

Visoka vrstna pestrost makrofitov v kraškem vodotoku Rak

High species diversity of macrophytes of karstic river Rak

ANA JAKLIČ, KATJA KONC, DAVID KNEZ, JERNEJ KLANČIČAR & MATEJA GERM¹

¹ Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Večna pot 111, 1000 Ljubljana, mateja.germ@bf.uni-lj.si

Izvleček

Kraška reka Rak je zaradi velikega gradienta v morfoloških lastnostih struge in pestre združbe makrofitov že vrsto let predmet ekoloških raziskav. Abundanco in razporeditev makrofitov že od leta 2008 ocenjujemo študenti Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani v okviru terenskih vaj. Konec junija 2022 smo izvedli popis makrofitov in ocenili njihovo abundanco po celotni dolžini vodotoka, ki smo ga razdelili na 20 odsekov. Po prirejeni RCE (angl. Riparian, Channel and Environmental Inventory) metodi smo večji del vodotoka uvrstili v prvi ali drugi RCE kakovostni razred. V celotnem vodotoku smo zabeležili 36 taksonov makrofitov, od tega je 10 taksonov na Rdečem seznamu praprotnic in semenk Slovenije. Zabeležili smo povečevanje vrstne pestrosti dolvodno, pri izviru prevladujejo mahovi, dolvodno pa se jim pridružijo ukoreninjene semenke. Ugotovili smo, da so nekatere vrste makrofitov specializirane in da njihovo rast omejujejo specifični okoljski dejavniki. Kjer so lokalne razmere za njihovo rast ugodne, prevladajo in imajo na določenem odseku visoko abundanco. Bolj generalistične vrste pa se pojavljajo po celotni dolžini vodotoka, a v manjših abundancah. Glede na širšo okoljsko oceno smo ocenili, da je stanje vodotoka Rak ugodno in pestrost makrofitov velika, stanje, ki bi ga bilo potrebno ohranjati tudi v prihodnje.

Ključne besede

vodne rastline, makrofiti, metoda RCE, reka Rak

Abstract

The karstic River Rak has been the subject of various ecological studies over several years due to the large gradient of morphological characteristics and diverse macrophyte communities in its riverbed. The abundance and presence of macrophytes has been monitored annually by students of Biotechnical faculty, University of Ljubljana during field work. In the end of June 2022, we surveyed the macrophytes of River Rak, dividing its channel into 20 sections. Performing a modified RCE method (Riparian, Channel and Environmental Inventory), we estimated most of the river to be in the first or second RCE quality class. We found 36 different macrophyte taxa, 10 belonging to the Slovenian Red List of endangered species. We found out that the biodiversity of macrophytes increased downstream. While species of moss were prevalent at the spring, rooted vascular plants predominated in the lower part of the watercourse. We established that some macrophytes species are specialised and that specific environmental conditions determine their growth. They had high abundances where the conditions are favourable, whereas the generalist taxa were present all throughout the

river channel, but in lower abundances. Based on the RCE method, we estimated the state of River Rak to be in good condition, the diversity of macrophytes was high, which we must preserve in the future.

Key words

aquatic plants, macrophytes, Riparian, Channel and Environmental Inventory, river Rak

1 UVOD

Podolgovata kraška kotlina Rakov Škocjan leži v Notranjskem podolju, med Cerkniškim in Planinskim kraškim poljem (FERK & STEPIŠNIK 2011, STEPIŠNIK & REPE 2015). Rakov Škocjan je kot del Notranjskega regijskega parka razglašen za krajinski park oz. naravni spomenik (Ur. l. RS 2002a), območje pa je bilo kot priročni spomenik zavarovano že leta 1949 (Ur. l. LRS 1949). V jugovzhodnem delu kotline teče reka Rak, ki je del sistema ponikalnic kraške Ljubljane. Obsega predvsem vode, ponikle v sistemu Velike Karlovice ob Cerkniškem jezeru. Rak izvira v Zelških jamah v Rakovem Škocjanu, iz udorine pod Malim mostom, nato pa nadaljuje pot 2 kilometra po Rakovi dolini vse do Velikega naravnega mostu, kjer ponikne v jamo Tkalca. Pod površjem teče še okrog 3 kilometre, nato pa se v Planinski jami združi z reko Pivko ter nadaljuje svojo pot kot Unica (JENKO 2004, FERK & STEPIŠNIK 2011, STEPIŠNIK & REPE 2015).

Makrofiti so polifiletska skupina vodnih fotosinteznih organizmov. Mednje uvrščamo s prostim očesom vidne alge, mahove, praprotnice in semenke. Glede na način pritrjanja na podlago in položaj v vodnem stolpcu lahko definiramo naslednje rastne oblike makrofitov: potopljene (submerzne) ukoreninjene, potopljene (submerzne) neukoreninjene, plavajoče (natantne) ukoreninjene, plavajoče (natantne) neukoreninjene in emerzne (helofite ali močvirske rastline) (CHAMBERS & al. 2008, HUTCHINSON 1975). Vrste, ki rastejo tako v vodi kot na kopnem, so amfibijske rastline. Običajno rastejo v okoljih, kjer so nihanja gladine pogosta (rastišča na prehodu med kopnim in vodo) (BRAENDLE & CRAWFORD 1999, HUTCHINSON 1975).

Na prisotnost in rast makrofitov vplivajo številni biotski in abiotski dejavniki. Najpomembnejši abiotski dejavniki so: svetloba (v lotičnih ekosistemih igra pomembno vlogo zasenčenost z obrežno vegetacijo), hitrost vodnega toka in pretok, globina vode, značilnosti substrata, razpoložljivost plinov (kisika in ogljikovega dioksida), kemizem vode, izpostavljenost vetru in valovanju ter temperatura. Med pomembne biotske dejavnike uvrščamo lastnosti vrst makrofitov, medvrstno kompeticijo (predvsem za svetlobo, hranila in prostor), herbivorijo (ang. grazing) in alelopatijo (FRANKLIN & al. 2008, GERM & al. 2021, ŠRAJ-KRŽIČ & al. 2007, ZELNIK & al. 2021). Omejujoča dejavnika za uspevanje makrofitov v vodi sta predvsem nizka intenziteta svetlobe in otežena difuzija plinov (JANKOVIČ 1979).

Makrofiti predstavljajo pomemben del vodnih ekosistemov (EBKE & al. 2013), saj vplivajo na morfološke, fizikalne in kemijske značilnosti jezer in vodotokov. Močno vplivajo na hitrost vodnega toka, blažijo vplive valovanja, utrjujejo bregove in sediment ter povečujejo heterogenost habitatov v vodnih ekosistemih (GERM 2013). Pomembno vlogo igrajo pri kroženju snovi in pretoku energije. V svojo biomaso vežejo hranilne snovi (predvsem nitrati in fosfati) iz vode in sedimenta, kot stranski produkt fotosinteze pa v vodno okolje vnašajo kisik, ki omogoča hitrejšo razgradnjo organskih snovi (CARBIENER & al. 1990, HASLAM 1987).

Namen raziskave je bil ugotoviti prisotnost, abundanco in razporeditev makrofytov v reki Rak, ter oceniti stanje vodotoka s pomočjo prirejene RCE metode (PETERSEN 1992). RCE metoda je bila razvita za oceno fizičnega in biološkega stanja majhnih potokov v nižinski kmetijski krajini. Zajema točkovanje šestnajstih značilnosti (po prirejeni RCE metodi smo ocenjevali dvanajst značilnosti), ki opredeljujejo zgradbo obrežnega pasu, morfologijo struge in biološko stanje v obeh habitatih. Na podlagi seštevka točk lahko vodotok ali odsek vodotoka uvrstimo v enega izmed petih RCE kakovostnih razredov (PETERSEN 1992).

Pričakovali smo, da se bo specifična električna prevodnost dolvodno povečevala zaradi alohtonega vnosa raztopljenih snovi. Hkrati smo pričakovali, da se bo dolvodno povečevala vrstna pestrost in abundanca makrofytov na račun večje pestrosti ekoloških niš, ter da bomo dele vodotoka bližje izviru uvrstili v višji RCE kakovostni razred kot na odsekih dolvodno.

2 MATERIALI IN METODE

V okviru terenskih vaj pri predmetu Ekosistemi smo študenti 1. letnika Ekologije in biodiverzitete (magistrski študij Oddelka za biologijo Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani) izvedli dvodnevni popis makrofytov (28. in 29. 6. 2022), oceno njihove abundance in oceno stanja kraškega vodotoka Rak v Rakovem Škocjanu.

Vzorčenje je potekalo po celotni dolžini vodotoka (Slika 1, 2), in sicer gorvodno od Velikega naravnega mostu do izvira. Vodotok Rak smo razdelili na 20 odsekov (Slika 1). Odsek 1 predstavlja izvorni del, 20 pa izlivni. Odseke od 1 do vključno 11 smo popisali 29. 6. 2022 peš, odseke 12 do 20 pa 28. 6. 2022 s čolnom. Meje posameznih odsekov ($n = 20$) smo določali na mestih, kjer smo opazili očitno spremembo v združbi makrofytov v vodotoku bodisi v vrstni sestavi bodisi v abundanci ali pa ob očitni spremembi obrežnega pasu ali značilnosti vodotoka (globini vode, hitrosti toka, tipu sedimenta, strukturi brega, tipu zaledja). Koordinate začetkov in koncev odsekov smo beležili s pomočjo GPS na telefonu. Kjer je bil vodostaj dovolj visok, smo popis opravljali iz čolna, to velja predvsem za spodnji del vodotoka od Velikega naravnega mostu do vstopne točke, ki je bila približno na polovici vodotoka. Od vstopne točke do izvira pa smo popis opravili peš zaradi izjemno nizkega vodostaja. Makrofite smo iz kanuja vzorčili s pomočjo grabilca makrofytov, drugod pa smo makrofite vzorčili tako, da smo jih potegnili iz vode.

Na sredini vsakega od pregledanih odsekov smo z multimetrom izmerili izbrane fizikalne in kemijske parametre: temperaturo vode ($^{\circ}\text{C}$), specifično električno prevodnost ($\mu\text{S}/\text{cm}$), nasičenost s kisikom (%), koncentracijo kisika (mg/L) in pH ter z metrom izmerili globino vode v sredini struge. Podatke smo beležili na popisni list. Med pregledom odseka smo beležili prisotne taksonse makrofytov in njihove rastne oblike (am = rastline s amfibijskim značajem, fl = plavajoče ukoreninjene rastline, he = močvirske rastline oz. helofiti, mo = mahovi, sr = potopljene ukoreninjene rastline). Na koncu vsakega odseka smo po petstopenski lestvici ocenili abundanco makrofytov (Graf 1). Na osnovi protokola po prirejeni metodi RCE (angl. The Riparian, Channel and Environmental Inventory) (PETERSEN 1992), kjer je opisanih dvanajst kategorij za ocenjevanje ekomorfoloških značilnosti vodotoka, smo ocenili RCE kakovostni razred na posameznem odseku (Preglednica 1). Z namenom ugotavljanja, ali je nedavno prišlo do znižanja vodostaja, smo v vsakem odseku izbirali še tri najpogostejše vrste submerznih ukoreninjenih makrofytov in izmerili njihovo višino (cm). Rastline smo s koreninami vred izpulili iz podlage ter z lesenim metrom izmerili višino nadzemnega dela rastline. Izmerili smo višino treh primerkov vsake vrste in za rezultat vzeli povprečje vrednosti.

Rezultate smo obdelali v programu Microsoft Office Excel (Pall in Janauer 1995) (Graf 5–8), in qGIS, ostali grafi so bili izrisani v programu R Studio.

MI (masni indeks) je z dejansko biomaso povezan s funkcijo $f(x) = x^3$. MMI_{tot} predstavlja povprečni masni indeks vrste na vseh odsekih reke (Graf 5, črni stolpci) (PALL & JANAUER 1995):

$$MMI_{tot} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^n MI_i^3 * AL_i}{GL}}$$

MI_i = masni indeks vrste na odseku i

AL_i = dolžina odseka i, v katerem je vrsta prisotna

GL = celotna dolžina pregledanega vodotoka

MMI_{occ} predstavlja povprečni masni indeks vrste na odsekih, kjer vrsta uspeva (Graf 5, beli stolpci) (PALL & JANAUER 1995):

$$MMI_{occ} = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=x}^n MI_i^3 * AL_i}{\sum_{i=x}^n AL_i}}$$

MI_i = masni indeks vrste na odseku i

AL_i = dolžina odseka i, v katerem je vrsta prisotna

Razmerje masnih indeksov podaja vrednost d (Glika 6), ki nam pove, kolikšen je delež odsekov, v katerih je bila vrsta prisotna (PALL & JANAUER 1995):

$$d = \frac{MMI_{tot}^3}{MMI_{occ}^3}$$

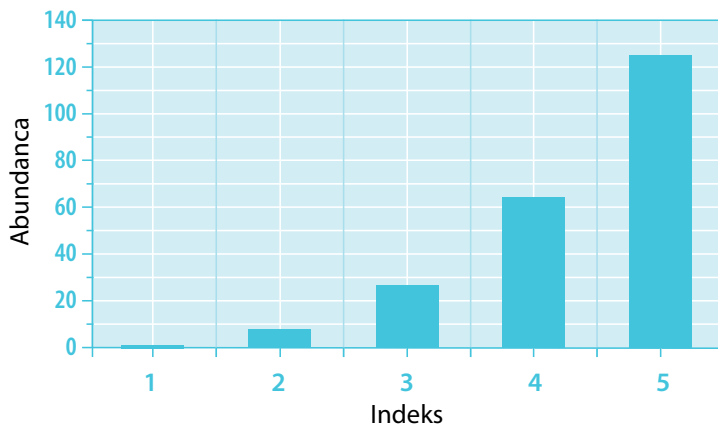
Za računanje kvantitativne pomembnosti vrste na določenem odseku smo uporabili relativno rastlinsko abundanco (RPA) (Graf 8) (PALL & JANAUER 1995):

$$RPA_x[\%] = \frac{\sum_{i=1}^n (PA_{xi} * L_i) * 100}{\sum_{j=1}^k (\sum_{i=1}^n (PA_{ji} * L_i))}$$

RPA_x = relativna rastlinska abundanca vrste x

PA_{xi} = abundanca vrste x na rečnem odseku i

L_i = dolžina rečnega odseka i



Graf 1: Petstopenjska lestvica, uporabljena pri ocenjevanju abundance taksonov makrofitov, prirejeno po PALL & JANAUER (1995).

Graph 1: Five level scale used for determining the abundance of macrophytes, adapted from PALL & JANAUER (1995).

Preglednica 1: Razredi kakovosti, uporabljeni za interpretacijo stanja vodotoka po prirejeni RCE metodi.

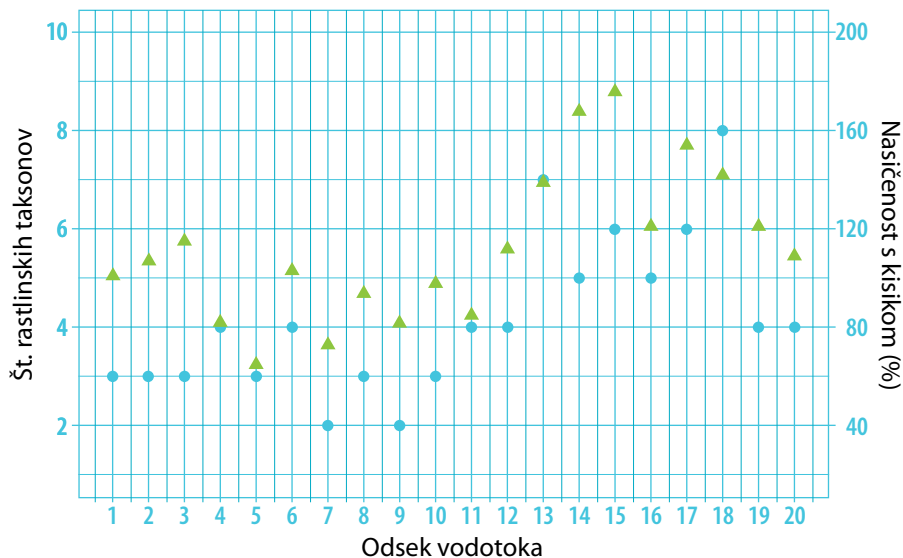
Table 1: Categories used for determining the ecological state of an ecosystem with the RCE method.

Razred	Št. točk	Ocena	Barva	Priporočena dejavnost
I	227–280	odlično	modra	Biomonitoring in zaščita obstoječega stanja – referenčna lokacija
II	173–226	zelo dobro	zelena	Potrebne so spremembe struge na posameznih odsekih
III	119–172	dobro	rumena	Potrebne so manjše spremembe struge vzdolž večjega dela struge
IV	65–118	slabo	rjava	Potrebne so večje spremembe struge in blaženje učinkov iz zaledja
V	12–64	zelo slabo	rdeča	Potrebna je reorganizacija struge in blaženje učinkov iz zaledja

3 REZULTATI

3.1 Fizikalni in kemijski parametri

Graf 2 prikazuje nasičenost vode s kisikom in število submerznih vrst na posameznem odseku. Dolvodno sta oba parametra skladno naraščala.



Legenda: ▲ Št. rastlinskih taksonov ● Nasičenost s kisikom

Graf 2: Nasičenost vode s kisikom in število submerznih rastlinskih taksonov v vodotoku Rak, dne 28. in 29. 6. 2022.

Graph 2: Saturation of water with oxygen (blue dots) and the number of submerged plant taxa (green triangle) in the River Rak, on 28th and 29th June 2022.

Preglednica 2 prikazuje podatke o temperaturi vode, koncentraciji kisika, pH in specifični električni prevodnosti v posameznem odseku vodotoka Rak. Temperatura in koncentracija kisika sta dolvodno naraščala (razen v zadnjih odsekih); temperatura se je dvigovala bolj strmo. pH je bil vzdolž vodotoka rahlo bazičen in se ni bistveno spreminjal. Specifična električna prevodnost je longitudinalno po vodotoku Rak padala.

Preglednica 2: Fizikalni in kemijski parametri, izmerjeni v kraškem vodotoku Rak, 28. in 29. 6. 2022.

Table 2: Physical and chemical parameters measured in the River Rak, on 28th and 29th June 2022.

Št. odseka	Temperatura [°C]	Koncentracija kisika [mg/L]	pH	Specifična električna prevodnost [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
1	14,4	10,3	8,7	448
2	15,7	9,9	8,6	442
3	18,3	10,6	8,4	436
4	16,3	7,7	8,2	442
5	17,5	5,9	7,8	434
6	18,5	9,3	8,2	425
7	18,4	6,5	8	433
8	19,1	8,6	8,1	427
9	20,3	7,3	8	432
10	19,2	8,7	8,1	430
11	18,8	7,5	7,4	375
12	22,7	9,4	8,3	384
13	22,5	12,8	8,7	370
14	25,1	13,9	8,6	371
15	24,2	14,7	8,6	365
16	25,2	10,1	8,5	382
17	25,9	12,2	8,5	366
18	23,9	11,7	8,4	376
19	23,7	10,1	8,3	380
20	23,1	9,8	8,2	385

3.2 Značilnosti struge

Preglednica 3 prikazuje ocenjeno hitrost toka, tip sedimenta v vodotoku, strukturo brega in zaledje po posameznih odsekih.

Preglednica 3: Ocenjene značilnosti vodotoka Rak po odsekih. Nepobarvani kvadrati predstavljajo odsotnost omenjene značilnosti.

Table 3: Estimated characteristics of the River Rak in different sections. Blank squares mean absence of the certain characteristic.

Odsek	Skupno (%)	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Vodni tok																					
počasen, komaj viden	65																				
srednji	35																				
Tip sedimenta																					
kamni, skale	90																				
prod	95																				
pesek	95																				
droben anorganski material	95																				
detrit ali drugačen organski material	95																				
umetni material	5																				
Struktura brega																					
kamni, skale	75																				
prod	45																				
pesek	80																				
droben anorganski material	95																				
Zaledje																					
gozdovi in polnaravna območja	100																				

3.3 Širša okoljska ocena

Na podlagi ocene stanja ekosistema po prirejeni metodi RCE smo izrisali karto RCE kakovostnih razredov vodotoka (Slika 1). Izvirni del vodotoka smo uvrstili v prvi RCE kakovostni razred, dolvodno pa v drugi oz. tretji razred (Slika 1).



Slika 1: Ocenjeno stanje odsekov vodotoka Rak po RCE metodi. Zemljevid je bil izrisan z orodjem qGIS, osnovni sloj pa pridobljen iz javnih geodetskih podatkov (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2022).

Figure 1: Estimated state of sections in River Rak according to the RCE method. Colour intensity represents the quality class – the more intense the colour, the lower the class. The map was drawn using qGIS, with the base layer from the public geodetic data (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2022).

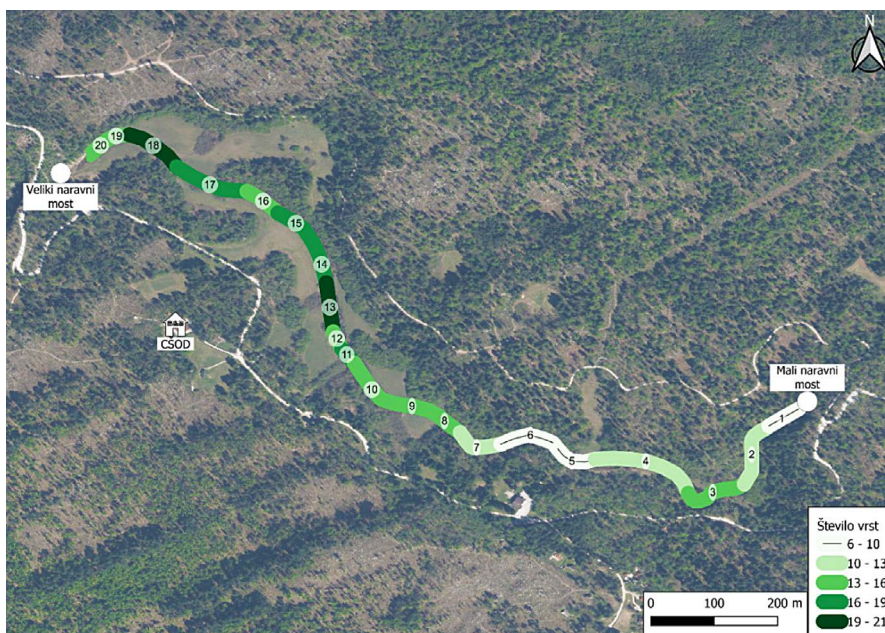
3.4 Prisotnost in pogostost (abundanca) makrofитov

V vodotoku Rak smo našli 36 različnih taksonov makrofитov, od tega tri mahove, eno praprotnico in 32 semenk. Med njimi je 10 vrst uvrščenih na slovenski Rdeči seznam z oznako ranljive vrste (ang. vulnerable) (Ur. l. RS 2002b) (Preglednica 4). Slika 2 prikazuje pestrost makrofитov na posameznih odsekih vodotoka. Na grafu 3 so prikazane rastne oblike makrofитov glede na zgornji in spodnji del vodotoka. V zgornjem delu so imeli mahovi relativno večji delež, manj pa je bilo potopljenih ukoreninjenih semenk. Plavajoč ukoreninjen makrofит je bil le plavajoči dristavec (*Potamogeton natans*). Delež močvirskih in amfibijskih rastlin je bil podoben v zgornjem in spodnjem delu vodotoka.

Preglednica 4: Seznam popisanih taksonov (MARTINČIČ & al. 2007) s krajšavami, ki smo jih uporabili v kasnejši analizi. V tretjem stolpcu je opredeljena rastna oblika rastlinskih vrst (am = rastline z amfibijskim značajem, fl = plavajoče ukoreninjene rastline, he = močvirske rastline oz. helofiti, mo = mahovi, sr = potopljene ukoreninjene rastline). Rdeče označene vrste so na Rdečem seznamu uvrščene v ranljivo skupino (ang. vulnerable) (Ur. l. RS 2002b). **Table 4:** List of macrophytes (MARTINČIČ & al. 2007) with abbreviations used in further analysis. The growth form of the plant species is defined in the third column (am = amphibious plants, fl = floating rooted plants, he = marsh plants or helophytes, mo = mosses, sr = submerged rooted plants). The marked species are classified as vulnerable on the Red List (Ur. l. RS 2002b).

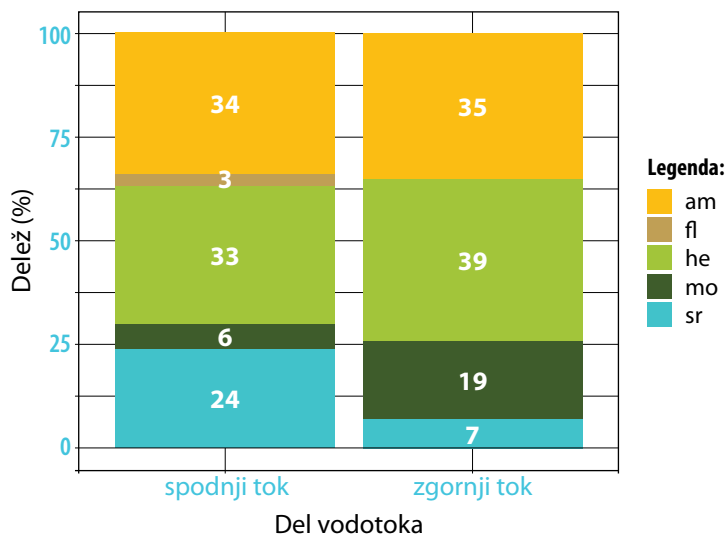
latinsko ime taksona	slovensko ime taksona	oznaka	kategorija
<i>Agrostis stolonifera</i>	plazeča šopulja	Agr sto	he
<i>Alisma lanceolatum</i>	suličastolistni porečnik	Ali lan	he
<i>Alisma plantago-aquatica</i>	trpotčasti porečnik	Ali pla	he
<i>Butomus umbellatus</i>	kobulasta vodoljuba	But umb	am
<i>Caltha palustris</i>	navadna kalužnica	Cal pal	he
<i>Carex</i> sp.	šaši	Car sp	he
<i>Cinclidotus fontinaloides</i>		Cin fon	mo
<i>Equisetum palustre</i>	močvirska preslica	Equ pal	he
<i>Fontinalis antipyretica</i>		Fon ant	mo
<i>Galium palustre</i>	močvirska lakota	Gal pal	he
<i>Iris pseudacorus</i>	vodna perunika	Iri pse	he
<i>Lycopus europeus</i>	navadni regelj	Lyc eur	he
<i>Lysimachia vulgaris</i>	navadna pijavčnica	Lys vul	he
<i>Lythrum salicaria</i>	navadna krvenka	Lyt sal	he
<i>Mentha aquatica</i>	vodna meta	Men aqu	he
<i>Myosotis scorpioides</i>	močvirska spominčica	Myo sco	am
<i>Myriophyllum spicatum</i>	klasasti rmanec	Myr spi	sr
<i>Phalaris arundinacea</i>	pisana čužka	Pha aru	he
<i>Plantago altissima</i>	visoki trpotec	Pla alt	he
<i>Polygonum amphibium</i>	vodna dresen	Pol amp	am
<i>Polygonum hydropiper</i>	poprasta dresen	Pol hyd	he
<i>Potamogeton crispus</i>	kodravi distavec	Pot cri	sr
<i>Potamogeton lucens</i>	bleščeči distavec	Pot luc	sr
<i>Potamogeton natans</i>	plavajoči distavec	Pot nat	fl
<i>Potamogeton pectinatus</i>	češljasti distavec	Pot pec	sr
<i>Potamogeton perfoliatus</i>	preraslostni distavec	Pot per	sr
<i>Potamogeton x zizii</i>		Pot ziz	sr

latinsko ime taksona	slovensko ime taksona	oznaka	kategorija
<i>Ranunculus trichophyllus</i>	lasastolistna vodna zlatica	Ran tri	am
<i>Rhynchosstegium riparioides</i>		Rhy rip	mo
<i>Rorippa amphibia</i>	prava potočarka	Ror amp	am
<i>Sagittaria sagittifolia</i>	navadna streluša	Sag sag	am
<i>Schoenoplectus lacustris</i>	jezerski biček	Sch lac	am
<i>Sium latifolium</i>	širokolistna koščica	Siu lat	am
<i>Sparganium emersum</i>	enostavni ježek	Spa eme	am
<i>Sparganium erectum</i>	pokončni ježek	Spa ere	am
<i>Veronica anagallis-aquatica</i>	vodni jetičnik	Ver ana	he



Slika 2: Zemljevid števila taksonov na posameznih odsekih na vodotoku Rak, dne 28. in 29. 6. 2022. Večja intenziteta barve pomeni večje število vrst. Zemljevid je bil izrisan z orodjem qGIS, osnovni sloj pa je pridobljen iz javnih geodetskih podatkov (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2022).

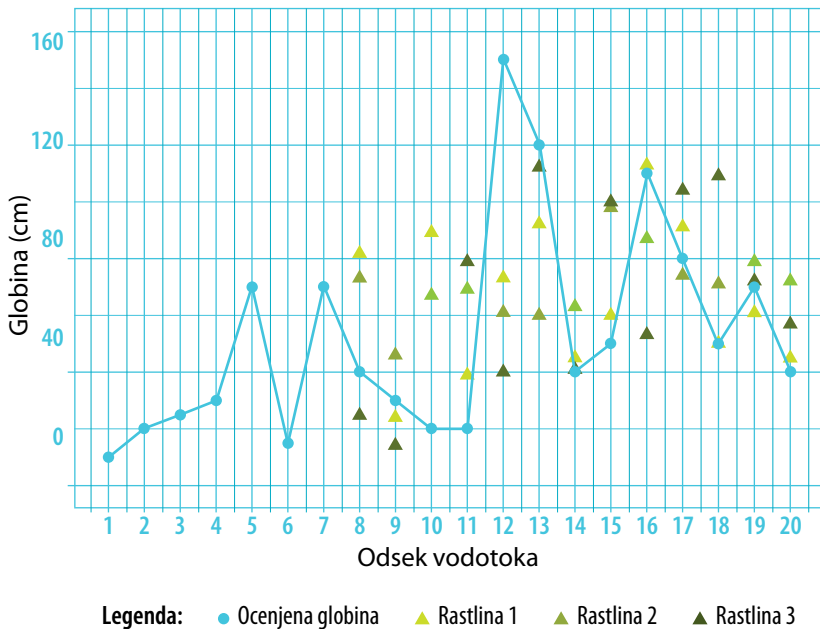
Figure 2: Map of the number of plant taxa on individual sections of the River Rak, on 28th and 29th June 2022. The colour intensity represents the interval of species number. The map was drawn using qGIS, with the base layer from the public geodetic data (Geodetska uprava Republike Slovenije, 2022).



Graf 3: Deleži rastnih oblik makrofitov v zgornjem in spodnjem toku vodotoka Rak. Legenda: am = rastline z amfibijskim značajem, fl = plavajoče ukoreninjene rastline, he = močvirske rastline oz. helofiti, mo = mahovi, sr = potopljene ukoreninjene rastline.

Graph 3: Proportions of macrophyte growth forms in the upper and lower reaches of the River Rak stream. Legend: am = amphibious plants, fl = floating rooted plants, he = marsh plants or helophytes, mo = mosses, sr = submerged rooted plants.

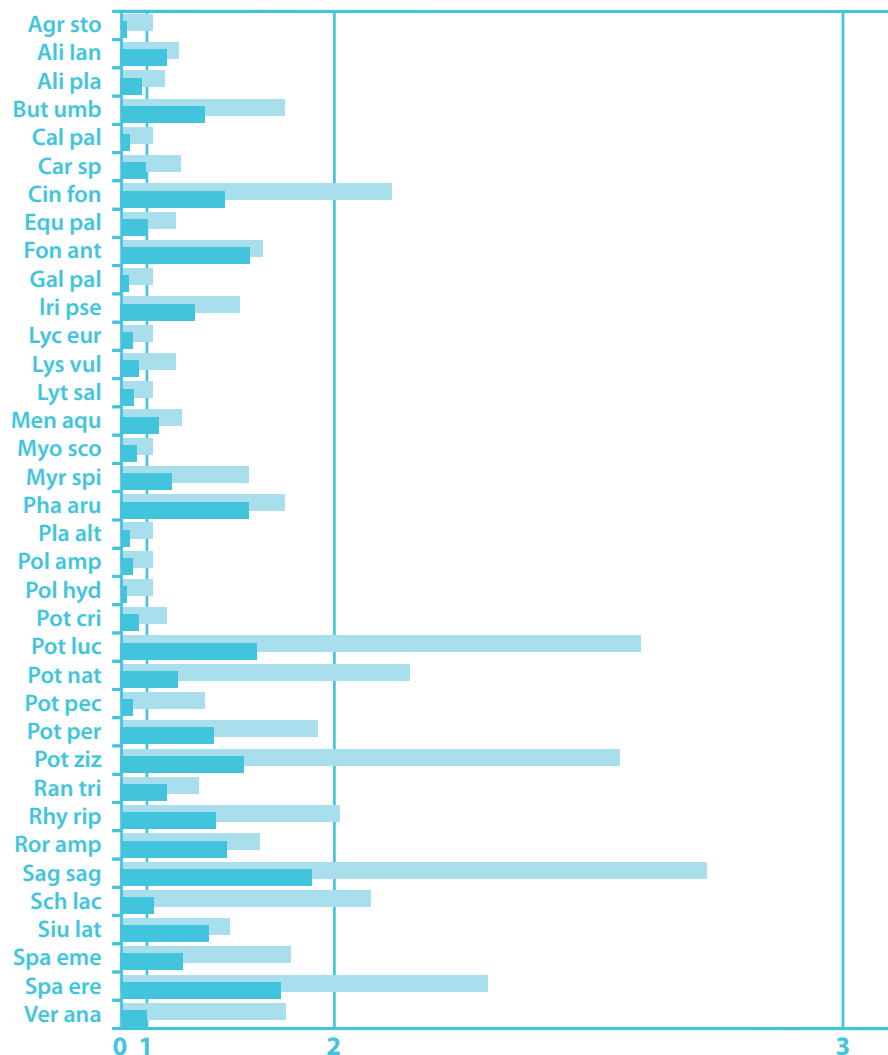
Na posameznih odsekih vodotoka Rak smo merili tudi višine treh najpogostejših submerznih vrst makrofitov. Izračunali smo povprečje in primerjali z ocenjeno trenutno globino vode, kar prikazuje Graf 4. V zgornjem toku nismo našli dovolj potopljenih makrofitov, ki bi jim lahko izmerili dolžine, zato nismo pridobili podatkov za prvih 7 odsekov.



Graf 4: Povprečne višine (v cm) treh najpogostejših vrst rastlin in ocenjena globina vodotoka Rak na posameznem odseku.

Graph 4: The average height (in cm) of the three most common species of plants (green triangles) and the estimated depth (blue dots) of the River Rak in each section.

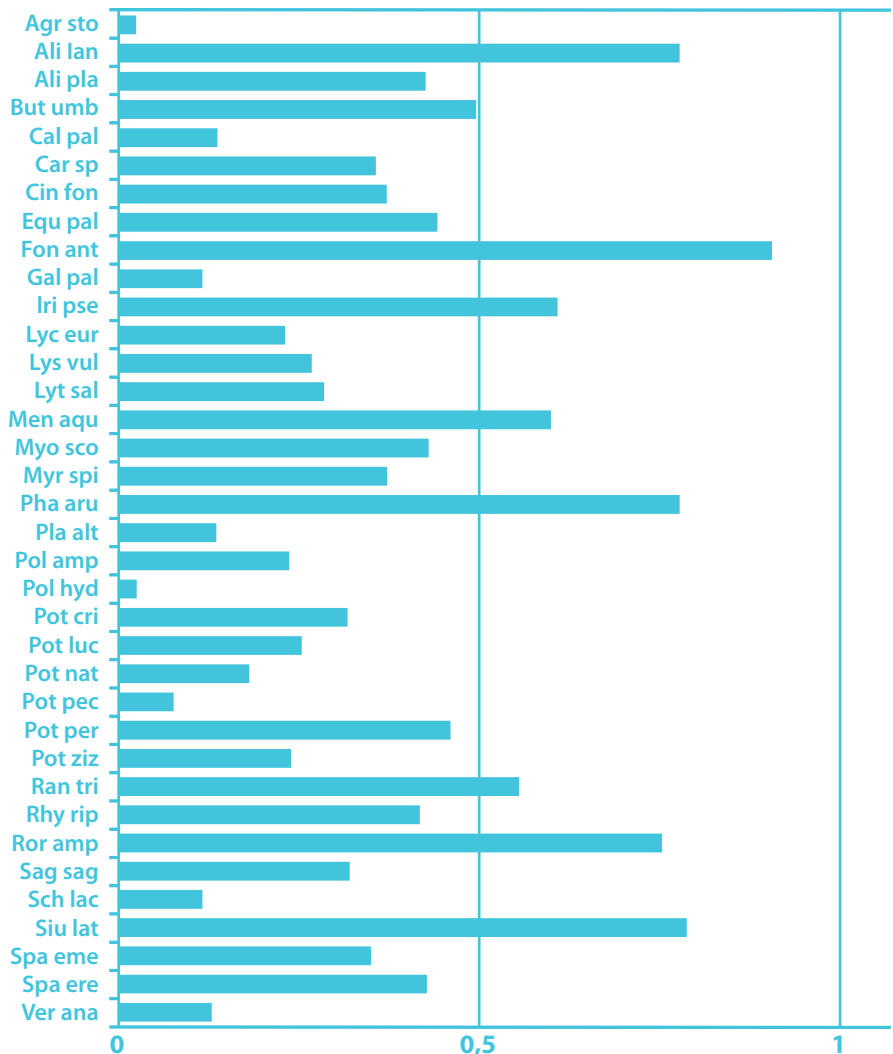
Graf 5 prikazuje povprečni masni indeks posameznega taksona. Nekateri taksoni so bili na posameznih odsekih precej bolj abundantni kot preračunano na celoten vodotok.



Graf 5: Povprečni masni indeks posameznega taksona. Črni stolpci predstavljajo povprečni masni indeks taksona v celotnem vodotoku. Beli stolpci prikazujejo povprečni masni indeks v posameznih odsekih, kjer je bil takson prisoten.

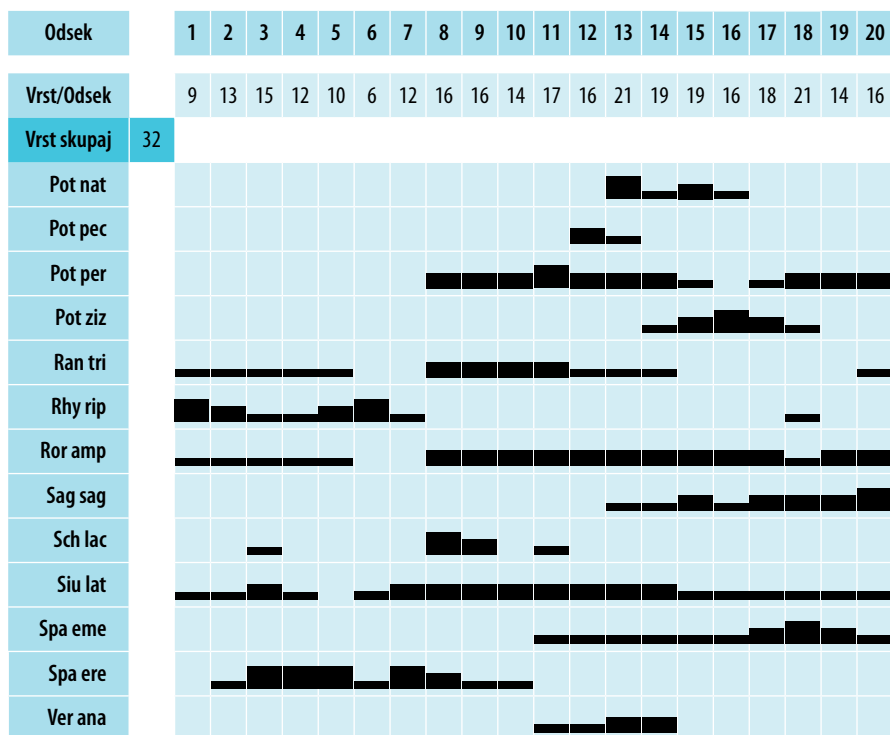
Graph 5: Average mass index of individual taxa. Black bars represent the average mass index of the taxa in the entire watercourse. White columns show the average mass index in individual sections where the taxa were present.

Graf 6 prikazuje delež vodotoka, kjer je bil prisoten posamezen takson. Vrsta *Fontinalis antipyretica* je bila prisotna v največjem številu pregledanih odsekov, vrsti *Agrostis stolonifera* in *Polygonum hydropiper* pa sta bili prisotni le na majhnem deležu pregledanega vodotoka. Nobena vrsta se ni pojavila v vseh odsekih vodotoka.



Graf 6: Delež vodotoka, kjer je bil prisoten posamezen takson.

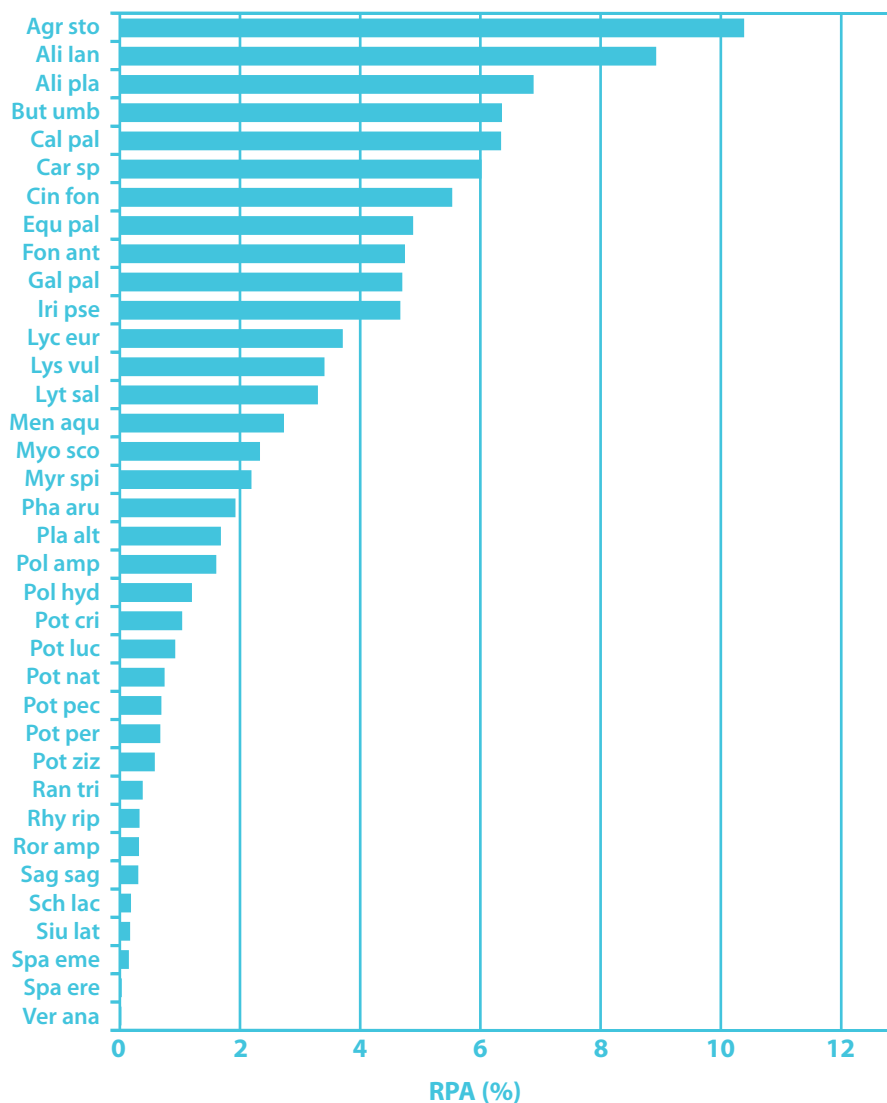
Graph 6: The proportion of a watercourse where individual taxa were present.



Graf 7: Abundanca in razporeditev taksonov makrofitov na posameznih odsekih, ocenjenih s cenilkami 1–5 (1 pomeni od 1 do 5 osebkov, 5 pa prevladujoča vrsta). Debelina črte predstavlja abundanco vrste.

Graph 7: Abundance and distribution of taxa of macrophytes in individual sections, evaluated with ratings 1–5 (1 means from 1 to 5 individuals, and 5 means a dominant species). The thickness of the line represents the abundance of the species.

Graf 8 prikazuje relativno rastlinsko abundanco opaženih rastlin. Vrsta *Sagittaria sagittifolia* je imela najvišjo relativno abundanco (>10 %), vrsti *Polygonum hydropiper* in *Agrostis stolonifera* pa najnižjo.



Graf 8: RPA ali relativna rastlinska abundanca popisanih makrofitov.

Graph 8: RPA or relative plant abundance of surveyed macrophytes.

4 RAZPRAVA

4.1 Fizikalni in kemijski parametri

Nasičenost in koncentracija kisika v vodotoku Rak sta se višala dolvodno (Graf 2, Preglednica 2). V zgornjem delu vodotoka se je z višjo temperaturo koncentracija kisika nižala, kar je bilo pričakovano, saj je topnost kisika ob visoki temperaturi nižja. Višanje temperature lahko pripišemo bolj sončnemu vremenu v času merjenja spodnjega dela vodotoka. V zgornjem delu je bil vodotok bolj preraščen z obrežno vegetacijo, v času merjenja pa je bilo tudi bolj oblačno vreme. Nasičenost vode s kisikom sovпада z večanjem zastopanosti submerznih makrofitov, kar kaže na močno biogeno prezračevanje. pH vode v vodotoku Rak je bil tekom celotne dolžine rahlo bazičen (Preglednica 2), kar je verjetno posledica karbonatne podlage in visoke fotosintezne aktivnosti, ki zaradi porabe CO_2 zviša pH vode. Specifična električna prevodnost je v vodotoku Rak padala dolvodno iz približno $450 \mu\text{S}/\text{cm}$ na približno $370\text{--}380 \mu\text{S}/\text{cm}$, kar je najverjetneje posledica obarjanja kalcijevega karbonata (CaCO_3) in prevzema hranil s strani makrofitov, katerih abundanca se je od izvira povečevala (Preglednica 2). Vodotok Rak je še vedno dokaj ohranjen, zato v prispevnem območju ni pomembnejšega antropogenega vnosa hranil (travniki niso gnojeni, obrežni pas je ohranjen). Podobne rezultate so v svoji študiji razporeditve in pogostosti makrofitov v kraškem vodotoku Rak podali tudi GOJZNIKAR & al. (2019).

4.2 Značilnosti struge

Preglednica 3 prikazuje značilnosti vodotoka Rak po odsekih. V večini vodotoka je bil tok počasen, komaj viden, le v zgornjem delu je bil rahlo hitrejši, kar je značilno za izvirne dele. Substrat v vodotoku je zelo heterogen, večji kamni so bili prisotni bolj v izvirnem delu. Substrat je bil večinoma naraven, umetni materiali so bili prisotni le v enem odseku, kjer smo našli nekaj odvrženih smeti in kosovnih odpadkov. Tudi struktura brega je bila heterogena, z več kamni in prodniki v izvirnem delu, v spodnjem toku pa se je pojavilo več drobnega anorganskega materiala. Celotno zaledje je ohranjeno z močvirnato/gozdno vegetacijo ali negnojanimi travniki, ki tudi prispevajo k ohranjenosti vodotoka.

4.3 Širša okoljska ocena

Večina odsekov spada v 1. ali 2. RCE kakovostni razred, ocenjen po RCE metodi (PETERSEN 1992) (Slika 1). Zgornji tok vodotoka je bil bolj ohranjen, večina zaledja je bila poraščenega z gozdom, obrežni (blažilni) pas je širok, obrežna vegetacija pa je bila sklenjena. Omenjene tri kategorije v RCE metodi so ocenjene z najvišjim številom točk, zato največ doprinesejo h končni oceni stanja. V spodnjem delu vodotoka Rak so travniki, obrežni pas je bil na nekaterih odsekih ožji, vegetacija pogosto ni bila sklenjena. Zgornji in spodnji del vodotoka se deloma razlikujeta tudi v drugih devetih kategorijah. V 3. RCE kakovostni razred smo uvrstili le tri odseke, vendar je bilo število točk zelo blizu meje za 2. razred, zato še vedno lahko zaključimo, da je vodotok Rak zelo ohranjen. Nekatere ocene za posamezne kategorije se verjetno razlikujejo tudi v različnih delih leta (npr. razmerje med globino in širino struge), saj je za Rak značilno veliko nihanje vodostaja. Naše meritve in ocene so bile izvedene v izredno nizkem vodostaju, če pa bi stanje ocenjevali spomladi ob

višjem vodostaju, bi bilo stanje drugačno, vendar bi vodotok Rak verjetno še vedno uvrstili v najvišje RCE razrede. V primerjavi z raziskavo GOJZNIKAR & al. (2019) smo prav tako večino vodotoka uvrstili v prvi ali drugi RCE kakovostni razred, tri odseke pa smo uvrstili v tretji kakovostni razred, medtem ko so leta 2019 v tretji kakovostni razred uvrstili le en odsek. Razlike so lahko posledica subjektivnosti ocene in nizkega vodostaja. Kljub uvrstitvi posameznih odsekov v tretji RCE kakovostni razred je stanje na teh odsekih še vedno dobro, saj so točkovno zelo blizu drugemu kakovostnemu razredu.

4.4 Prisotnost in pogostost (abundanca) makrofитov

Kljub nizkemu vodostaju smo našli veliko število makrofитov. Našli smo 36 taksonov, več so jih našli GOJZNIKAR & al. (2019), in sicer 37, prav tako LAMPRET & al. (2020) in KOPITAR & al. (2022), ki so jih našli 38. Zaradi nižjega vodostaja v letu 2022 je več vrst že cvetelo. 10 najdenih vrst (28 %) je na Rdečem seznamu ogroženih praprotnic in semenk uvrščenih v ranljivo skupino (ang. *vulnerable*) (Ur. l. RS 2002b). Vrst na Rdečem seznamu smo zabeležili enako (10) kot LAMPRET & al. (2020) in eno manj kot GOJZNIKAR & al. (2019), ki so jih zabeležili 11, dodatna vrsta pa je česnov vrednik (*Teucrium scordium*).

Vrstna pestrost makrofитov se je povečevala dolvodno (Slika 2), kar sovпада tudi z večjo heterogenostjo substrata, nižjo hitrostjo toka in spremenjeno sestavo strukture brega, kar so ugotovili tudi GOJZNIKAR & al. (2019). Spremljali smo tudi delež rastnih oblik rastlin (Graf 3). V zgornjem toku so imeli mahovi bistveno večji delež zastopanosti kot v spodnjem toku, kar je bilo v skladu z našimi pričakovanji in poznano ekologijo mahov – zaradi bolj goste obrežne vegetacije je na tem delu manj svetlobe, tok je mestoma hitrejši, velik del substrata predstavljajo večji kamni, ki so primerni za pritrdjevanje mahov, manj pa je drobnega anorganskega substrata, kar ne ustreza ukoreninjenim makrofитom (ALLAN 1995). V spodnjem toku je bilo drobnega anorganskega substrata več, posledično pa tudi ukoreninjenih makrofитov. Močvirskih in amfibijskih rastlin je bilo v obeh delih vodotoka velik delež, skupaj več kot 60 % vseh makrofитov. V spodnjem toku je bilo prisotnih več submerznih makrofитov, kar je tudi posledica večje globine struge (Graf 4). Na odseku 12 in 13 je bila globina velika, makrofiti pa so nižji, kar je verjetno posledica našega nabiranja, saj z grabilcem za makrofite nismo uspeli nabrati primerkov, ki so rastle na sredini struge, temveč smo jih nabirali bolj ob bregu, kjer je bila globina nižja. Za ostale odseke je opazno, da je v večini primerov višina makrofитov presegala izmerjeno globino, zato lahko sklepamo, da je bil vodostaj v času njihove rasti višji.

Nekatere vrste uspevajo omejeno na posamezne odseke, kjer imajo visok povprečni masni indeks, glede na celoten vodotok pa je njihov povprečni masni indeks nižji, torej imajo lokalno visoke abundance (Graf 5). Tak primer so vrste *P. lucens*, *P. natans*, *P. × zizii*, *C. fontinaloides*, *S. sagittifolia*, *S. lacustris*, *R. riparioides*, *S. erectum* agg., ki so v kompeticiji uspešnejše, saj izkoristijo za njih lokalno ugodne razmere vodotoka, kot so tip substrata, globina vode, količina hranil in svetlobne razmere. Nekatere vrste, kot sta *P. arundinacea* in *F. antipyretica*, pa so bile razmeroma dobro zastopane po celotnem vodotoku, v nobenem odseku, kjer so bile prisotne, pa niso dosegale večje abundance. Gre za bolj generalistične taksone in so ugodne razmere za njihovo rast prisotne po večini vodotoka. Na večjem delu vodotoka je bil vsaj del dna prekrit s kamnitim substratom, ki je ugoden substrat za rast mahu *F. antipyretica*. Graf 6 prikazuje deleže vodotoka, kjer je bil prisoten posamezen takson. Opazimo, da so bile nekatere vrste prisotne skoraj po celotnem vodotoku, na primer *A. lanceolatum*, *F. antipyretica*, *P. arundinacea*, *R. amphibia* in *S. latifolium*. Če to

primerjamo z Grafom 8, opazimo, da vrste, ki so bile prisotne po večjem delu vodotoka, niso nujno tudi vrste, ki so imele visok masni delež na tem vodotoku, torej so bile skoraj vedno prisotne, a z majhno abundanco. To je razvidno tudi iz Grafa 7, ki prikazuje abundance in razporeditev posameznih taksonov po odsekih vodotoka. Pri izviru je bilo opazno povečanje abundanc mahov *Rhynchostegium riparioides* in *Cinclidotus fontinaloides*, ki sta tipična primera visokega povprečnega masnega indeksa v posameznih odsekih z relativno nizkim povprečnim masnim indeksom v celotnem vodotoku, saj je njuna abundanca kmalu po izvirnem delu vodotoka upadla in se dolvodno skoraj nista več pojavljala.

Graf 8 prikazuje relativno rastlinsko abundanco glede na uspevanje vseh taksonov v vodotoku. Zanimivo je, da ima najvišjo relativno abundanco navadna strelišča (*Sagittaria sagittifolia*), ki je rastla na manj kot polovici vodotoka (Graf 6). Kot amfibijska rastlina se zelo dobro prilagaja na spremembe v vodostaju in prenaša tudi krajše presušitve (STERGARŠEK & al. 2009). GOJZNIKAR & al. (2019) so v svoji študiji zabeležili vrsto *R. amphibia* kot vrsto z najvišjo relativno abundanco v vodotoku, na drugem mestu pa je bila navadna strelišča (*Sagittaria sagittifolia*). Podobno velja za pokončni ježek (*Sparganium erectum* agg.), ki je v odsekih 3–8 dosegel zelo visoko abundanco (Graf 7), na večini preostalih odsekov pa je bil odsoten.

4.5 Sklepi

Specifična električna prevodnost je po toku navzdol upadala zaradi obarjanja kalcijevega karbonata in prevzema hranil s strani makrofytov. Antropogeni vnos hranil je vzdolž celotnega vodotoka majhen. Pestrost makrofytov v reki Rak je bila zelo visoka, saj je bilo na manj kot dva km najdenih 36 taksonov, kar se z leti tudi ohranja. Po toku navzdol se je povečevala tako vrstna pestrost kot abundanca makrofytov, kar povezujemo s povečano pestrostjo ekoloških niš in heterogenosti substrata. V vodotoku Rak smo zabeležili velik delež vrst, ki so na Rdečem seznamu praprotnic in semenk, zato je še toliko bolj pomembno, da se ohranja dobro stanje vodotoka. Vodotok Rak je ohranjen, saj smo večino odsekov uvrstili v prvi ali drugi RCE kakovostni razred. Odseki v zgornjem delu vodotoka so bili pogostejše uvrščeni v višji kakovostni razred, kar gre verjetno pripisati večinoma sklenjeni obrežni vegetaciji, zaledje pa je bilo bolj ohranjeno, saj se je gozd dolvodno zamenjal s košenimi travniki, vegetacija pa je bila mestoma prekinjena.

5 SUMMARY

In the summer of 2022, we surveyed the presence and abundance of macrophytes as well as the ecomorphological conditions of the River Rak. We divided the watercourse into 20 sections, based on the characteristics of the stream and the macrophyte growth. In each of the sections we measured physical and chemical parameters of the water. Oxygen saturation and concentration increased downstream, which corresponds with the number of submerged macrophytes, which enables a high level of biogenic aeration in the watercourse. The pH levels did not change much throughout the watercourse and remained at around 8.5, which is probably a consequence of the carbonate bedrock in this karstic region. The electrical conductivity decreased downstream due to macrophytes, which take up nutrients from the sediment and water. The substrate of riverbed was heterogeneous and

mostly natural, the same applies to the riverbank and drainage basin which we find to be in a good ecological state. We performed a modified RCE method (Riparian, Channel and Environmental Inventory) and classified most of the river to the first or second RCE quality class. We found 36 different macrophyte taxa, 10 (28 %) belonging to Slovenian Red List of vulnerable species. Biodiversity of macrophytes was increasing downstream. While mosses were prevalent at the spring region, vascular macrophytes predominated in lower part of the watercourse. Some macrophytes species are specialised (e.g., *Potamogeton lucens*, *Potamogeton natans*, *Potamogeton × zizii*, *Cinclidotus fontinaloides*, *Sagittaria sagittifolia*, *Schoenoplectus lacustris*, *Rhynchostegium riparioides*, *Sparanium erectum*). They had high abundances where the conditions are favourable, whereas the generalist taxa were present all throughout the river channel but in lower abundances (e.g., *Alisma lanceolatum*, *Fontinalis antipyretica*, *Phalaris arundinacea*, *Rorippa amphibia*, *Sium latifolium*). In general, based on RCE method and the number of macrophyte taxa present, we estimate that the River Rak is in good condition, which we must preserve in the future.

6 ZAHVALA

Raziskavo je financirala Agencija za raziskovalno dejavnost Slovenije, Raziskovalni program Biologija rastlin (P1-0212) in *Commission of the European Communities through project Life Watch and infrastructure project eLTER*.

7 LITERATURA

- ALLAN, J. D., 1995: Stream Ecology. Structure and function of running waters. Chapman & Hall: 388 pp.
- BRAENDLE, R. & R. M. M. CRAWFORD, 1999: Plants as amphibians. *Perspect. Plant Ecol.* 2/1: 56–78.
- CARBIENER, R., M. TRÉMOLIÈRES, J. L. MERCIER & A. ORTSCHKEIT, 1990: Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters (Upper Rhine plain, Alsace). *Vegetatio* 86: 71–88.
- CHAMBERS, P. A., P. LACOU, K. J. MURPHY & S. M. THOMAZ, 2008: Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. *Hydrobiologia* 595: 9–26.
- EBKE, K. P., C. FELTEN & L. DÖREN, 2013: *Myriophyllum aquaticum* biotests. *Sciences Europe* 25: 6.
- FERK, M. & U. STEPIŠNIK, 2011: Geomorfološke značilnosti Rakovega Škocjana/ Geomorphological Characteristics of Rakov Škocjan. Ur. Kladnik D., Perko D.. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 70 pp.
- FRANKLIN, P., M. DUNBAR & P. WHITEHEAD, 2008: Flow controls on lowland river macrophytes: A review. *Sci. Total Environ.* 400: 369–378.
- Geodetska uprava Republike Slovenije: Javni geodetski podatki. <https://egp.gu.gov.si/egp/?lang=sl/>, dostop 1. 7. 2022.
- GERM, M., 2013: Biologija vodnih rastlin, Učbenik. Ljubljana. 72 pp.
- GERM, M., V. JANEŽ, A. GABERŠČIK & I. ZELNIK, 2021: Diversity of Macrophytes and Environmental Assessment of the Ljubljana River (Slovenia). *Diversity* 13(6): 278.

- GOJZNIKAR, J., L. FON MERVIČ, M. KEPEC, R. KRAŠEVEC, D. PLAZNIK & M. GERM, 2019: Razporeditev in Pogostost Makrofitov v Kraški Reki Rak. *Hladnikia* 44: 53–65.
- HASLAM, S. M., 1987: River Plants of Western Europe. The macrophytic vegetation of watercourses of the European Economic Community. Cambridge, CUP Archive: 512 pp.
- HUTCHINSON, G. E., 1975: A Treatise on Limnology. Volume III: Limnological Botany. New York, John Wiley & Sons: 660 pp.
- JANKOVIĆ, M. M., 1979: Fitoekologija sa osnovama fitocenologije i pregledom tipova vegetacije na Zemlji. 4. izdaja, Beograd, Naučna knjiga Beograd: 155–167.
- JENKO, B., 2004: Obrambnogeografsko vrednotenje notranjskega podolja. Diplomsko delo. Univerza v Ljubljani, Fakulteta za družbene vede: 127 pp.
- KOPITAR, D., M. KRAVANJA, A. TRAJBARIČ & M. GERM, 2022: Razporeditev makrofitov v kraški reki Rak in ocena stanja vodnega ekosistema. *Folia biologica et geologica* 63/1: 123–142.
- LAMPRET, Ž., Ž. TERTINEK, L. VODOPIVEC, M. GABOR, G. ALJANČIČ & M. GERM, 2020: Kaj pravijo makrofiti na reki Rak? *Proteus* 83(1): 6–14.
- MARTINČIČ, A., T. WRABER, N. JOGAN, A. PODOBNIK, B. TURK, B. VREŠ, V. RAVNIK, B. FRAJMAN, S. STRGULC KRAJSEK, B. TRČAK, T. BAČIČ, M. A. FISCHER, K. ELER & B. SURINA, 2007: Mala flora Slovenije – ključ za določanje praprotnic in semenk. 4. izdaja. Ljubljana, Tehniška založba Slovenije: 967 pp.
- PALL, K. & G. A. JANAUER, 1995: Die Makrophytenvegetation von Flußstauen am Beispiel der Donau zwischen Fluß-km 2552,0 und 2511,8 in der Bundesrepublik Deutschland. *Large Rivers* 9(2): 91–109.
- PETERSEN, R. C., 1992: The RCE: a Riparian, Channel, and Environmental Inventory for small streams in the agricultural landscape. *Freshwater Biology* 27: 295–306.
- STEPIŠNIK, U. & B. REPE, 2015: Identifikacija vročih točk geodiverzitete na primeru krajinskega parka Rakov Škocjan. *Dela* 44: 45–62.
- STERGARŠEK, J., T. VASILEVSKA, S. DROBNIČ, M. VONČNINA GNEZDA, V. SCHEIN & I. LIKAR, 2009: Cvet skrivnosti, vodnik po rastlinskem svetu Cerkniškega jezera in okolice. Cerknica, Notranjski regijski park: 204 pp.
- ŠRAJ–KRŽIČ, N., M. GERM, O. URBANČ–BERČIČ, U. KUJAR, G. A. JANAUER & A. GABERŠČIK, 2007: The quality of the aquatic environment and macrophytes of karstic watercourses. *Plant Ecol.* 192: 107–118.
- Ur. l. LRS, 1949: Odločba o zavarovanju okolice Rakove kotline pri Rakeku na Notranjskem. Uradni list Ljudske republike Slovenije. 27/49.
- Ur. l. RS, 2002a: Odlok o Notranjskem regijskem parku. Uradni list Republike Slovenije. 75/02: 8330.
- Ur. l. RS, 2002b: Pravilnik o uvrstitvi ogroženih rastlinskih in živalskih vrst v rdeči seznam. Uradni list Republike Slovenije. 82/02 in 42/10.
- ZELNIK, I., U. KUJAR, M. HOLCAR, M. GERM & A. GABERŠČIK, 2021: Distribution of Vascular Plant Communities in Slovenian Watercourses. *Water* 13(08): 1071.