
slatkovodni i morski fitoplankton; otpadne vode u zoni grada Šibenika) analizirali su Laurillard i Saliot (1993).

Mikrobna razgradnja organske tvari u haloklini povećava koncentraciju nutrijenata u morskom sloju (Žutić i Legović 1987; Viličić i sur. 1989; Sierra i sur. 2002). Mikrobnu zajednicu mikrobnog kruga (mikrobne hranidbene mreže) bilo bi zanimljivo dalje istraživati jer unutar halokline postoje slojeviti uvjeti za dinamičnu mikrobnu razgradnju organske tvari i mikrobnu regeneraciju anorganskih nutrijenata. Nakon potpovršinskog cvjetanja fitoplanktona zabilježen je nedostatak kisika i mortalitet bentosa u gornjem dijelu estuarija do Prokljanskog jezera (Legović i sur. 1991a; Petricioli i sur. 1996). Visok omjer N/P pokazuje da fosfor limitira rast morskog fitoplanktona u estuariju (Legović i sur. 1994).

Nakupljanje suspendiranih čestica u haloklini estuarija rijeke Krke stvara temperaturni maksimum u tom mikrosloju jer uz ograničenu izmjenu topline,

Depth (m)	Salinity (‰)	POC/Chl	Chl/Phaeo
0.50	0	68	21
2.25	0	124	32
2.75	0	105	14
3.00	5.37	107	12
3.25	22.98	298	1.1
3.50	35.53	262	1.2
3.75	35.59	276	1.8
4.0	36.62	357	1.9
6.0	36.66	198	2.6
23	37.85	308	2.5

Tablica 1: Omjeri između partikulatnog organskog ugljika (POC) i klorofila a (Chl), te klorofila a i feofitina (Phaeo) na postaji E3 u travnju 1983. Kopirano iz rada Viličić i sur. (1989).

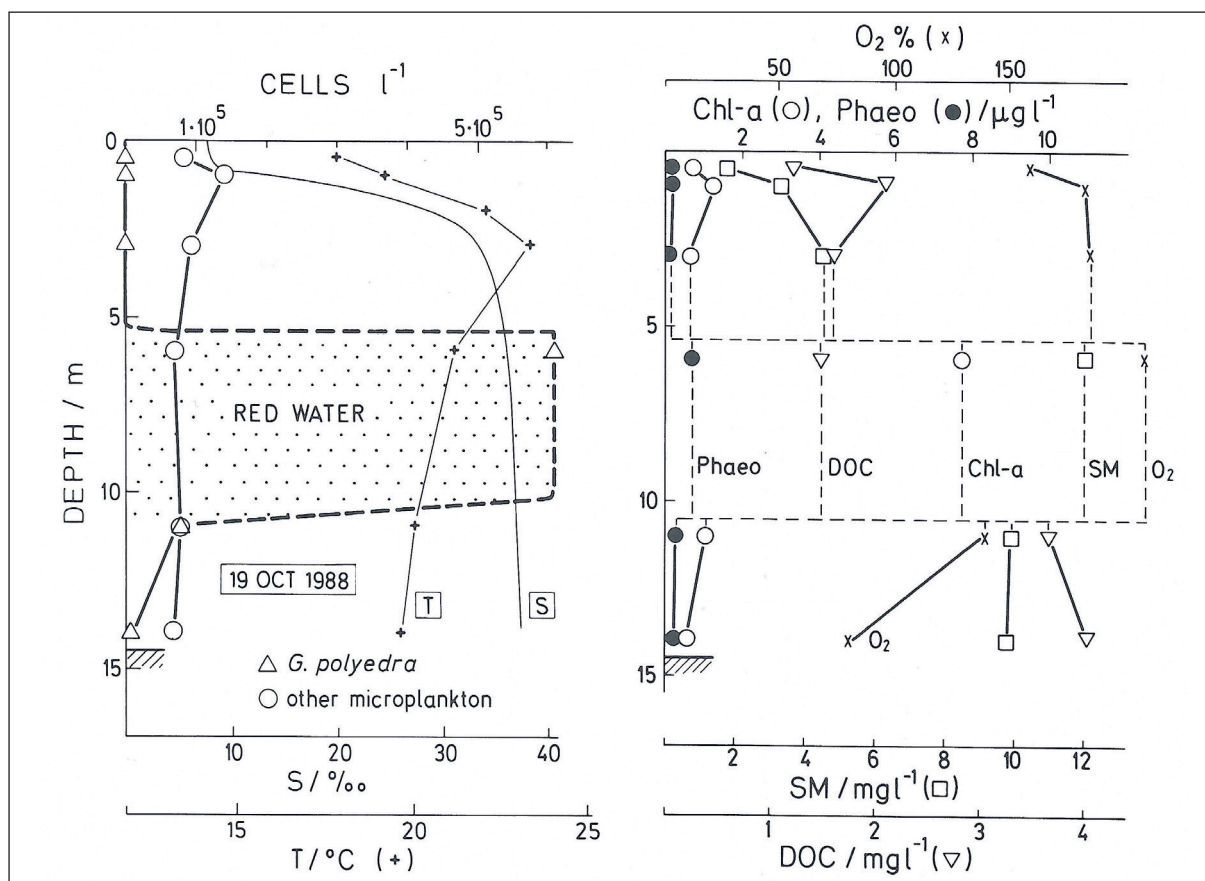


Slika 6: Potpovršinski temperaturni maksimum u estuariju Krke najjače je razvijen ljeti kad je sunčevo zračenje najjače. Kopirano iz rada Legović i sur. (1991b).

Tablica 2: Vertikalna raspodjela s abundancijom 32 vrste fitoplanktona (stanica/L) na postaji E3 u studenom 1984. Abundancija manja od 10 stanica/L prikazana je brojem 0. Kopirano iz rada Viličić i sur. (1989.). Kazalo vrsta: *As fo*- *Asterionella formosa*, *Gr fl*-zeleni flagelati, *Ni ac*- *Nitzschia acus*, *Pe sp*- *Peridinium sp.*, *Dinob*- *Dinobryon sp.*, *Di el*-*Diatoma elongatum*, *P min*- *Prorocentrum minimum*, *Rh ti*- *Rhabdosphaera clavigera*, *Ce fu*- *Ceratium furca*, *Ce tr*- *Ceratium tripos*, *Go di*- *Goniaulax diacantha*, *P mic*- *Prorocentrum micans*, *Ce pe*- *Cerataulina pelagica*, *Le ad*- *Leptocylindrus adriaticus*, *Sk co*- *Skeletonema sp.*, *Rh fr*- *Rhizosolenia fragilissima*, *Ni de*- *Pseudonitzschia sp.1*, *Ox sc*- *Oxytoxum scolopax*, *Th ni*- *Thalassionema nitzschioides*, *Ca gr*- *Calciosolenia granii*, *Ch si*- *Chaetoceros simplex*, *Da me*- *Dactylosolen mediterraneus*, *Th me*- *Thalassiothrix mediterraneus*, *Pr tr*- *Prorocentrum triestinum*, *Go po*- *Goniodoma polyedricum*, *Ps va*- *Pseliodinium vaubanii*, *Ca mu*- *Calciosolenia murrayi*, *Ni se*- *Pseudonitzschia sp.2*, *Rh im*- *Rhizosolenia imbricata*, *Pe bu*- *Protoperidinium sp.*, *Ko ve*- *Kofofidinium velledoides*, *Di bo*- *Diploneis bombus*.

Depth (m)	Species																
	<i>As fo</i>	<i>Gr fl</i>	<i>Ni ac</i>	<i>Pe sp</i>	<i>Dinob</i>	<i>Di el</i>	<i>P min</i>	<i>Rh ti</i>	<i>Ce fu</i>	<i>Ce tr</i>	<i>Go di</i>	<i>P mic</i>	<i>Ce pe</i>	<i>Le ad</i>	<i>Sk co</i>	<i>Rh fr</i>	<i>Ni de</i>
0.5	5 140	638 500	80	5 110	61 340	0	15 400	2 560	0	0	15 400	0	0	0	0	0	10 224
1.0	10 224	1 014 100	240	0	0	0	35 800	2 560	0	0	0	0	0	0	0	0	1 280
1.5	15 300	930 000	640	0	0	0	10 200	2 560	0	0	0	0	0	0	0	0	5 100
1.8	2 556	960 000	640	640	5 110	30 700	17 900	1 920	0	80	640	640	0	0	0	0	20 450
1.9	3 000	1 296 000	80	2 556	28 120	14 000	107 000	1 280	80	40	40	40	80	0	0	0	5 100
2.0	17 900	0	0	0	2 560	0	540	211 270	320	1 100	640	174 000	0	0	10 200	1 280	125 200
2.3	0	0	0	0	1 280	0	320	640	640	1 360	40	960	66 500	10 200	76 700	30 700	50 500
2.5	0	0	0	0	0	240	2 560	640	480	0	97 700	320	2 560	960	5 800	7 700	40 900
6.0	0	0	0	0	0	0	640	2 560	0	0	0	80	12 800	0	99 700	43 500	708 900
23.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	160	0	320	0	0	33 900	160	7 660

Species															
	<i>Ox sc</i>	<i>Th ni</i>	<i>Ca gr</i>	<i>Ch si</i>	<i>Da me</i>	<i>Th me</i>	<i>Pr tr</i>	<i>Go po</i>	<i>Ps va</i>	<i>Ca mu</i>	<i>Ni se</i>	<i>Rh im</i>	<i>Pe bu</i>	<i>Ko ve</i>	<i>Di bo</i>
0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.8	640	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1.9	0	1 900	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.0	0	0	1 200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.3	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
2.5	0	0	1 280	1 500	2 900	80	10 200	960	160	0	0	0	0	0	0
6.0	2 560	400	0	0	0	3 200	0	0	0	7 660	17 900	2 560	120	80	0
23.0	0	1 920	0	0	0	0	0	0	0	0	2 560	0	0	0	640



Slika 7: Potpovršinsko cvjetanje morskog dinoflagelata *Gymnodinium polyedra*; vertikalna raspodjela fizičko-kemijskih i bioloških parametara u SZ dijelu Prokljanskog jezera 19. listopada 1988. Lijevo – temperatura (T), salinitet (S), abundancija dinoflagelata s crvenim pigmentom (red water) i ostalih stanica mikrofitoplanktona (stanica/L); desno – zasićenje kisikom (O₂%), biomasa fitoplanktona (Chl a), koncentracija feofitina (Phaeo), suspendirane tvari (SM), i otopljenog organskog ugljika (DOC). Kopirano iz rada Legović i sur. (1991c).

na česticama dolazi do selektivne apsorpcije Sunčeve energije (slika 6, Legović i sur. 1991b). Ljeti temperatura u haloklini na postaji E3 može dostići 28,6 °C (Gržetić 1990).

Oštra haloklina koja se približno podudara s termoklinom, granica je vertikalne rasprostranjenosti vrsta fitoplanktona. Slatkovodne vrste iz Visovačkog jezera u estuariju nalazimo iznad halokline, a morske vrste su ispod halokline (tablica 2). Neke morske vrste tolerantnije na niži salinitet migriraju kroz haloklinu u brakični sloj. Uz morski sloj vezani su kokolitoforidi s periplastom od kalcijevog karbonata (Šupraha i sur. 2016). Od vrsta koje su tolerantne na niži salinitet i često se pojavljuju u estuarijima, opisani su nanoflagelati – kriptofiti koji povremeno ljeti izazivaju cvjetanje iznad halokline u donjem dijelu estuarija, gdje je bočati sloj obogaćen nutrijentima iz šibenske luke (Šupraha i sur. 2014).

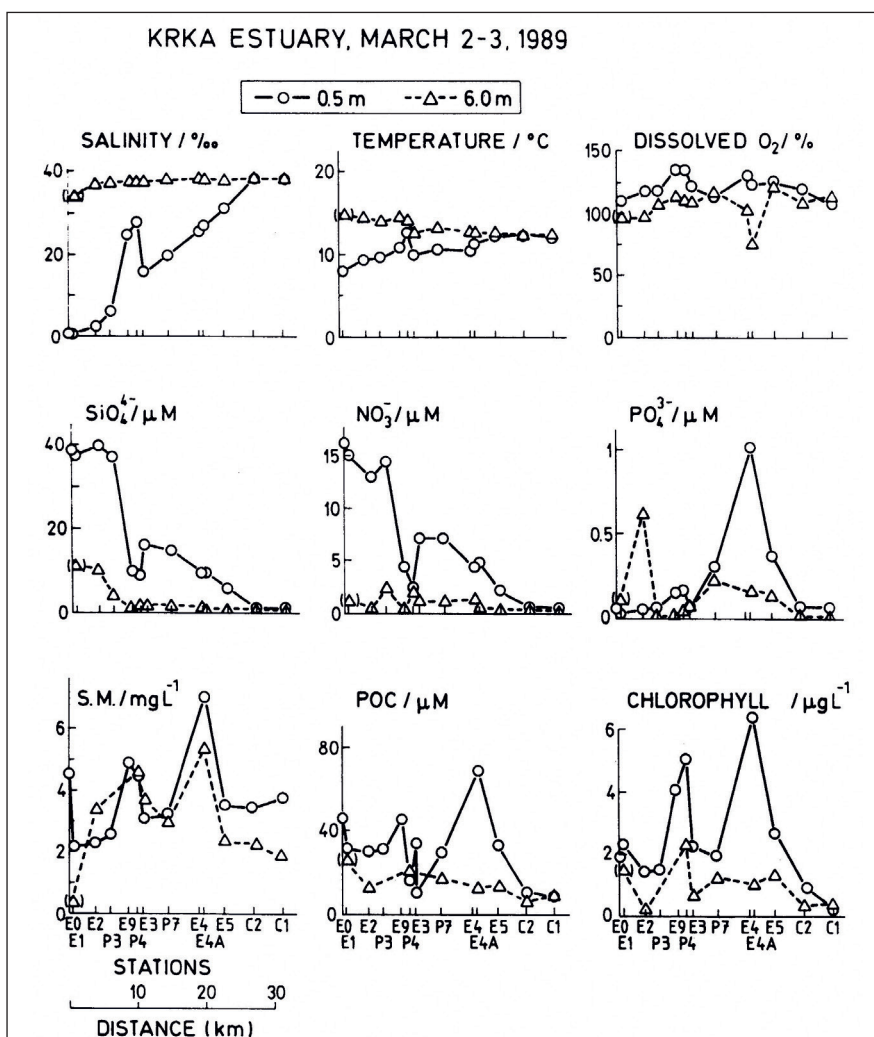
U estuariju rijeke Krke karakteristično je potpovršinsko cvjetanje fitoplanktona. Kako se događa ispod halokline, promatrač ga ne vidi s površine. Ujesen se često razvija morski dinoflagelat *Lingulodinium polyedricum* (Legović i sur. 1991c). U vrijeme niskog dotoka slatke vode (5 m³ s⁻¹) i temperature pri dnu veće od 20 °C, endospore dinoflagelata počnu se u sedimentu razvijati u gustu populaciju pokretnih stanica. U prozirnoj vodi dovoljno

je svjetlosti za fotosintezu, pa pokretne stanice migriraju prema površini i ispod halokline razvijaju cvjetanje te staničnim pigmentom oboje vodu u crveno (slika 7). Stanice te vrste su stenohaline i ne mogu proći kroz haloklinu prema površini.

3. TROFIČKI STUPANJ, UZDUŽNI PROCESI I BIOGEOKEMIJSKI ODNOSI

U gornjem dijelu estuarija morski fitoplankton razvija se ispod halokline na račun nutrijenata koji se oslobađaju mikrobnom razgradnjom propalog slatkovodnog fitoplanktona u haloklini. Razvoj fitoplanktona limitiran je fosforom. U donjem dijelu estuarija oko grada Šibenika postoji antropogeni donos nutrijenata (Gržetić i sur. 1991), pa tamo raste biomasa fitoplanktona (slika 8, Denant i sur. 1991; Legović i sur. 1994). Glavnina anorganskog dušika i silicija ulazi u estuarij putem podzemskih izvora iako ti izvori čine manji dio od ukupne količine vode koja dotječe u estuarij (Liu i sur. 2019).

Za razliku od gornjeg dijela estuarija gdje je zabilježeno cvjetanje fitoplanktona u morskom sloju (ispod halokline), cvjetanje fitoplanktona u donjem dijelu estuarija najčešće se događa uz površinski sloj – oko plitke halokline (Ahel i sur. 1996) gdje ima dovoljno

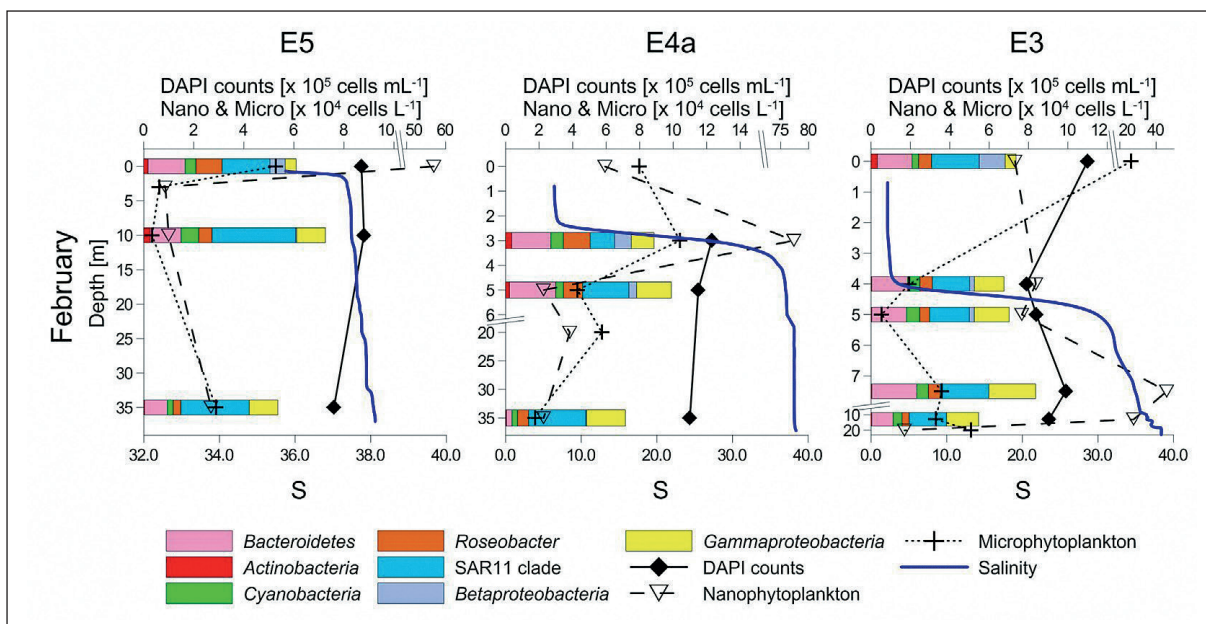


Slika 8: Uzdužna raspodjela saliniteta, temperature, otopljenog kisika, koncentracije nutrijenata (silikata, nitrata, fosfata), suspendirane tvari (SM), partikulatnog organskog ugljika (POC) i biomase fitoplanktona (klorofila a) u brakičnom i u morskom sloju estuarija Krke u ožujku 1989. Kopirano iz rada Legović i sur. (1994.). Položaj postaja pokazuje slika 1.

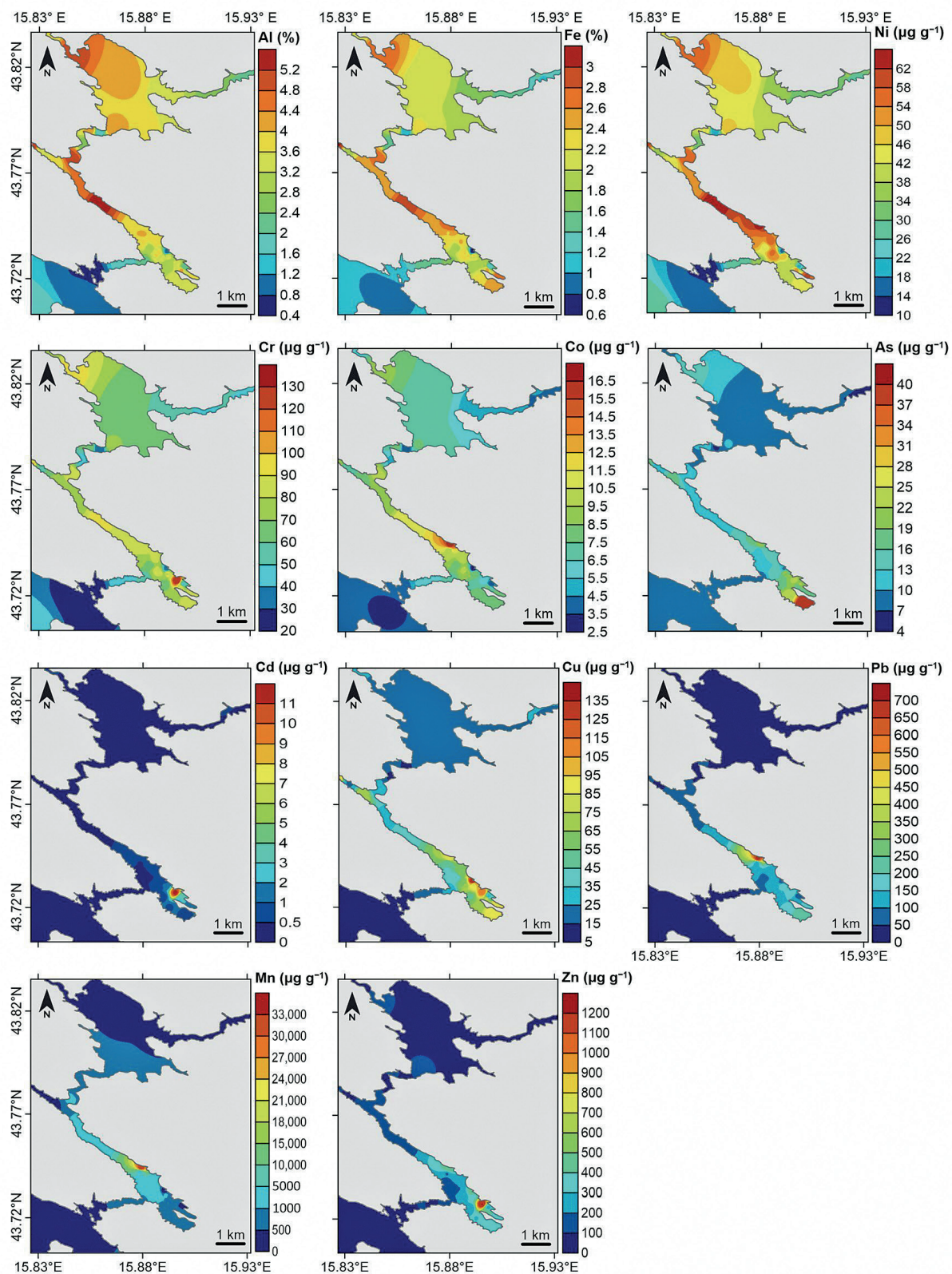
svjetlosti za fotosintezu. Masovni razvoj fitoplanktona određuje strukturu bakterijske zajednice duž estuarija i u vodenom stupcu (slika 9, Korlević i sur. 2016).

Manje suspendirane čestice održavaju se duže u suspenziji, a veće čestice se brže talože u sediment (ovisno također o gustoći slojeva vode), a o tome ovisi recikliranje elemenata (Turner i Millward 2002).

Periplast pojedinih predstavnika fitoplanktona građen je od CaCO_3 , SiO_2 , ili od proteina pa te tvari ulaze u biogeokemijske procese kruženja elemenata (Viličić 2003: 48–53; 2014). U estuariju rijeke Krke možemo pratiti sudbinu tih elemenata, od donosa riječnom vodom ili stanicama limnoplanktona, preko mikrobne razgradnje i regeneracije nutrijenata u estuariju do sedimentacije i kasnije ponovne resuspenzije iz sedimenta u vodeni stupac. Stanice slatkovodnog fitoplanktona tonu u gornjem dijelu



Slika 9: Vertikalna raspodjela ukupnog pikoplanktona (abundancija uz korištenje fluorokroma DAPI), prokariota (određenih metodom CARD-FISH), nanofitoplanktona i mikrofitoplanktona (abundancija klasičnom mikroskopijom), u estuariju Krke (na postajama E3, E4a i E5), u veljači 2013. Kopirano iz rada Korlević i sur. (2016). Položaj postaja pokazuje slika 1.



Slika 10: Raspodjela i koncentracija ($\mu\text{g g}^{-1}$) metala Al, Fe, Ni, Cr, Co, As, Cd, Cu, Pb, Mn i Zn u površinskom sedimentu estuarija Krke. Kopirano iz rada Cukrov i sur. (2024).

estuarija; najbrže tonu dijatomeje uz čelo estuarija brzinom $0,7 - 1,5 \text{ m dan}^{-1}$ iznad halokline i $0,03 - 0,6 \text{ m dan}^{-1}$ ispod halokline (Legović i sur. 1996). S bržim dotokom riječne vode brzina tonjenja dijatomeja raste. Silicij je u Visovačkom jezeru u obliku topivih polimera ortosilicijeve kiseline. Topivi silicij tamo uzimaju dijatomeje za izgradnju netopivog opala u periplastu stanica. Propadanjem tih stanica u haloklini estuarija, opal se vraća u topivu formu, ubrzano se topi u morskom sloju, gdje ga morske dijatomeje ponovno iskorištavaju za izgradnju svojih ljušturica. Na taj način događa se naizmjenična transformacija silicija iz netopive u topivu formu duž estuarija i iza ušća u more. Skelet stanica od silicija nalazimo u silikoflagelata koji su povremeno česti u estuariju zimi. Zanimljivo je da susjedni estuarij krške rijeke Zrmanje nema slatkovodnu akumulaciju niti intenzivniji razvoj slatkovodnih planktonskih dijatomeja. Stoga je biogeokemija silicija u estuariju rijeke Zrmanje vezana uz bentske dijatomeje (Burić i sur. 2004) koje, kao i u drugim rijekama, odnosi s podloge u more riječna struja.

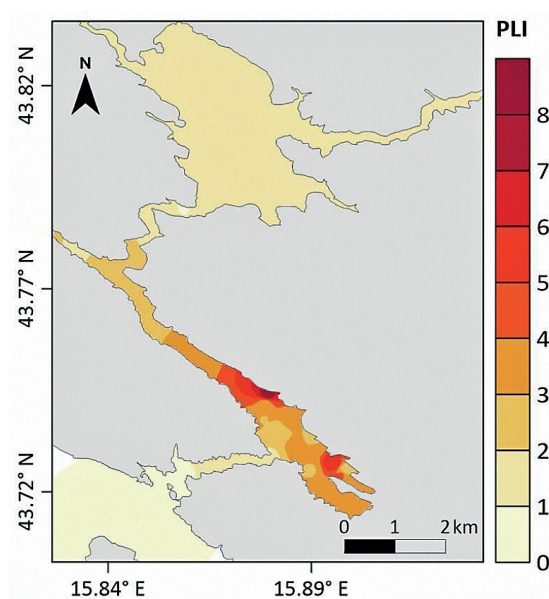
Najpoznatiji predstavnici fitoplanktona koji imaju periplast modificiran u pločice od CaCO_3 (kokolite) u estuariju rijeke Krke su kokolitoforidi (Šupraha i sur. 2016). Kokolitoforidi su važni za biogeokemijsko kruženje ugljika u biosferi (Iglesias-Rodríguez i sur. 2002). Periplast od proteina je u kriptofita (Šupraha i sur. 2014).

4. ONEČIŠĆENJA I ŠTETNE TVARI U ESTUARIJU

Dokazano je da se teški metali šire u morskom sloju estuarija od izvorišta onečišćenja prema gornjem dijelu estuarija i nakupljaju se u haloklini (Mikac i sur. 1989). Za spoznaje o toksičnim tvarima u estuariju važne su analize sedimenta. Poznato je da sedimenti nisu konačno mjesto gdje se talože teški metali. Oni mogu biti izvor kontaminacije za vodeni stupac procesima desorpcije i difuzije, resuspenzijom i bioturbacijom i bioirigacijom. Tako se metali mogu višestruko reciklirati u graničnom sloju voda – sediment prije nego što se konačno deponiraju u sediment ili ih odnese voda. Kontaminacija metala u sedimentu uzrokuje pogoršanje kvalitete vode i ima određene učinke na vodene organizme, ekosustav i zdravlje ljudi (Kristensen i sur. 2000). Onečišćenje estuarija nastaje antropogenim unosom teških metala koji imaju svojstvo perzistencije, toksičnosti i bioakumulacije.

Riječna voda i gornji dio estuarija nemaju teških metala koji bi pokazali kontaminaciju (1,7 nM arsena (As), 2,45 nM selena (Se), Seyler i Martin 1991), ali sediment u luci Šibenik je jače kontaminiran metalima iz negdašnje tvornice ferolegura (Mn, Pb), luke Šibenik (Cd, Zn, Cr, Cu, As) i nautičkih djelatnosti u marini i brodogradilištu (As) (slika 10, Cukrov i sur. 2024). Suspendirani materijal iz fliša što ga donose rječica Guduča i Zatonski izvor, prirodni su izvor teških metala kao što su Ni i Cr.

Glavne tvari koje kontaminiraju estuarij rijeke Krke



Slika 11: Prostorna raspodjela indeksa opterećenja zagađivačima (engl. *pollution load index*, PLI) u površinskim sedimentima estuarija Krke. Vrijednosti < 1 pokazuju opterećeni/zagađeni sediment. Kopirano iz rada Cukrov i sur. (2024).

jesu: Mn, Pb, Zn, Cd i Cu. Iako su izvori kontaminacije uklonjeni prije mnogo godina (tvornica ferolegura, otpadne vode gradske kanalizacije), koncentracija teških metala još uvijek je prisutna u sedimentu. Onečišćenje/zagađenje je pokazano indeksima opterećenja PSI – engl. *pollution load indexes* (slika 11, Cukrov i sur. 2024).

Od toksina koje sintetiziraju mikroorganizmi u estuariju rijeke Krke, zanimljive su dijatomeje iz roda *Pseudo-nitzschia* koje u određenim uvjetima oslobađaju domoičnu kiselinu (Arapov i sur. 2015).

Prema svim znanstvenim spoznajama i usporedbom estuarija sa sličnim ekološkim sustavima, estuarij rijeke Krke još uvijek je zdrav okoliš, pa ne čudi što je u njemu dokazano mriješćenje srdele (Sinovčić i sur. 2008).

Recentna istraživanja u estuariju rijeke Krke usmjerena su na zanimljive skupine bakterija – fakultativne aerobne fotosintetske bakterije (Šantić i sur. 2017), sanitarnu mikrobiologiju (Kapetanović i sur. 2008; Malnar i sur. 1996), faunu anihilalinih špilja (Cukrov i sur. 2012), mineraloški, granulometrijski i kemijski sastav sedimenata (Hadži i sur. 1985), uzgoj školjkaša (Marguš i sur. 2005) ili kontaminaciju mikroplastikom (Parać i sur. 2022).

5. ZAKLJUČAK

Važne okolnosti koje čine estuarij rijeke Krke jedinstvenim prirodnim fenomenom u našem kršu jesu sljedeće:

1. Voda male krške rijeke Krke siromašna je fosforom, dušikom i terigenim česticama.

2. Riječna voda prelijeva se preko slapova i pod slabim utjecajem plime i oseke fino naliježe na morsku vodu i tako stvara oštru granicu – haloklinu, odvajajući površinski bočati sloj od morskog sloja. Snažan gradijent saliniteta u haloklini mijenja optička svojstva

medija i vidljiv je kao ploha koja se valovito giba zbog specifičnog strujanja i internih valova u sustavu.

3. Slatkovodni fitoplankton koji dolazi iz prirodne akumulacije vode Visovačkog jezera tone i ugiba u snažnom gradijentu saliniteta halokline te obogaćuje haloklinu s organskom tvari.

4. U haloklini je povećana mikrobna aktivnost, aktivnost biokemijskih reakcija transformacije elemenata i regeneracija hranjivih soli.

5. Suspendirane čestice u haloklini selektivno apsorbiraju Sunčevu energiju, što znatno povećava temperaturu u tom mikrosloju.

6. U bočatom i morskom sloju različit je sastav planktonskih mikroorganizama.

7. U gornjem dijelu estuarija morski fitoplankton povremeno razvija potpovršinsko cvjetanje (koje se ne vidi na površini). ■

LITERATURA

Ahel, M.; Barlow, R. G.; Mantoura, R. F. C. 1996. Effect of salinity gradients on the distribution of phytoplankton pigments in a stratified estuary. *Marine Ecology Progress Series*. 143: 289–295.

Ahel, M.; Terzic, S. 2003. Biogeochemistry of aromatic surfactants in microtidal estuaries. *Chimia*. 57: 550–555.

Arapov, J.; Ujević, I.; Marić Pfannkuchen, D.; Godrijan, J.; Bakrač, A.; Ninčević Gladan, Ž.; Marasović, I. 2015. Domoic acid in phytoplankton net samples and shellfish from the Krka River estuary in the Central Adriatic Sea. *Mediterranean Marine Science*. 17: 340–350.

Bonacci, O.; Bonacci-Roje, T. 2017. Contribution to the studying the hydrology of Skradinski buk on the Krka river. *Hrvatske vode*. 25: 27–36.

Bonacci, O.; Ljubenković, I. 2005. New insights into the Krka river hydrology. *Hrvatske vode*. 13: 265–281.

Burić, Z.; Caput, K.; Viličić, D. 2004. Distribution of the diatom *Cocconeis scutellum* in the karstic estuary (Zrmanja, eastern Adriatic Sea). *Biologia*. 59: 1–7.

Cauwet, G. 1991. Carbon inputs and biogeochemical processes at the halocline in a stratified estuary: Krka River. *Marine Chemistry*. 32: 269–283.

Cetinić, I.; Viličić, D.; Burić, Z.; Olujić, G. 2006. Phytoplankton seasonality in a highly stratified karstic estuary (Krka, Adriatic Sea). *Hydrobiologia*. 555: 31–40.

Cukrov, N.; Barišić, D. 2006. Spatial distribution of ⁴⁰K and ²³²Th in recent sediments of the Krka River Estuary. *Croatia Chemica Acta*. 79: 115–118.

Cukrov, N.; Surić, M.; Fuček, L.; Čosović, V.; Korbar, T.; Juračić, M. 2010. Geologija estuarija rijeke Krke. *Zbornik radova 4. Hrvatskog geološkog kongresa*. Šibenik. 143–148.

Cukrov, M.; Cukrov, N.; Jalžić, B.; Babačić Ajduk, A. 2012. Anchialine cave Špilja in Vidrovača Bay (Krka River estuary, Croatia), preliminary biogeochemical prospection. *Natura Croatica*. 21(1). 32–35.

Cukrov, N.; Cindrić, A.-M.; Omanović, D.; Cukrov, N. 2024. Spatial distribution, ecological risk assessment, and source identification of metals in sediments of the Krka river estuary (Croatia). *Sustainability*. 16: 1800.

Dagg, M. J.; Whitledge, T. E. 1991. Concentrations of copepod nauplii associated with the nutrient – rich plume of the Mississippi river. *Continental Shelf Research*. 11: 1409–1423.

Denant, V.; Saliot, A.; Mantoura, R. F. C. 1991. Distribution of algal chlorophyll and carotenoid pigments in a stratified estuary: the Krka river, Adriatic Sea. *Marine Chemistry*. 32: 285–297.

Dyer, K. R. 1991. Circulation and mixing in stratified estuaries. *Marine Chemistry*. 32: 111–120.

Fuks, D.; Devescovi, M.; Precali, R.; Krstulović, N.; Šolić, M. 1991. Bacterial abundance and activity in the highly stratified estuary of the Krka River. *Marine Chemistry*. 32: 333–346.

Gržetić, Z. 1990. *Osnovna hidrološka i kemijska svojstva estuarija Krke*. Doktorska disertacija. Sveučilište u Zagrebu.

Gržetić, Z.; Precali, R.; Deggobis, D.; Škrivanić, A. 1991. Nutrient enrichment and phytoplankton response in an Adriatic karstic estuary. *Marine Chemistry*. 32: 313–331.

Hadži, O.; Juračić, M.; Luić, M.; Tonković, M.; Juričević, B. 1985. The carbohydrates in relation to mineralogic and granulometric composition of surface sediments in the karst estuary (River Krka estuary, Yugoslavia). *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 21: 701–709.

Haralambidou, K.; Sylaios, G.; Tsihrintzis, V. A. 2010. Salt-wedge propagation in a Mediterranean micro-tidal river mouth. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 90: 174–184.

Herak, M. 1972. Karst of Yugoslavia. *Important karst regions of the northern hemisphere*. Elsevier. Amsterdam. 25–83.

Ibanez, C.; Prat, N.; Canicio, A. 1996. Changes in the hydrology and sediment transport produced by large dams on the lower Ebro River and Estuary. *Regulated Rivers: Research and Management*. 12: 51–62.

Iglesias-Rodríguez, M. D.; Brown, C. W.; Doney, S. C.; Kleypas, J.; Kolber, D.; Kolber, Z.; Hayes, P. K.; Falkowski, P. G. 2002. Representing key phytoplankton functional groups in ocean carbon cycle models: Coccolithophorids. *Global Biogeochemical Cycles*. 16: 47–147.

Juračić, M.; Prohić, E. 1991. Mineralogy, sources of particles and sedimentation in the Krka River Estuary (Croatia). *Geološki vjesnik*. 44: 195–200.

Kapetanović, D.; Vardić, I.; Kurtović, B.; Valić, D.; Teskeredžić, E. 2008. Detection of the causative agent of furunculosis, *Aeromonas salmonicida* in salmonids of the Krka River. *Veterinary Research Communications*. 32: 131–135.

Kinne, O. 1971. *Marine ecology*. 1(2). Inter – Research.

Lüneburg, Germany.

Kingsford, M. J.; Suthers, I. M. 1994. Dynamic estuarine plumes and fronts: importance to small fish and plankton in coastal waters of NSW, Australia. *Continental Shelf Research*. 14: 655–672.

Kniewald, G.; Kwokal, Ž.; Branica, M. 1987. Marine sampling by scuba diving. 3. Sampling procedures for measurement of mercury concentrations in estuarine waters and seawater. *Marine Chemistry*. 22: 343–352.

Kniewald, G.; Marguš, D.; Mihelčić, G. 2006. Formation of the Krka river estuary in Croatia and the travertine barrier phenomenon. Proceedings of the Symposium *Fluxes of small and medium-size Meediterranean rivers: impact on coastal areas*, Trogir (Ed. Briand, F.). *CIESM Workshop Monographs*. 30: 93–96.

Korlević, M.; Šupraha, L.; Ljubešić, Z.; Henderiks, J.; Ciglencčki, I.; Dautović, J.; Orlić, S. 2016. Bacterial diversity across a highly stratified ecosystem: A salt-wedge Mediterranean estuary. *Systematic and Applied Microbiology*. 39: 398–408.

Kristensen, E. 2000. Organic matter diagenesis at the oxic/anoxic interface in coastal marine sediments, with emphasis on the role of burrowing animals. *Hydrobiologia*. 426: 1–24.

Kršinić, F. 1987. Tintinnines (Ciliophora, Oligotrichida, Tintinnina) in eastern Adriatic bays. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 24: 527–538.

Laurillard, J.; Saliot, A. 1993. Biomarkers in organic matter produced in estuaries: a case study of the Krka estuary (Adriatic Sea) using the sterol marker series. *Marine Chemistry*. 43: 247–261.

Legović, T. 1991. Exchange of water in a stratified estuary with an application to Krka (Adriatic Sea). *Marine Chemistry*. 32: 121–135.

Legović, T.; Petricoli, D.; Žutić, V. 1991a. Hypoxia in a pristine stratified estuary (Krka, Adriatic Sea). *Marine Chemistry*. 32: 347–359.

Legović, T.; Gržetić, Z.; Žutić, V. 1991b. Subsurface temperature maximum in a stratified estuary. *Marine Chemistry*. 32: 163–170.

Legović, T.; Viličić, D.; Petricoli, D.; Žutić, V. 1991c. Subsurface *Gonyaulax polyedra* bloom in a stratified estuary. *Marine Chemistry*. 32: 361–374.

Legović, T.; Žutić, V.; Gržetić, Z.; Cauwet, G.; Precali, R.; Viličić, D. 1994. Eutrophication in the Krka estuary. *Marine Chemistry*. 46: 203–215.

Legović, T.; Žutić, V.; Viličić, D.; Gržetić, Z. 1996. Transport of silica in a stratified estuary. *Marine Chemistry*. 53: 69–80.

Liu, J.; Hrustić, E.; Du, J.; Gašparović, B.; Čanković, M.; Cukrov, N.; Zhu, Z.; Zhang, R. 2019. Net submarine groundwater-derived dissolved inorganic nutrients and carbon input to the oligotrophic stratified karstic estuary of the Krka River (Adriatic Sea, Croatia). *Journal of Geophysical Research: Oceans*. 124: 4334–4349.

Louis, Y.; Garnier, C.; Lenoble, V.; Mounier, S.; Cukrov, N.; Omanović, D.; Pižeta, I. 2009. Kinetic and equilibrium studies of copper-dissolved organic matter

complexation in water column of the stratified Krka River estuary (Croatia). *Marine Chemistry*. 114: 110–119.

Malnar, L.; Coz-Rakovac, R.; Hacmanjek, M.; Teskeredžić, Z.; Teskeredžić, E.; Tomec, M.; Strunjak-Perović, I.; McLean, E.; Naglić, T. 1996. Vibriosis in rainbow trout cultured in the Krka estuary, Croatia: occurrence and comments. *Veterinarni medicina*. 41: 77–81.

Mantoura, R. F. 1987. Organic films at the halocline. *Nature*. 328: 597.

Marasović, I.; Pucher-Petković, T.; Petrova-Karadjova, V. 1990. *Prorocentrum minimum* in the Adriatic and Black Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. 70: 473–476.

Marcinek, S.; Santinelli, C.; Cindrić, A. M.; Evangelista, V.; Gonnelli, M.; Layglon, N.; Mounier, S.; Lenoble, V.; Omanović, D. 2020. Dissolved organic matter dynamics in the pristine Krka River estuary (Croatia). *Marine Chemistry*. 225: 103848.

Marguš, D.; Teskeredžić, E.; Teskeredžić, Z.; Tomec, M. 2005. Prihvat ličinki, preživljavanje i rast malih kapica (*Chlamys varia* L.) u kontroliranom uzgoju u uvali Šarina draga-ušće rijeke Krke. *Ribarstvo*. 63: 91–103.

Metaxas, A.; Young, C. M. 1998. Behaviour of echinoid larvae around sharp haloclines: effects of the salinity gradient and dietary conditioning. *Marine Biology*. 131: 443–459.

Mikac, N.; Kwokal, Ž.; May, K.; Branica, M. 1989. Mercury distribution in the Krka River estuary (east Adriatic coast). *Marine Chemistry*. 28: 109–126.

Moreira-Turcq, P.; Martin, J. M.; Fleury, A. 1993. Chemical and biological characterization of particles by flow cytometry in the Krka estuary, Croatia. *Marine Chemistry*. 43: 115–126.

Morris, A. W.; Mantoura, R. F. C.; Bale, A. J.; Howland, R. J. M. 1978. Very low salinity regions of estuaries: important sites for chemical and biological reactions. *Nature*. 274: 678–680.

Orlić, M.; Ferenčak, M.; Gržetić, Z.; Limić, N.; Pasarić, Z.; Smirčić, A. 1991. High – frequency oscillations observed in the Krka Estuary. *Marine Chemistry*. 32: 137–151.

Parać, M.; Cuculić, V.; Cukrov, N.; Geček, S.; Lovrić, M.; Cukrov, N. 2022. Microplastic distribution through the salinity gradient in a stratified estuary. *Water*. 14: 3255.

Pavletić, Z. 1960. Sedreni slapovi rijeke Krke. *Krš Jugoslavije*. 2: 71–98.

Peltier, W. R.; Fairbanks, R. G. 2006. Global glacial ice volume and last glacial maximum duration from an extended Barbados sea level record. *Quaternary Science Reviews*. 25: 3322–3337.

Petricoli, D.; Bakran-Petricoli, T.; Viličić, D.; Požar-Domac, A. 1996. Freshwater phytoplankton bloom in Visovac Lake – a possible cause of benthic mortality in Krka Estuary (Adriatic Sea, Croatia). *Marine Ecology*. 17: 373–382.

Plavšić, M.; Krznarić, D.; Branica, M. 1982. Determination of the apparent copper complexing capacity of seawater by anodic stripping voltammetry. *Marine Chemistry*. 11: 17–31.

- Roglić, J. 1957. Zaravni na vapnencima. *Geografski glasnik*. 19: 109–140.
- Ropke, A.; Nellen, W.; Piatkowski, U. 1993. A comparative study on the influence of the pycnocline on the vertical distribution of fish larvae and cephalopod paralarvae in three ecologically different areas of the Arabian Sea. *Deep – Sea Research*. 40: 801–819.
- Sabates, A. 1990. Changes in the heterogeneity of mesoscale distribution patterns of larval fish associated with a shallow coastal haline front. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 30: 131–140.
- Salot, A.; Laureillard, J.; Peulve, S.; Fillaux, J. 1997. Fatty acid signatures from bacteria at the freshwater/seawater boundary of the Krka estuary in winter, spring and autumn. *Croatica Chemica Acta*. 70: 323–332.
- Scribe, P.; Fillaux, J.; Laureillard, J.; Denant, V.; Salot, A. 1991. Fatty acids as biomarkers of planktonic inputs in the stratified estuary of the Krka River, Adriatic Sea: relationship with pigments. *Marine Chemistry*. 32: 299–312.
- Sempéré, R.; Cauwet, G. 1995. Occurrence of organic colloids in the stratified estuary of the Krka River (Croatia). *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 40: 105–114.
- Seyler, P.; Martin, J. M. 1991. Arsenic and selenium in a pristine river-estuarine system: the Krka (Yugoslavia). *Marine Chemistry*. 34: 137–151.
- Sierra, J. P.; Sanchez-Arcilla, A.; Gonzales Del Rio, J.; Flos, J.; Movellan, E.; Mosso, C.; Martinez, R.; Rodilla, M.; Falco, S.; Romero, I. 2002. Spatial distribution of nutrients in the Ebro estuary and plume. *Continental Shelf Research*. 22: 361–378.
- Sinovičić, G.; Čikeš, V.; Zorica, B. 2008. Population structure, size at maturity and condition of sardine, *Sardina pilchardus* (Walb., 1792), in the nursery ground of the eastern Adriatic Sea (Krka River Estuary, Croatia). *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 76: 739–744.
- Smrkulj, N.; Hasan, O.; Brunović, D.; Miko, S.; Ilijanić, N. 2024. Holocene palaeoenvironmental development of Prokljan Lake (Krka River, Croatia): Evolution from a calcareous tufa barrier system to a karst estuary. *Marine Geology*. 476: 107370.
- Strmečki, S.; Despoja, I.; Penezic, A.; Milinkovic, A.; Alempijević Bakija, S.; Kiss, G.; Hoffer, A.; Mitic, B.; Hrusevar, D.; Frka, S. 2024. How do certain atmospheric aerosols affect Cu-binding organic ligands in the oligotrophic coastal sea surface microlayer? *Environmental Science-Processes and Impacts*. 26: 119–135.
- Soto, Y.; Bianchi, M.; Martinez, J.; Rego, J. V. 1993. Seasonal evolution of microplanktonic communities in the estuarine front ecosystem of the Rhone river plume (NW Mediterranean Sea). *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 37: 1–13.
- Svensen, C.; Viličić, D.; Wassmann, P.; Arashkevich, E.; Ratkova, T. 2007. Plankton distribution and vertical flux of biogenic matter during high summer stratification in the Krka estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 71: 381–390.
- Svetličić, V.; Žutić, V.; Tomaić, J. 1991. Estuarine transformation of organic matter: single coalescence events of estuarine surface active particles. *Marine Chemistry*. 32: 253–267.
- Šegota, T. 1968. Morska razina u holocenu i mlađem Würmu. *Geografski glasnik*. 30: 15–39.
- Šupraha, L.; Bosak, S.; Ljubešić, Z.; Mihanović, H.; Olujić, G.; Mikac, I.; Viličić, D. 2014. Cryptophyte bloom in a Mediterranean estuary: High abundance of *Plagioselmis* cf. *prolonga* in the Krka River estuary (eastern Adriatic Sea). *Scientia Marina*. 78: 329–338.
- Šupraha, L.; Ljubešić, Z.; Mihanović, H.; Henderiks, J. 2016. Coccolithophore life-cycle dynamics in a coastal Mediterranean ecosystem: seasonality and species-specific patterns. *Journal of Plankton Research*. 38: 1178–1193.
- Teskeredžić, E.; Teskeredžić, Z. 2015. Kako je nastala "Martinska". Sažeci Znanstveno-popularnog skupa "35 godina rada Istraživačke postaje Martinska". Institut "Ruđer Bošković". Zavod za istraživanje mora i okoliša i Istraživačka postaja Martinska, 1.
- Tiselius, P.; Nielsen, G.; Nielsen, T. G. 1994. Microscale patchiness of plankton within a sharp pycnocline. *Journal of Plankton Research*. 16: 543–554.
- Turner, A.; Millward, G. E. 2002. Suspended particles: their role in estuarine biochemical cycles. *Estuarine Coastal and Shelf Science*. 55: 857–883.
- Viličić, D. 1989. Phytoplankton population density and volume as indicators of eutrophication in the eastern part of the Adriatic Sea. *Hydrobiologia*. 174: 117–132.
- Viličić, D. 2003. *Fitoplankton u ekološkom sustavu mora*. Školska knjiga. Zagreb.
- Viličić, D. 2014. *Ecology and composition of phytoplankton in the Adriatic Sea*. Koeltz Scientific Books. Koenigstein. Germany.
- Viličić, D.; Legović, T.; Žutić, V. 1989. Vertical distribution of phytoplankton in a stratified estuary. *Aquatic Sciences*. 51: 32–46.
- Viličić, D.; Petricoli, D.; Jasprica, N. 1990. Sezonska raspodjela fitoplanktona u estuariju Krke i Visovačkom jezeru, Zbornik radova skupa *Nacionalni park Krka – stanje istraženosti i problemi zaštite ekosistema. Ekološke monografije 2*. Hrvatsko ekološko društvo, Zagreb. 317–330.
- Viličić, D.; Terzić, S.; Ahel, M.; Burić, Z.; Jasprica, N.; Carić, M.; Caput-Mihalić, K.; Olujić, G. 2008. Phytoplankton abundance and pigment biomarkers in the oligotrophic, eastern Adriatic estuary. *Environmental Monitoring and Assessment*. 142: 199–218.
- Vojvodić, V.; Čosović, B. 1992. The hydrophobic fraction of organic matter in the Krka River Estuary. *Marine Chemistry*. 39: 251–267.
- Žutić, V.; Legović, T. 1987. A film of organic matter at the freshwater/seawater interface of an estuary. *Nature*. 328: 612–614.

OVERVIEW OF RESEARCH AND SCIENTIFIC FINDINGS IN THE KRKA ESTUARY

Abstract: The Krka River estuary is a unique, internationally recognized natural phenomenon in the karst of northern Dalmatia (Croatia). Nutrient-poor water from the small Krka River enters the sea under narrow tidal range conditions and creates a highly stratified system with a sharp halocline separating brackish and marine layers. Highly stratified estuaries are rare and are found along small Mediterranean rivers. Freshwater phytoplankton entering the estuary from Lake Visovac, a widening of the river, dies in the salinity gradient of the halocline. Suspended particles accumulating in the halocline significantly heat up the halocline in summer. Microbial decomposition of organic matter releases nutrients into the marine layer of the upper estuary, causing a development of marine phytoplankton subsurface blooms. In the lower estuary, phytoplankton blooms are superficial because growth at greater depths is limited by light. The mixing of fresh water and the sea, especially in the halocline (freshwater/seawater interface), dramatically changes the balance of chemical reactions. The halocline is a microlayer in which toxic substances accumulate as well. The cycling of elements is present in the estuary.

Keywords: Krka River, estuary, halocline, research, Adriatic Sea

ÜBERBLICK ÜBER DEN FORSCHUNGSSTAND UND WISSENSCHAFTLICHE ERKENNTNISSE ÜBER DAS ÄSTUAR DES FLUSSES KRKA

Zusammenfassung: Das Ästuar des Flusses Krka ist ein einzigartiges, weltweit anerkanntes Naturphänomen im Karst Norddalmatiens. Nährstoffarmes Wasser aus dem kleinen Fluss Krka gelangt bei Ebbe ins Meer und bildet ein stark geschichtetes System mit einer scharf ausgeprägten Halokline, die die Brack- und Meeresschichten trennt. Stark geschichtete Flussästulare sind selten und kommen bei kleinen Flüssen im Mittelmeerraum vor. Süßwasser-Phytoplankton gelangt von der Flusserweiterung – dem Visovac See – ins Ästuar, wo es im Salinitätsgradienten (Halokline) stirbt. In der Halokline sammeln sich Schwebeteilchen an, wodurch sich die Halokline im Sommer deutlich erwärmt. Durch den mikrobiellen Abbau organischer Stoffe werden Nährstoffe in die Meeresschicht des oberen Teils des Ästuars freigesetzt, wo sich unter der Oberfläche Blüten des marinen Phytoplanktons entwickeln. Im unteren Teil des Ästuars des Flusses Krka ist die Blüte oberflächlich, da die Entwicklung in größerer Tiefe durch das Licht begrenzt wird. Die Vermischung von Süßwasser und Meer, insbesondere in der Grenzschicht der Halokline, verändert das Gleichgewicht chemischer Reaktionen dramatisch. Eine Halokline ist eine Mikroschicht, in der sich giftige Substanzen ansammeln. Im Ästuar herrscht ein Kreislauf der Elemente.

Schlüsselwörter: Krka, Ästuar, Halokline, Forschung, Adriatisches Meer

