RAZPOREDITEV MAKROFITOV V KRAŠKI REKI RAK IN OCENA STANJA VODNEGA EKOSISTEMA

MACROPHYTES DISTRIBUTION IN THE KARSTIC RIVER RAK AND AN ASSESSMENT OF THE STATE OF THE AQUATIC ECOSYSTEM

Darja KOPITAR[1], Marija KRAVANJA[2], Aleksander TRAJBARIČ[3], Mateja GERM[4]

http://dx.doi.org/10.3986/fbg0095

IZVLEČEK

Razporeditev makrofitov v kraški reki Rak in ocena stanja vodnega ekosistema

Kraški svet predstavljajo geografsko in geološko izjemno dinamična območja, ki so močno povezana z delovanjem vode. Presihajoča vodna telesa v kraškem svetu s svojim delovanjem močno vplivajo na okolje. V največji meri se morajo na velike spremembe dostopnosti vode prilagajati sesilni organizmi, kakršni so rastline. Njihova prisotnost, abundanca in razporeditev lahko služijo kot indikatorji stanja vodnih ekosistemov. S pomočjo prirejene metode RCE (ang. *A Riparian, Channel, and Environmental Inventory*) smo reko Rak uvrstili v najvišje RCE kakovostne razrede. Na osnovi indeksa RMI (ang. *River Macrophyte Index*) smo reko Rak uvrstili v dobro oz. zelo dobro ekološko stanje. Dobra ekomorfološka ohranjenost reke Rak verjetno botruje tudi pojavljanju ogroženih rastlinskih vrst; med 38 popisanimi taksoni smo zaznali prisotnost enajstih vrst, ki so uvrščene na Rdeči seznam ogroženih praprotnic in semenk. V času našega vzorčenja je bila v tej reki prvič zaznana vrsta *Zannichellia palustris*. Visoka ocena ohranjenosti presihajoče kraške reke Rak potrjuje dosedanje dobro upravljanje in je pomembna pri udejanjanju naravovarstvenih smernic za prihodnost.

Ključne besede: kras, vodni makrofiti, RCE metoda, RMI, reka Rak

ABSTRACT

Macrophytes distribution in the karstic river Rak and an assessment of the state of the aquatic system

The karst is a geographically and geologically highly dynamic area strongly dependent on water activity. This includes intermittent water bodies which have a specific impact on nearby environment. Sessile organisms such as plants have to adapt to extreme changes in water availability. Their presence, distribution and abundance can therefore serve as indicators of the ecological status of the water ecosystems. Using the modified Riparian, Channel, and Environmental (RCE) inventory method, we ranked the Rak River in the highest RCE quality classes. Based on the RMI (River Macrophyte Index), we classified the Rak River to good or very good ecological status. The good ecomorphological preservation of the Rak River probably also contributes to the presence of endangered plant species; among the 38 taxa listed, we detected the presence of eleven species included in Slovenian Red list of threatened pteridophytes and seed plants. At the time of our sampling, the species *Zannichellia palustris* was detected for the first time in this river. The high assessment of the preservation of the intermittent karst river Rak confirms the current good management and is important in the implementation of nature protection guidelines for the future.

Key words: karst, macrophytes, RCE method, RMI, river Rak

[1] Darja Kopitar, dipl. org. inf. (UN), kopitar.darja@gmail.com
[2] Marija Kravanja, dipl. biol. (UN), kravanja.marija@gmail.com
[3] Aleksander Trajbarič, dipl. biol. (UN), saso.trajbaric@gmail.com
[4] dr. Mateja Germ, mateja.germ@bf.uni-lj.si, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo, Večna pot 111, SI-1000 Ljubljana

UVOD

Območje Slovenije je na stičišču štirih biogeografskih regij: alpske, dinarske, panonske in (sub)mediteranske. Odlikuje ga visoka geomorfološka, geološka, klimatska in edafska heterogenost in posledično visoka biotska raznovrstnost (Šraj-Kržič s sodelavci 2006; Zelnik s sodelavci 2021). Geografsko najbolj razširjene kamnine na območju Slovenije so apnenci in dolomiti, ki prekrivajo 43 % celotne površine Slovenije (8800 km^2) in so ustrezna podlaga za razvoj posebnih geomorfoloških pojavov, ki jih poznamo pod skupnim imenom kras (Mršić 1997). Slovenski kras sestavljajo alpski, predalpski in dinarski kras, ki se med seboj razlikujejo v geoloških, geomorfoloških in hidroloških značilnostih. Dinarski kras, kamor prištevamo visoki (visoke kraške planote: Javorniki, Hrušica, Nanos, Trnovski gozd, Banjšice in Snežnik) in nizki dinarski kras (kras v nižinskih predelih: Notranjsko podolje, Pivška kotlina, Kras) se v nizu kraških polj, obdanih z višjimi planotami, razteza v smeri od severozahoda proti jugovzhodu (Zupan Hajna, Mihevc & Prelovšek 2010). Značilnost kraških polj so med drugim izrazita nihanja vodostaja (spomladanske in jesenske poplave ter poletne suše), ki so posledica velike količine padavin in odtekanja vode v obsežen podzemni drenažni sistem v karbonatnih kamninah (Šraj-Kržič s sodelavci 2006). Podtalnica in površinska voda na kraškem ozemlju predstavljata enoten dinamičen sistem (Bonacci, Željković & Galić 2012). Dolžina dela reke, ki teče na površju, je odvisna od debeline in količine rečnega transporta, pretoka reke, votlikavosti kamnine in globine vodne gladine (Gams 2003). Na kraškem terenu je pomemben dejavnik pri razvoju rečnega sistema predvsem lokalna topografija (Bonacci, Željković & Galić 2012).

Reke so raznoliki in dinamični ekosistemi z visoko prostorsko in časovno heterogenostjo. Njihove biološke, fizikalne in kemijske značilnosti so odvisne od longitudinalnih sprememb, lateralnih vplivov, vertikalnih povezav in časovne skale. Štiridimenzionalni sistem rek omogoča izmenjavo energije, snovi in organizmov. Jakost prostorskih interakcij se spreminja vzdolž rečnega toka in kot posledica človekovih vplivov na rečni tok, obliko rečne struge ter njeno povezanost s poplavnimi območji in povodji (Zelnik s sodelavci 2021). Spremembe zaradi antropogenih vplivov se odražajo v znižanju kakovosti vodnega ekosistema in spremembi združb vodnih organizmov (Šraj-Kržič s sodelavci 2006). Reke predstavljajo nepredvidljive habitate za organizme. Obseg pritiskov na organizme je odvisen od lastnosti povodja (naklona, geologije, parametrov pokrovnosti tal) in človekovega vpliva (raba tal v zaledju, sprememba obrežne vegetacije, sprememba strukture rečne struge ipd). Omenjeni parametri lahko bistveno spremenijo rečne združbe, vključno z združbami makrofitov, ki igrajo pomembno vlogo pri pretoku energije, kroženju hranil in procesih sedimentacije, obenem pa predstavljajo habitat drugim organizmom in so odločilnega pomena za delovanje številnih rečnih sistemov (Zelnik s sodelavci 2021; Germ, Kuhar & Gaberščik 2016; Germ s sodelavci 2021). Zaradi svoje pomembne vloge v vodnih ekosistemih so makrofiti vključeni v Evropsko okvirno vodno direktivo (ang. *EU Water Framework Directive*), kjer predstavljajo enega izmed štirih bioloških elementov kakovosti za oceno ekološkega stanja rek (Šraj-Kržič s sodelavci 2006).

Kraške reke zaznamuje specifičen presihajoč vodni režim, ki zaradi izrazitih nihanj vodostaja povzroča fizične motnje in vpliva na razmere v vodnem okolju. Del poti pretečejo pod zemljo, kar zmanjša njihovo samočistilno sposobnost in poveča ranljivost na antropogene vplive (Šraj-Kržič s sodelavci 2006; Zelnik s sodelavci 2021). Pojavnost in razporeditev makrofitov ter struktura makrofitskih združb so v presihajočih rekah odvisne od trajanja poplavljenosti, globine vode in zadrževalnega časa vode (Šraj-Kržič s sodelavci 2006). Pomemben sestavni del rastlinskih združb v kraških rekah predstavljajo vrste z amfibijskim značajem. Razvoj nove, na razmere bolje prilagojene rastne oblike listov, sproži več okoljskih sprememb, povezanih z nihanjem gladine vode. Najpomembnejše so spremembe koncentracije CO_2, temperature, intenzitete in kakovosti svetlobe ter osmotski stres. Nihanje vodostaja vpliva na izmenjavo snovi med sedimenti in vodo ter stopnjo mineralizacije, s tem pa na količino hranil v vodi. Spremembe so najizrazitejše ob poplavah, ki povzročijo spiranje hranil iz terestričnih ekosistemov v vodo. Zaradi intenzivne mineralizacije sedimenti presihajočih vodnih teles običajno vsebujejo manjši delež organske snovi in posledično nižjo vsebnost hranil, kar med drugim lahko vpliva tudi na vrstno sestavo makrofitov (Zelnik s sodelavci 2021).

Prisotnost in raznolikost makrofitov sta odvisni od kakovosti vode, globine vode, hitrosti vodnega toka, pretoka vode, hidroloških razmer, nivoja vode, pH-ja, zasenčenosti in značilnosti substrata. Poleg tega nanje vplivajo tudi biotski dejavniki, denimo lastnosti vrst, medvrstna kompeticija (predvsem za svetlobo, hranila in prostor), paša (ang. *grazing*) in alelopatija. Zasenčenost z obrežno vegetacijo je pomemben dejavnik lotičnih ekosistemov, vpliva pa tudi na razširjenost

in abundanco vodnih rastlin (Germ s sodelavci 2021; Zelnik s sodelavci 2021). Kompeticijski potencial makrofitov je odvisen od njihove rastne dinamike, načina asimilacije ogljika, pridobivanja energije in privzema hranil. Privzem hranil s strani makrofitov je v rekah spremenljiv glede na letni čas in rastno dinamiko (Zelnik s sodelavci 2021).

Združbe makrofitov se odzivajo na motnje v ekosistemu, posebno občutljive pa so na antropogene vplive. Obogatitev s hranili, spremembe obvodne vegetacije, regulacije rečnih strug in spremembe hidrološkega režima reke močno spreminjajo strukturo in delovanje ekosistemov, obenem pa negativno vplivajo na pestrost makrofitskih združb in sestavo vrst (Germ s sodelavci 2021; Germ, Kuhar in Gaberščik 2016). Učinki antropogenih dejavnosti na pestrost makrofitov so odvisni od tipa aktivnosti (njene pogostosti in intenzivnosti) ter odpornosti ekosistema na obremenitve. Intenzivna kmetijska dejavnost pogosto vodi v fizične spremembe vodnih habitatov (denimo kanaliziranje potokov), kar spreminja razmere za življenjske združbe. Omenjeni vplivi obenem pospešujejo širjenje invazivnih tujerodnih vrst, za katere so vodni in obrežni habitati izjemno dovzetni (Germ s sodelavci 2021). Na globalni ravni imajo številne vrste vaskularnih makrofitov široko razširjenost, kljub temu pa je približno 39 % od skupno cca. 412 rodov, ki vključujejo vodne vaskularne makrofite, endemitov ene biogeografske regije (Zelnik s sodelavci 2021).

Poznavanje vloge makrofitov rek in jezer je osnova za razumevanje strukture in funkcije vodnih ekosistemov in zato nepogrešljivo pri ustreznem upravljanju rek in potokov. Namen raziskave je bil ugotoviti pestrost, abundanco in razširjenost makrofitov v kraški reki Rak, oceniti stanje rečnega sistema na podlagi ekomorfoloških lastnosti reke po prirejeni RCE metodi (ang. *A Riparian, Channel, and Environmental Inventory*; Petersen 1992) ter uvrstiti reko v enega od petih razredov ekološkega stanja s pomočjo indeksa RMI (ang. *River Macrophyte Index*; Kuhar s sodelavci 2011). Predpostavljali smo, da:

1) bo v zgornjem delu reke, kjer je tok močnejši, substrat pa manj ustrezen za ukoreninjanje, abundanca makrofitov najnižja;
2) bo v zgornjem delu reke prevodnost nižja;
3) bo pH višji na mestih z višjo abundanco rastlin;
4) je ekomorfološka ohranjenost reke Rak dobra, zaradi česar se bo po prirejeni RCE metodi reka uvrstila v najvišje kakovostne razrede;
5) je ekološko stanje reke Rak, ocenjeno na podlagi indeksa rečnih makrofitov (RMI), dobro ali zelo dobro.

MATERIALI IN METODE

Opis preučevanega območja

Kotlina Rakov Škocjan leži v občini Cerknica, v severozahodnem delu Notranjskega podolja med Planinskim ter Unško-Rakovškim kraškim poljem na severu, Cerkniškim poljem na jugovzhodu ter Javorniki na jugu (Stepišnik s sodelavci 2009). Celotno območje je zakraselo, kamnito in vrtačasto, gradijo ga temno sivi plastoviti apnenci spodnje kredne starosti (Ferk & Stepišnik 2011). Med skladi apnenca se pojavljajo tudi apnene breče z zrnatim dolomitnim in kalcitnim vezivom (Pleničar 1963). Rakov Škocjan je razglašen za krajinski park oz. naravni spomenik kot del Notranjskega regijskega parka (Ur. l. RS 2002a), območje pa je bilo kot prirodni spomenik zavarovano že leta 1949 (Ur. l. LRS 1949).

Glavni vodotok območja je približno dva kilometra dolga reka Rak, ki izvira iz Zelških jam (504 m n. v.) na jugovzhodnem delu doline, ponikne pa v Tkalca jamo (497 m n. v.) na njenem severozahodnem delu. V dolini Raka se pojavljajo vode, ki poniknejo na severozahodnem robu Cerkniškega polja, ter vode, ki pronicajo skozi kraški masiv Javornikov. Ob nizkih vodostajih voda v strugi reke ponika in presahne že na polovici doline. Povirni del Raka predstavlja 200 m dolga in do 30 m široka zatrepna dolina v obliki kanjona, zatem pa se dolina razširi na povprečno 80 m. Njena pobočja so skalnata in strma. Dno struge Raka je živoskalno, ob strugi pa se začne pojavljati naplavna ravnica, ki sega do nadmorske višine 505 metrov. V pobočjih doline so zajedene zatrepne doline občasnih pritokov. V prvih 350 m doline, kjer je strmec Raka 5,7 %, se rečna struga spusti skoraj do nadmorske višine 502 m. Zatem se hidrografsko aktivno dno doline razširi na povprečno 200 m. Na obeh straneh struge se pojavlja obsežna naplavna ravnica. Strmec reke je v tem delu minimalen (Ferk & Stepišnik 2011; Stepišnik & Repe 2015).

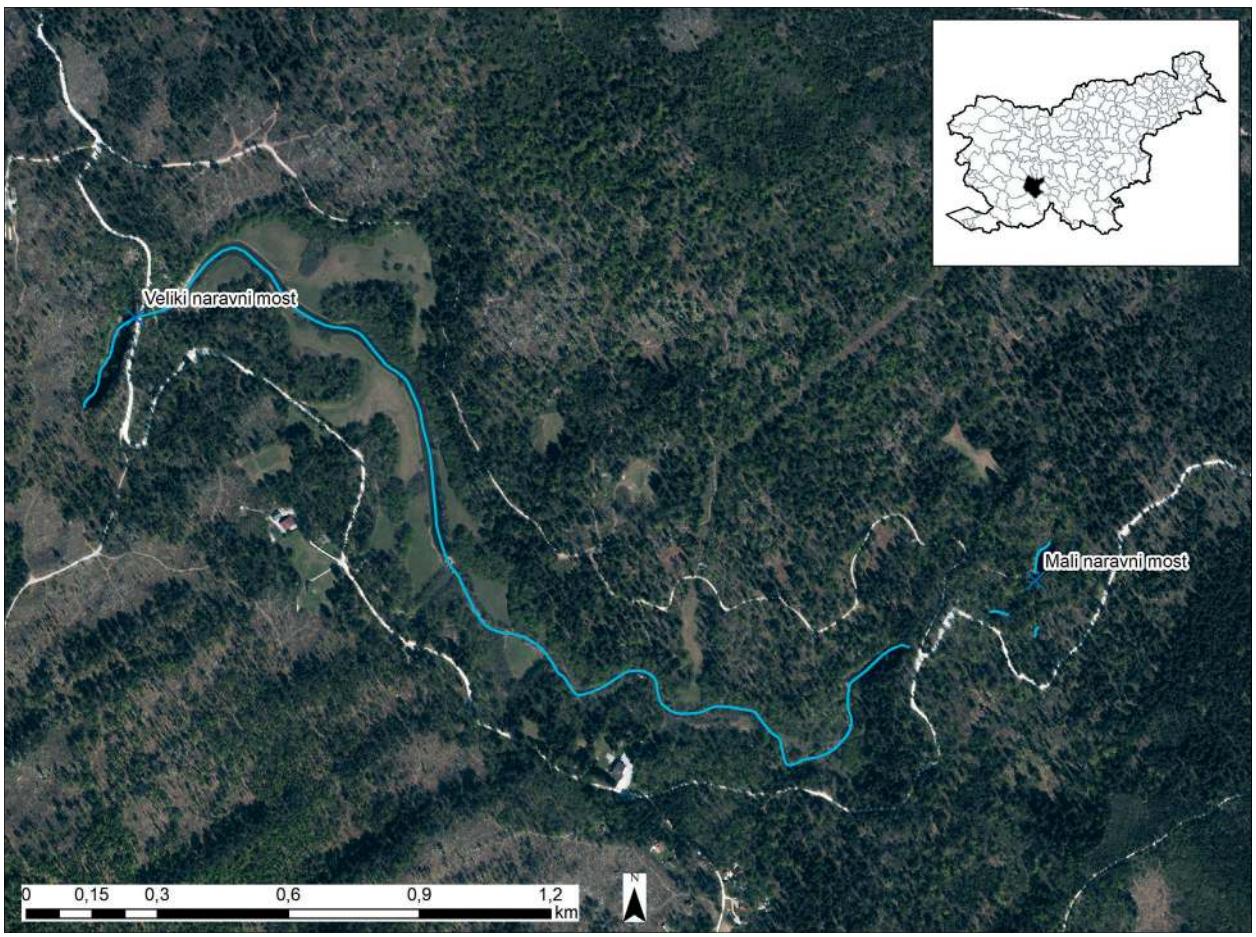
V okviru terenskih vaj magistrskega študijskega programa Ekologija in biodiverziteta (BF UL) smo 29. in 30. junija 2021 raziskovali kraško reko Rak (Slika 1).

Metode dela

Opravili smo popis makrofitov, izmerili fizikalne in kemijske parametre vode ter ocenili stopnjo ohranjenosti reke s pomočjo prirejene RCE metode (Petersen 1992) z upoštevanjem 12 parametrov, katerih štiri opisne stopnje zajemajo gradient kakovosti za posamezen dejavnik. Upoštevali smo rabo tal za obrežnim pasom, lastnosti obrežnega pasu (sklenjenost vegetacije in tip vegetacije v oddaljenosti 0 do 10 metrov od struge) ter morfologijo struge (obliko, usedline, prisotnost zadrževalnih struktur v strugi, dno reke (tip substrata in detrit), strukturo in spodjedanje rečnega brega, pojavljanje brzic, tolmunov in meandrov). Na podlagi seštevka pridobljenih vrednosti parametrov smo posamezne odseke uvrstili v enega izmed petih RCE kakovostnih razredov, podrobneje predstavljenih v Preglednici 1.

Preglednica 1: RCE kakovostni razredi.
Table 1: RCE quality classes.

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 na posameznih odsekih
III	119-172	dobro	rumena	Potrebne so manjše spremembe 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



Slika 1: Preučevano območje - Rakov Škocjan z reko Rak, označeno s svetlo modro barvo. Lokaciji Malega in Velikega naravnega mostu označujeta temno modro obarvana križca. Vir podlage: MKGP, 2022.
Figure 1: Study area - Rakov Škocjan with the Rak River (in light blue). Dark blue crosses indicate the locations of the Small and the Great Natural Bridge. Layer source: MKGP, 2022.

Abundanco makrofitov smo ocenili na podlagi petstopenjske lestvice (1 - posamična vrsta, 2 - redka vrsta, 3 - pogosta vrsta, 4 - množična vrsta, 5 – prevladujoča vrsta) (Kohler 1978). Rečno strugo smo po dolžini razdelili na 15 odsekov. Nov odsek smo izbrali, kjer je bila vidna sprememba v prisotnosti in/ali abundanci makrofitov, sprememba v obrežnem pasu ali rabi tal v zaledju (Preglednica 2). Koordinate začetnih in končnih pregledanih odsekov smo pridobili s pomočjo GPS naprave in jih vnesli v program ArcMap 10.8.1, s pomočjo katerega smo izmerili dolžine pregledanih odsekov in izrisali karto, ki prikazuje njihovo uvrstitev v RCE kakovostne razrede (Slika 8). Osnovno podlago zemljevida predstavlja digitalni ortofoto posnetek (MKGP 2022).

Fizikalne in kemijske parametre vode (pH, temperaturo [°C], koncentracijo kisika [mg/L] in nasičenost s kisikom [%] ter električno prevodnost [µS/cm]) smo izmerili z multimetrom EUTECH, PCD 650.

Zgornji, plitvejši del reke Rak, smo pregledali z bredenjem po strugi, v spodnjem, globljem delu pa je vzorčenje potekalo s čolna, pri čemer smo si pomagali s teleskopsko palico s kavlji (»makrofitolovcem«). Rastline smo, z izjemo alge *Lemanea* sp., določili na terenu in kasneje preverili, katere izmed njih so uvrščene na Rdeči seznam ogroženih praprotnic in semenk. Vsem vrstam smo določili abundanco in pripisali njihove rastne oblike: potopljena ukoreninjena (sa), plavajoča ukoreninjena (fl), rastlina z amfibijskim značajem (am) ali močvirska rastlina oz. helofit (he).

Za posamezno vrsto smo izračunali masni indeks (MI), ki je z dejansko biomaso (PM) povezan s funkcijo $f(x) = x^3$ (Melzer s sodelavci 1986). Za računanje kvantitativne pomembnosti vrste je bila uporabljena relativna rastlinska abundanca (RPA). Za izračun RPA posamezne vrste (RPA_x) potrebujemo podatek o njeni rastlinski masi na rečnem odseku i (PM_{xi}) ter podatek o dolžini rečnega odseka i (L_i):

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

Izračunali smo še povprečni masni indeks vrste na vseh odsekih reke (MMT) ter povprečni masni indeks vrste na odsekih, kjer se vrsta pojavlja (MMO):

$$MMT = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=1}^{n} MI_i^3 \cdot AL_i}{GL}}$$

$$MMO = \sqrt[3]{\frac{\sum_{i=x}^{n} MI_i^3 \cdot AL_i}{\sum_{i=x}^{n} AL_i}}$$

pri čemer MI_i predstavlja masni indeks vrste na odseku i, AL_i dolžino odseka i, v katerem je vrsta prisotna, ter GL celotno dolžino pregledane reke (povzeto po Pall & Janauer 1995).

Deleže reke, kjer se pojavlja posamezna vrsta, smo prikazali z distribucijskim diagramom (Slika 6).

Izračunali smo indeks RMI (indeks rečnih makrofitov, ang. *River Macrophyte Index*; Kuhar s sodelavci 2011), s pomočjo katerega smo uvrstili posamezne rečne odseke v enega od petih razredov ekološkega stanja.

Preglednica 2: Začetne koordinate, dolžine in kratki opisi pregledanih odsekov reke Rak.
Table 2: Starting point coordinates, lengths and short descriptions of the examined sections of the Rak River.

Št. odseka	Zemljepisna širina začetne točke odseka [°N]	Zemljepisna dolžina začetne točke odseka [°E]	Dolžina [m]	Kratek opis odseka
1	45.790699	14.303705	145	Izvirni del reke Rak z gozdnim zaledjem, večinoma poraščen z mahovi.
2	45.790191	14.302706	147	Gozdni odsek s srednje hitrim vodnim tokom ter številnimi kamni, skalami in debli v strugi.
3	45.789310	14.302320	289	Daljši in bolj presvetljen gozdni odsek s sestoji pokončnega ježka (*Sparganium erectum* agg.) in srednje hitrim vodnim tokom.
4	45.789545	14.300486	126	Grmovnat odsek s počasnim vodnim tokom, od odseka št. 5 ločen z manjšim naravnim jezom.
5	45.789668	14.299369	50	Najkrajši izmed obravnavanih odsekov; prevladovala je vrsta *Sparganium erectum* agg. (pokončni ježek), struga je bila delno zasenčena, vodni tok počasen.
6	45.789604	14.298914	75	Kratek, delno zasenčen gozdni odsek s počasnim vodnim tokom.

7	45.789928	14.298440	169	Delno presvetljen odsek zavoja reke s počasnim, komaj opaznim vodnim tokom.
8	45.790047	14.297193	246	Delno zasenčen odsek reke; začetni del se nahaja v gozdu, zaledje spodnjega dela pa na levem bregu predstavljajo travniki.
9	45.790731	14.295445	220	Delno zasenčen odsek reke s srednje hitrim vodnim tokom; na levem bregu ga obdaja gozd, na desnem pa pas grmovja, v zaledju katerega je vzdrževan travnik.
10	45.791684	14.294254	136	Odsek s komaj opaznim vodnim tokom in obrežnimi mokrotnimi travniki na levem ter gozdom na desnem bregu.
11	45.792393	14.293687	155	Odsek z ozkim pasom grmičevja na obrežju in mokrotnimi travniki v zaledju. Vodni tok počasen, komaj opazen.
12	45.793341	14.293660	255	Razmeroma raven odsek reke z gozdom na desnem in vzdrževanimi travniki na levem bregu.
13	45.794666	14.292637	289	Razmeroma raven odsek reke s počasnim vodnim tokom. Zaledje predstavljajo pretežno mokrotni travniki in gozd na desnem bregu.
14	45.795654	14.290667	262	Območje zadnjega zavoja reke Rak. Vodni tok komaj opazen, zaledje sestavlja mozaik gozda in travnikov.
15	45.795869	14.288936	81	Zadnji odsek struge pred Velikim naravnim mostom in vhodom v Tkalca jamo, kjer reka ponikne. V času vzorčenja na tem mestu vodnega toka ni bilo (stoječa voda).
končna točka zadnjega odseka	45.795484	14.288476		

REZULTATI

Odseki reke Rak so se med seboj precej razlikovali v prisotnosti, razporeditvi in abundanci vseh izmed 38-ih zabeleženih taksonov makrofitov. Pri fizikalnih in kemijskih parametrih vzdolž reke je prihajalo do lokalnih odstopanj in majhnih teženj, ki so posledica velike dinamike tega ekosistema v prostoru in času. S pomočjo prirejene RCE metode smo reko Rak uvrstili v najvišje RCE kakovostne razrede in s pomočjo indeksa RMI v dobro oz. zelo dobro ekološko stanje.

Fizikalni in kemijski parametri

Z multimetrom smo izmerili temperaturo vode, pH, koncentracijo raztopljenega kisika in nasičenost vode s kisikom ter prevodnost vode (Slika 2).

Temperatura vode se je gibala med 16°C in 21°C (Slika 2a). Najnižja je bila pri izviru ter se nato vzdolž reke višala. Največjo spremembo v temperaturi smo izmerili med 8. in 9. rečnim odsekom, kjer je temperatura vode narasla za 4°C. Dolvodno so se nato temperature gibale okoli 19°C do 21°C.

Na prvih 9. rečnih odsekih so se pH vrednosti gibale med 8 in 8,5 (Slika 2b). Med 9. in 10. rečnim odsekom je prišlo do izrazitega padca. Vrednosti so bile od 10. odseka dolvodno bolj variabilne; gibale so se med 7 in 8.

Koncentracija kisika se je gibala med 9,5 mg/L in 12,5 mg/L (Slika 2c). Izstopajoča vrednost je bila le na 10. merilnem mestu, kjer je bila izmerjena koncentracije kisika v vodi 7,1 mg/L. Pred in po tem vzorčnem mestu so bile koncentracije kisika precej višje, okoli 11,5 mg/L.

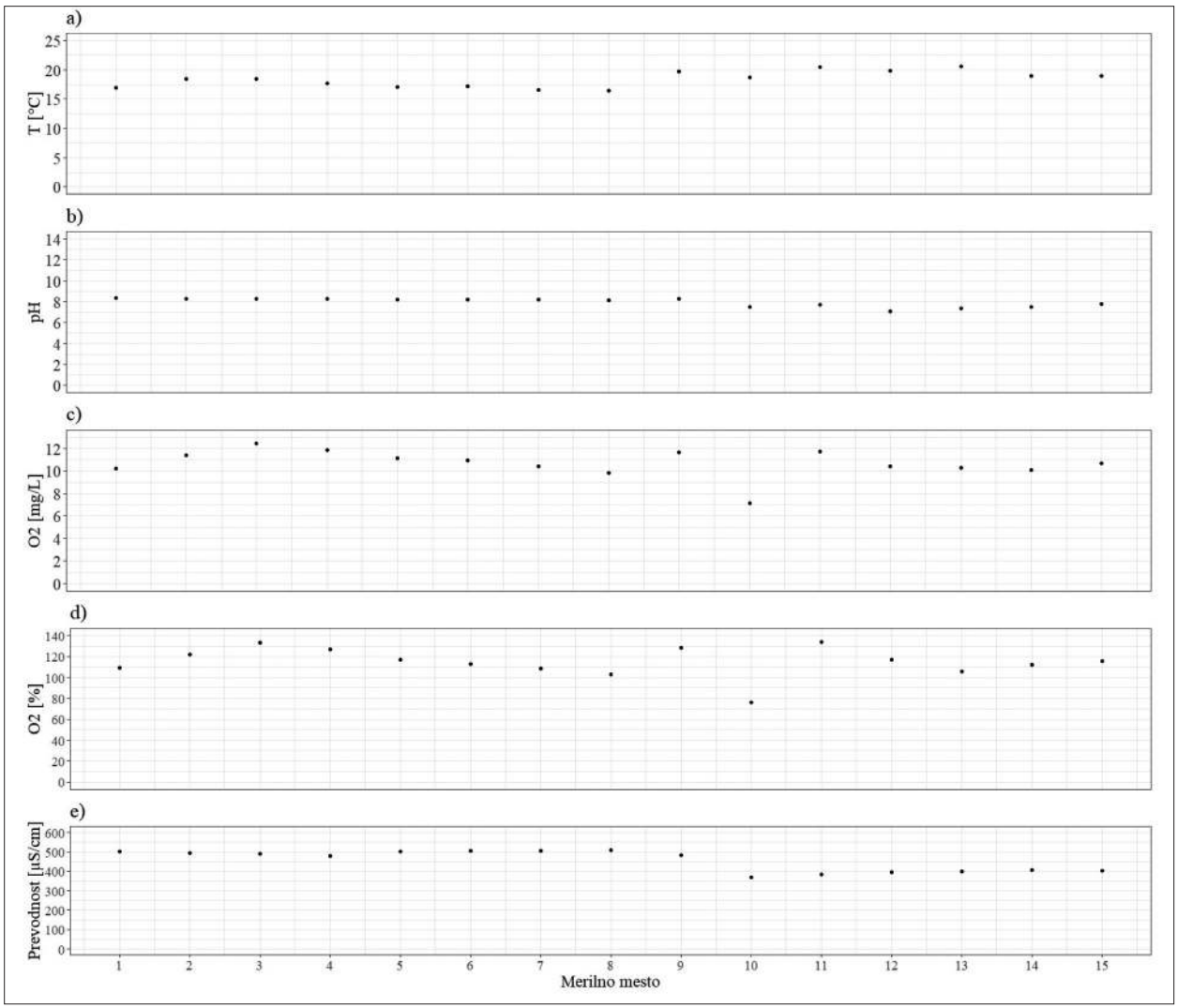
Izračunane vrednosti nasičenosti vode s kisikom so bile precej variabilne. Gibale so se med 100 % in 135 %. Le vrednost na 10. merilnem mestu je izstopala s 75-odstotno nasičenostjo (Slika 2d).

Prevodnost vode je bila na prvih 9. merilnih mestih med 475 in 515 µS/cm. Za tem merilnim mestom je prevodnost močno upadla in se na zadnjih petih odsekih gibala med 365 µS/cm in 410 µS/cm (Slika 2e).

Prisotnost, abundanca in razporeditev makrofitov

V Preglednici 3 so taksoni, ki smo jih zabeležili v reki Rak, njihova rastna oblika in stopnja ogroženosti glede na Rdeči seznam praprotnic in kritosemenk oz. Rdeči seznam mahov.

V reki Rak smo zabeležili 38 taksonov makrofitov, natančneje enega predstavnika rdečih alg (Rhodophyta), 1 predstavnika parožnic (Charophyta), 3 predstavnike mahov (Bryophyta), 1 predstavnico pra-



Slika 2: Fizikalni in kemijski parametri po posameznih odsekih reke Rak: a) Temperatura vode [°C]; b) pH vode; c) Koncentracija raztopljenega kisika [mg/L]; d) Nasičenosti vode s kisikom [%]; e) Prevodnost vode [µS/cm].
Figure 2: Physical and chemical parameters at each section of the Rak River: a) Temperature [°C]; b) pH; c) Concentration of dissolved oxygen [mg/L]; d) Oxygen saturation [%]; e) Electric conductivity [µS/cm].

protnic (Pteridophyta) in 32 vrst semenk (Spermatophyta), izmed katerih je 11 vrst uvrščenih na Rdeči seznam ogroženih praprotnic in semenk (Uradni list RS - 82/2002, Uredbeni del) kot ranljive vrste (oznaka "V"). Glede na rastno obliko smo popisali 15 močvirskih rastlin (helofitov), 12 submerznih ukoreninjenih rastlin, 10 vrst z amfibijskim značajem in 1 plavajočo ukoreninjeno vrsto. Od skupno 24 družin makrofitov je bila najbolj zastopana družina dristavcev (Potamogetonaceae) - zabeležili smo 5 vrst in enega križanca (*Potamogeton* x *zizii*).

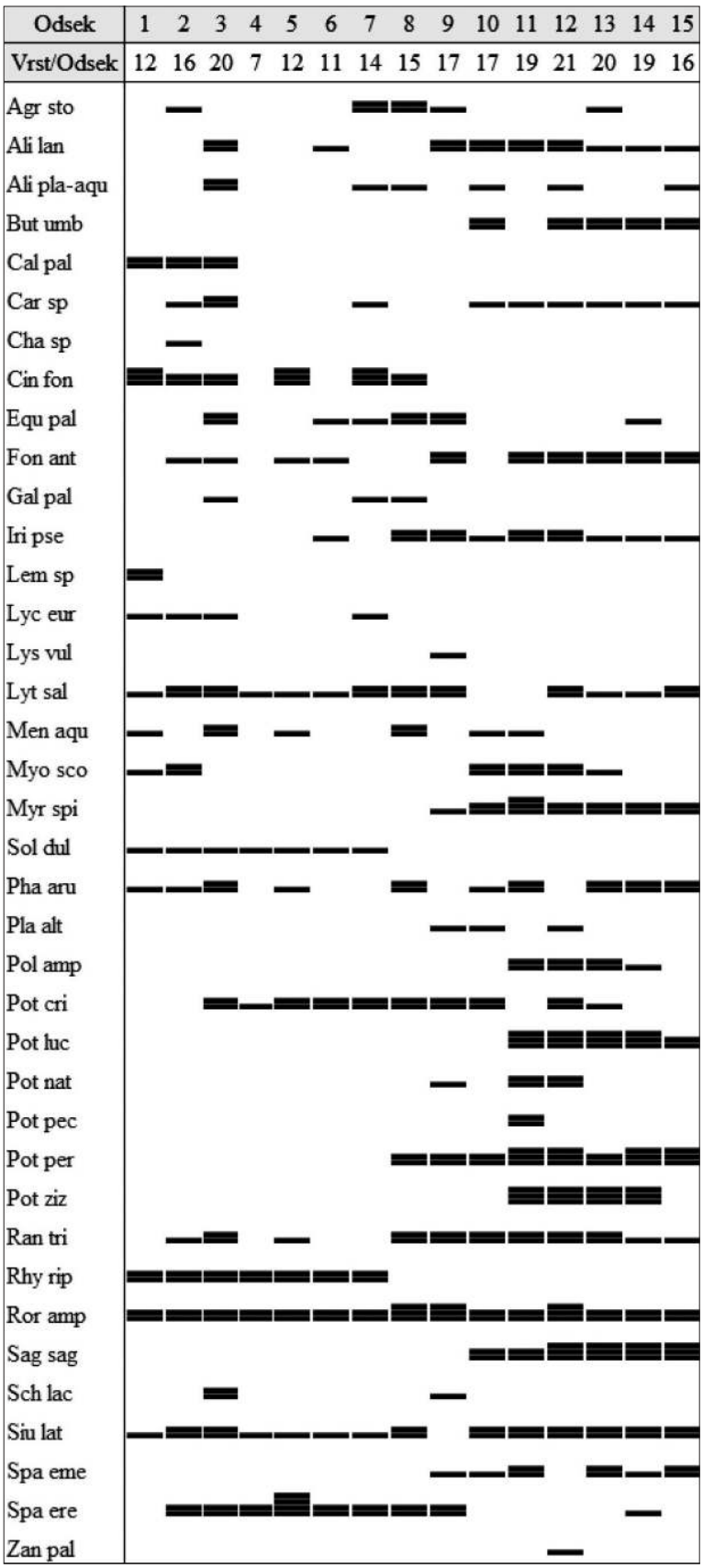
Samo prisotnost taksonov nam o stanju in prostorski dinamiki reke Rak poda zgolj omejen nabor informacij. V posameznih odsekih reke so bili namreč posamezni taksoni zelo različno razporejeni in prisotni z različno abundanco, kar je razvidno s prikaza na Sliki 3.

Število popisanih vrst v posameznem odseku je bilo večje v drugi polovici reke (Slika 3). Razlika v številu vrst (13) je bila največja med 3. in 4. odsekom, od 6. odseka dalje so bile razlike v številu vrst majhne. Abundanco 4 smo pripisali samo vrsti *Sparganium erectum* agg. na petem odseku. Vrste iz rodu *Potamogeton* so se začele pojavljati šele v spodnji polovici reke, z izjemo vrste *Potamogeton crispus*, ki je bila razširjena tudi v zgornjem delu reke. Vrsta *Rorippa amphibia* je bila prisotna v vseh odsekih, in sicer z zmerno abundanco (2 in 3), medtem ko smo vrsto *Zannichellia palustris*

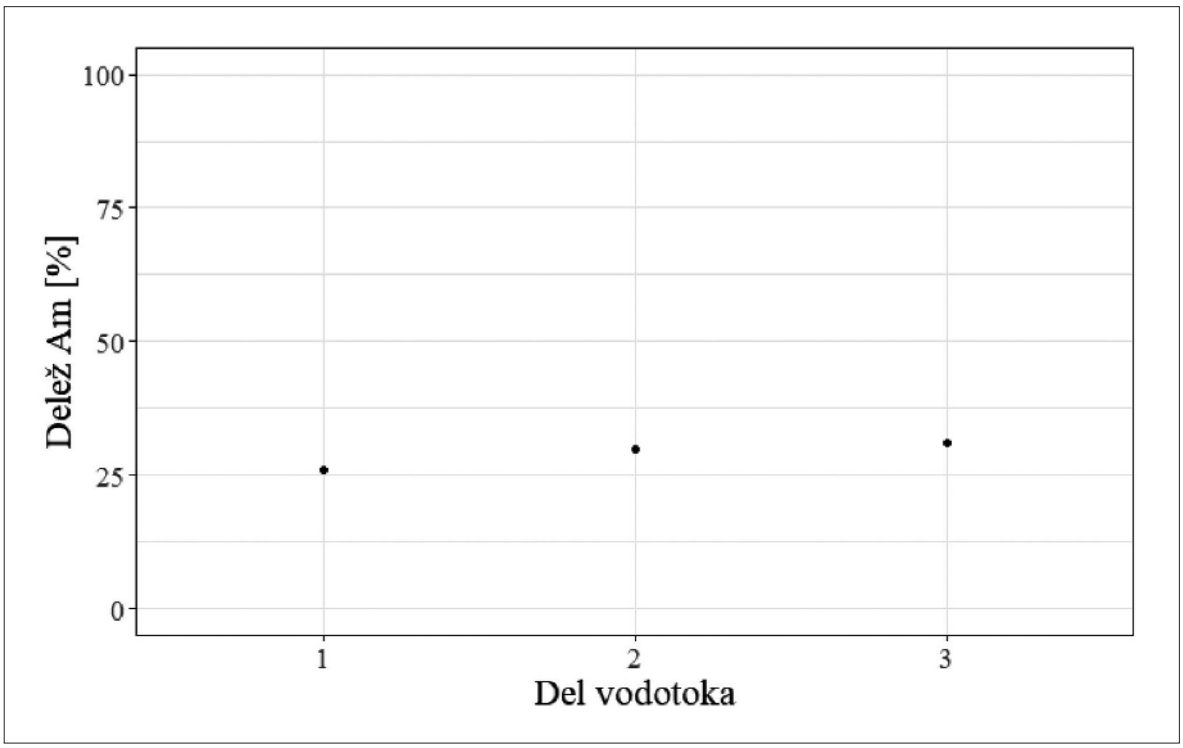
Preglednica 3: Seznam vrst s pripadajočimi podatki – družina, znanstveno in slovensko ime taksona (Martinčič 2003; Martinčič s sodelavci 2007). Kategorije opisujejo stopnjo ogroženosti posamezne vrste glede na Rdeči seznam praprotnic in kritosemenk oz. Rdeči seznam mahov (Uradni list RS - 82/2002, Uredbeni del), pri čemer črka "V" označuje ranljive vrste (ang. vulnerable), oznaka "/" pa vrste, ki niso navedene na nobenem izmed omenjenih seznamov. Oznake v zadnjem stolpcu preglednice pomenijo rastne oblike rastlin; potopljena ukoreninjena (Sa), plavajoča ukoreninjena (Fl), rastlina z amfibijskim značajem (Am) ali močvirska rastlina oz. helofit (He).

Table 3: List of species with data - family, scientific and Slovenian name of the taxon (Martinčič 2003; Martinčič et al. 2007). The categories describe the degree of threat of each species according to the Red List of Pteridophytes and seed plants and the Red List of Mosses (Uradni list RS - 82/2002, Uredbeni del), with „V" indicating vulnerable species and „/" indicating species that are not listed on either of the above-mentioned lists. The designations in the last column refer to the plant growth forms; submerged rooted (Sa), floating rooted (Fl), amphibious (Am) or helophyte (He).

Družina	Znanstveno ime	Slovensko ime	Okrajšava	Kategorija	Rastna oblika
		Charophyta			
Characeae	*Chara* sp. L.	/	Cha sp	/	Sa
		Rhodophyta			
Lemaneaceae	*Lemanea* sp. Sirodot non Bory	/	Lem sp	/	Sa
		Bryophyta			
Brachytheciaceae	*Rhynchostegium riparioides* (Hedw.) Card.	/	Rhi rip	/	Sa
Fontinalaceae	*Fontinalis antipyretica* Hedw.	/	Fon ant	/	Sa
Pottiaceae	*Cinclidotus fontinaloides* (Hedw.) P.Beauv.	/	Cin fon	/	Sa
		Pteridophyta			
Equisetaceae	*Equisetum palustre* L.	močvirska preslica	Equ pal	/	He
		Spermatophyta			
Alismataceae	*Alisma lanceolatum* With.	suličastolistni porečnik	Ali lan	V	He
Alismataceae	*Alisma plantago-aquatica* L.	trpotčasti porečnik	Ali pla-aqu	/	He
Alismataceae	*Sagittaria sagittifolia* L.	navadna streluša	Sag sag	V	Am
Apiaceae	*Sium latifolium* L.	širokolistna koščica	Siu lat	V	Am
Boraginaceae	*Myosotis scorpioides* L.	močvirska spominčica	Myo sco	/	Am
Brassicaceae	*Rorippa amphibia* (L.) Besser	prava potočarka	Ror amp	V	Am
Butomaceae	*Butomus umbellatus* L.	kobulasta vodoljuba	But umb	V	Am
Cyperaceae	*Carex* sp. L.	šaš	Car sp	/	He
Cyperaceae	*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla	jezerski biček	Sch lac	/	Am
Haloragaceae	*Myriophyllum spicatum* L.	klasasti rmanec	Myr spi	V	Sa
Iridaceae	*Iris pseudacorus* L.	vodna perunika	Iri pse	/	He
Lamiaceae	*Lycopus europaeus* L.	navadni regelj	Lyc eur	/	He
Lamiaceae	*Mentha aquatica* L.	vodna meta	Men aqu	/	He
Lythraceae	*Lythrum salicaria* L.	navadna krvenka	Lyt sal	/	He
Plantaginaceae	*Plantago altissima* L.	veliki trpotec	Pla alt	/	He
Poaceae	*Agrostis stolonifera* L.	plazeča šopulja	Agr sto	/	He
Poaceae	*Phalaris arundinacea* L.	pisana čužka	Pha aru	/	He
Polygonaceae	*Polygonum amphibium* L.	vodna dresen	Pol amp	V	Am
Potamogetonaceae	*Potamogeton crispus* L.	kodravi dristavec	Pot cri	/	Sa
Potamogetonaceae	*Potamogeton lucens* L.	bleščeči dristavec	Pot luc	V	Sa
Potamogetonaceae	*Potamogeton natans* L.	plavajoči dristavec	Pot nat	/	Fl
Potamogetonaceae	*Potamogeton pectinatus* L.	češljasti dristavec	Pot pec	/	Sa
Potamogetonaceae	*Potamogeton perfoliatus* L.	preraslolistni dristavec	Pot per	V	Sa
Potamogetonaceae	*Potamogeton* x *zizii*	/	Pot ziz	/	Sa
Primulaceae	*Lysimachia vulgaris* L.	navadna pijavčnica	Lys vul	/	He
Ranunculaceae	*Caltha palustris* L.	navadna kalužnica	Cal pal	/	He
Ranunculaceae	*Ranunculus trichophyllus* Chaix	lasastolistna vodna zlatica	Ran tri	V	Am
Rubiaceae	*Galium palustre* L.	močvirska lakota	Gal pal	/	He
Solanaceae	*Solanum dulcamara* L.	grenkoslad	Sol dul	/	He
Typhaceae	*Sparganium emersum* Rehmann	enostavni ježek	Spa eme	/	Am
Typhaceae	*Sparganium erectum* L.	pokončni ježek	Spa ere	/	Am
Zannichelliaceae	*Zannichellia palustris* L.	močvirska vodopivka	Zan pal	V	Sa



Slika 3: Prikaz razporeditve in abundance makrofitov po posameznih odsekih reke Rak. Abundanca je bila ocenjena s petstopenjsko lestvico, kjer 1 pomeni najnižjo abundanco (najnižja oznaka), 5 pa pomeni najvišjo abundanco (najvišja oznaka). Manjkajoča oznaka pomeni, da na tem odseku takson ni bil prisoten. Največ taksonov se je pojavilo v odseku 12 (21), najmanj pa na odseku 4 (7).
Figure 3: Distribution and abundance of macrophytes along the 15 sections of the Rak River. Abundance was estimated using a five level scale, where 1 signifies the lowest abundance (the smallest mark), and 5 signifies the highest abundance (the biggest mark). No mark signifies that in a certain section the taxon did not occur. The largest number of taxa occurred in section 12 (21) and the least taxa in section 4 (7).



Slika 4: Delež amfibijskih vrst (Am), prisotnih v prvem (od 1. do 5. rečnega oseka), drugem (od 6. do 10. odseka) in tretjem (od 11. do 15. odseka) delu reke Rak. Vzdolž reke se je delež amfibijskih vrst s 26,0 % povečal na 30,0 % in 31,0 %.
Figure 4: Proportion of amphibious species (Am) present in the first (from section 1 to 5), second (from sections 6 to 10), and third (from sections 11 to 15) part of the Rak River. Along the river, the proportion of amphibious species increased from 26.0% to 30.0% and 31.0%.

popisali zgolj enkrat (na 12. odseku), z najnižjo abundanco (1).

Taksoni z amfibijskim značajem so pomemben sestavni del rastlinskih združb v kraških rekah. Zahvaljujoč morfološkim prilagoditvam so zmožni uspešno slediti spremembam v nihanju vodostaja in so potencialni pokazatelji dinamike v vodostaju na posameznih delih reke Rak.

Posamezni rastlinski taksoni se po odsekih reke niso pojavljali enakomerno, kar je razvidno s Slike 3. Boljši vpogled v način njihove razporeditve dobimo s primerjavo povprečnega masnega indeksa taksona na vseh odsekih reke (MMT) in povprečnega masnega indeksa na odsekih, kjer se vrsta pojavlja (MMO; Slika 5). Podobni vrednosti pomenita, da se vrsta na odsekih reke pojavlja dokaj enakomerno, medtem ko velika razlika nakazuje na gručasto porazdelitev vzdolž reke.

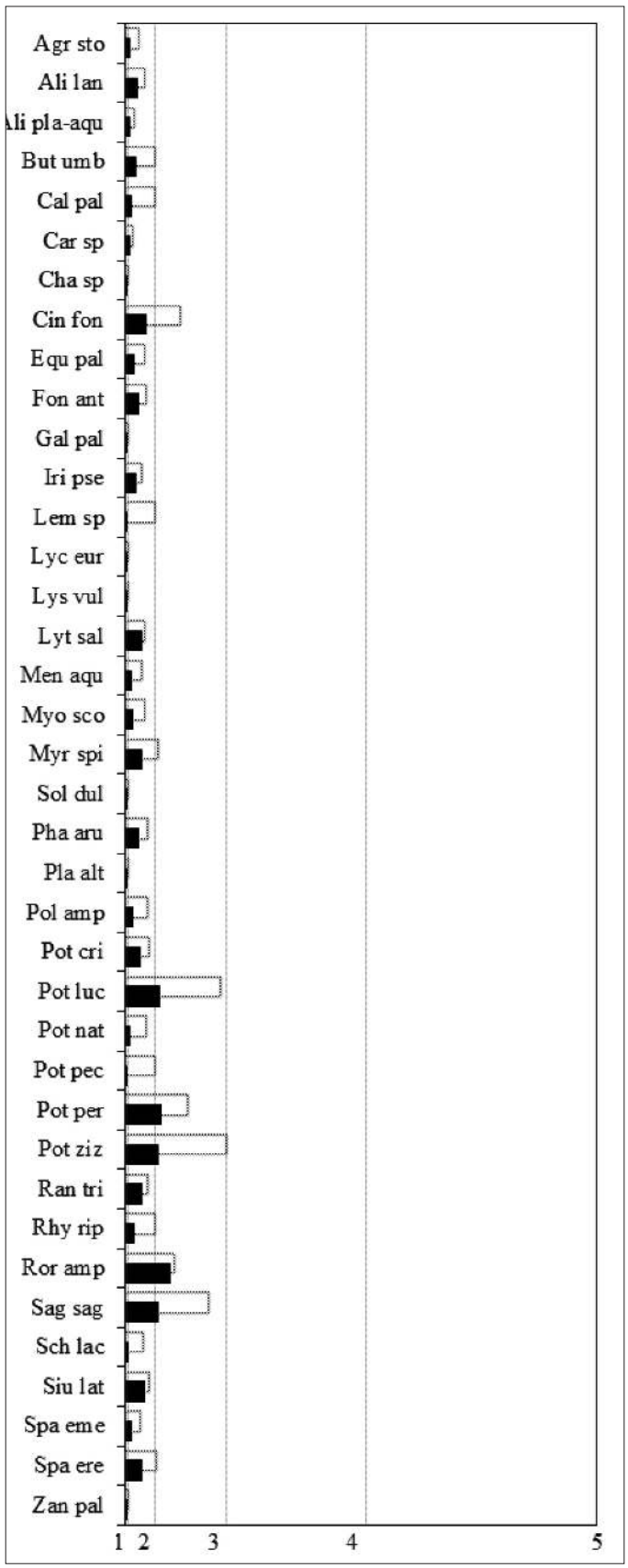
Razlike med MMT in MMO so bile pri taksonih, prisotnih v reki Rak, večinoma majhne. To pomeni, da se ti vzdolž reke pojavljajo precej enakomerno. Večje razlike, ki nakazujejo na gručasto razporeditev, je opaziti predvsem pri vrsti *Potamogeton lucens* in križancu *Potamogeton* x *zizii,* pa tudi vrstah *Cinclidotus fontinaloides*, *Potamogeton perfoliatus* in *Sagittaria sagittifolia* (Slika 5).

Delež reke, na katerem so bili prisotni posamezni taksoni, je razviden iz Slike 6.

Večina zaznanih taksonov (70 %) se je pojavila v manj kot 50 % reke. Na največ odsekih reke so se pojavljale vrste *Rorippa amphibia*, *Lythrum salicaria* in *Sium latifolium*, na najmanjšem deležu reke pa taksoni *Lemanea* sp., *Potamogeton pectinatus*, *Lysimachia vulgaris* in *Zannichellia palustris* (Slika 6).

Slika 7 prikazuje relativno abundanco taksonov v reki Rak.

Največjo relativno rastlinsko abundanco je imela vrsta *Rorippa amphibia* (10 %), sledile so ji *Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton lucens*, *Sagittaria sagittifolia* in *Potamogeton* x *zizii* (vsi od 7 % do 8 %). Najmanjšo relativno rastlinsko abundanco sta imeli vrsti *Lysimachia vulgaris* in *Zannichellia palustris* (<<1 %). Vrsti *Potamogeton natans* in *Potamogeton pectinatus* sta se v primerjavi z ostalimi dristavci pojavljali v precej manjšem deležu (približno 1 %).

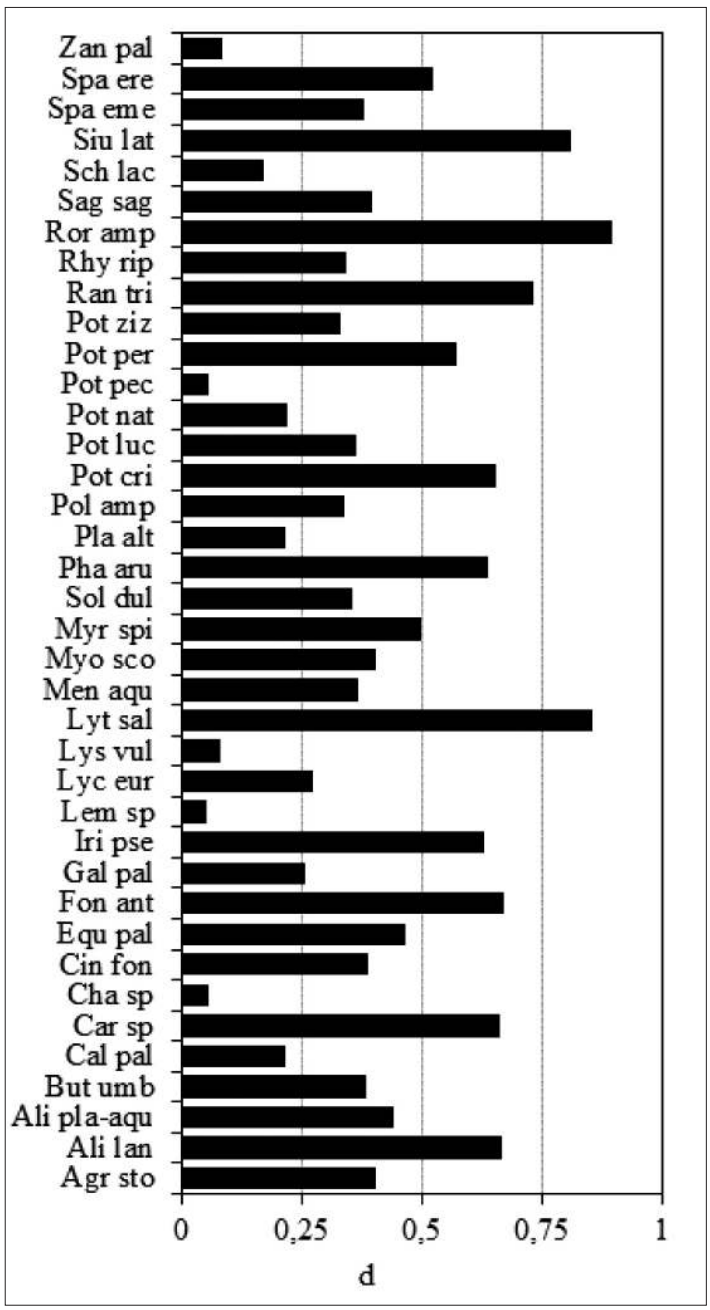


Slika 5: Povprečni masni indeks posameznega taksona. Črni stolpci prikazujejo povprečni masni indeks vrste v celotni reki (MMT), beli stolpci pa povprečni masni indeks v odsekih, kjer je posamezna vrsta prisotna (MMO).
Figure 5: Mean mass index of each taxon. Black bars indicate the mean mass index of a species in the whole river (MMT), whereas the white bars indicate the mean mass index of a species in the sections where it is present (MMO).

Uvrstitev rečnih odsekov v enega od petih RCE kakovostnih razredov (po prirejeni RCE metodi) in v enega od petih razredov ekološkega stanja s pomočjo indeksa rečnih makrofitov (RMI)

S pomočjo prirejene RCE metode (Petersen 1992) smo zgornjih deset rečnih odsekov reke Rak uvrstili v I. RCE kakovostni razred, preostalih pet pa v II. RCE kakovostni razred (Slika 8, Preglednica 4), kar kaže na zelo dobro oz. odlično stopnjo ohranjenosti reke. Na podlagi indeksa rečnih makrofitov (RMI; Kuhar s sodelavci 2011) smo 14 izmed 15 odsekov reke Rak uvrstili v razred "zelo dobro", enega (devetega po vrsti) pa v razred "dobro" ekološko stanje (Preglednica 4).

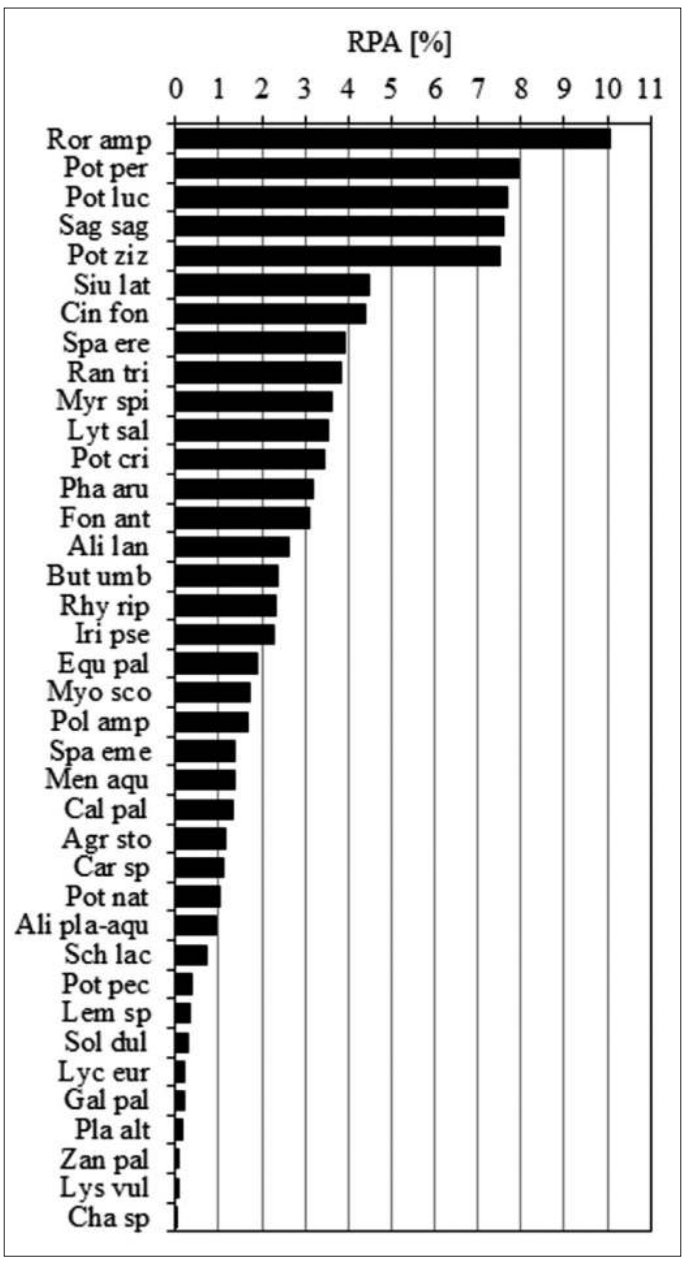
Ocena po prirejeni RCE metodi kaže na odlično ekomorfološko ohranjenost zgornjih devetih odsekov ter zelo dobro ohranjenost spodnjih šestih odsekov reke Rak. Prvi RCE kakovostni razred ponazarjamo z modro, drugi pa z zeleno barvo (Slika 8). Ob metabolizmu ogljika prihaja do obarjanja kalcijevega karbonata na površini rastlin, kar je razvidno s Slike 9.



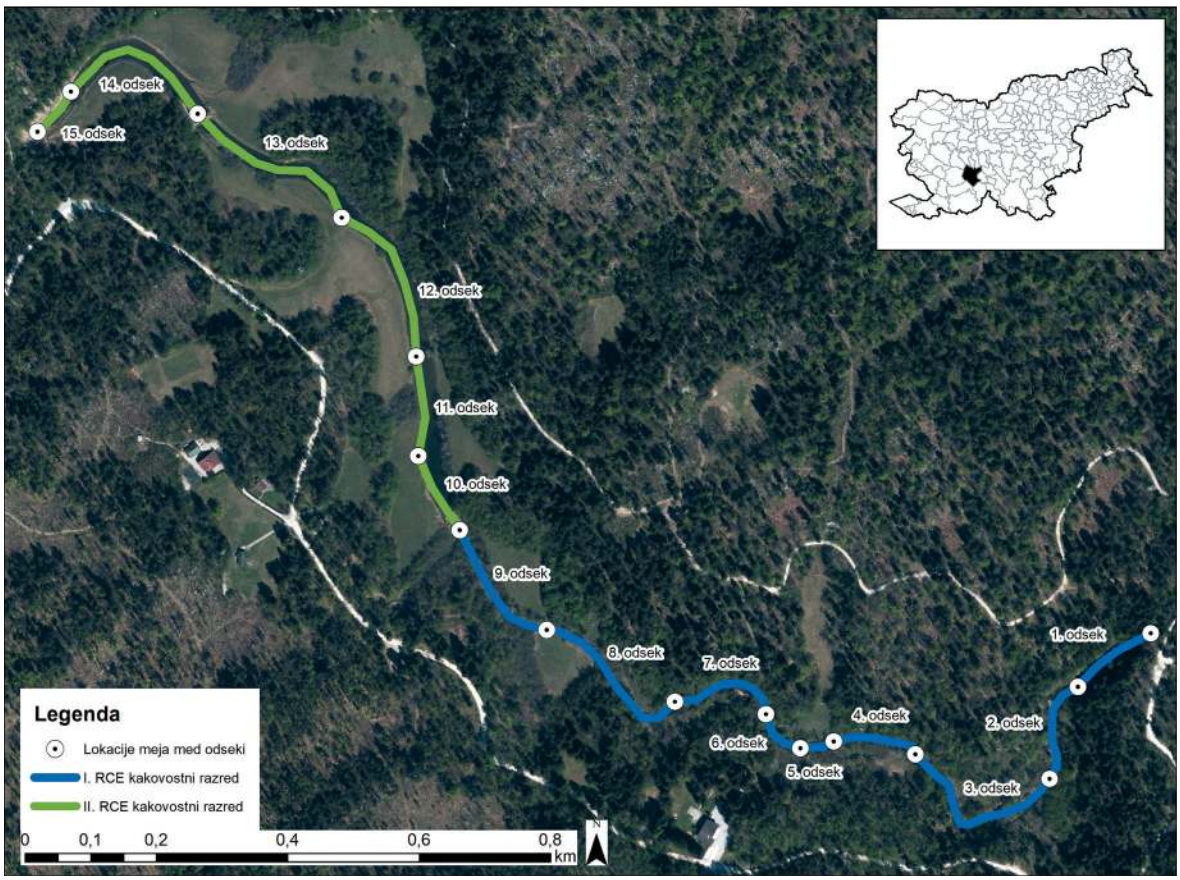
Slika 6: Pojavljanje taksonov v pregledanih odsekih reke Rak. Vrednost 1 pomeni, da se je takson pojavljal vzdolž celotne reke, medtem ko vrednost 0,5 pomeni, da se je pojavljal v polovici pregledanih odsekov reke.
Figure 6: Occurence of plant taxa in the surveyed sections of the Rak River. A value of 1 indicates that a taxon occurred along the entire river, whereas the value of 0.5 indicates that a taxon only occurred in half of the river sections surveyed.

Preglednica 4: Uvrstitev rečnih odsekov v razrede ekološkega stanja (ZD - zelo dobro, D - dobro) ter uvrstitev odsekov v RCE kakovostne razrede.
Table 4: Classification of the river sections to ecological classes (ZD - very good, D - good) and RCE quality classes.

Št. odseka	Ekološko stanje	RCE kakovostni razred	Št. odseka	Ekološko stanje	RCE kakovostni razred
1	ZD	I	9	D	I
2	ZD	I	10	ZD	II
3	ZD	I	11	ZD	II
4	ZD	I	12	ZD	II
5	ZD	I	13	ZD	II
6	ZD	I	14	ZD	II
7	ZD	I	15	ZD	II
8	ZD	I			



Slika 7: Relativna rastlinska abundanca (RPA) posameznega taksona - razmerje abundance posameznega taksona (ocenjena z lestvico od 1 do 5), glede na celokupno pojavljanje vseh taksonov v reki.
Figure 7: Relative plant abundance (RPA) of each taxon - the ratio between the abundance of each taxon (rated on a scale from 1 to 5) and the total occurrence of all taxa in the river.



Slika 8: Uvrstitev posameznih odsekov reke Rak v RCE kakovostne razrede. Vir podlage: MKGP 2022.
Figure 8: Classification of individual river sections of the Rak River into RCE quality classes. Layer source: MKGP, 2022.



Slika 9: Obarjanje kalcijevega karbonata pri kodravem dristavcu (Potamogeton crispus; levo) in parožnici (Chara sp.; desno).
Figure 9: Calcium carbonate precipitation on curly-leaved pondweed (Potamogeton crispus; left) and stonewort (Chara sp.; right).

DISKUSIJA

V strugi reke Rak smo zabeležili skupno 38 taksonov makrofitov, izmed katerih je 11 vrst semenk uvrščenih na Rdeči seznam ogroženih semenk in praprotnic (Uradni list RS - 82/2002, Uredbeni del) kot ranljive vrste. Slednje ogrožajo predvsem antropogeni vplivi, ki spreminjajo strukturo in funkcijo ekosistemov, posledično pa negativno vplivajo na pestrost makrofitskih združb in vrstno sestavo (Germ, Kuhar & Gaberščik 2016). Število taksonov je primerljivo z izsledki preteklih raziskav, opravljenih na reki Rak, kar nakazuje, da med leti ni prišlo do večjih sprememb ekomorfoloških dejavnikov, ki bi vplivali na pestrost makrofitov. Gojznikar in sodelavci (2019) so leta 2019 v strugi reke Rak popisali 37 taksonov, Lampret in sodelavci (2020) pa leto kasneje 38 taksonov, od tega je bilo 32 taksonov popisanih v vseh treh letih. Razlike med popisi so najverjetneje posledica naravne dinamike vegetacije, ki je v potokih običajno intenzivna, saj gre za naravno motene ekosisteme, v katerih se razpoložljivi habitati nenehno ustvarjajo in uničujejo zaradi motenj, povezanih z vodnim tokom (Grīnberga 2011) in spreminjanjem gladine vode, ki je značilnost kraških rek. V letu 2021 smo v reki Rak prvič zabeležili pojavljanje vrste *Zannichellia palustris,* za katero je značilno uspevanje v vodah z nizko slanostjo (5 – 10 %) (Barnabas s sodelavci 2001).

Uspevanje makrofitov poleg biotskih pogojujejo številni abiotski dejavniki, izmed katerih so najpomembnejši hitrost vodnega toka, kakovost substrata, svetlobne razmere in vsebnost hranil (Grīnberga 2011; Kuhar s sodelavci 2011; Germ s sodelavci 2021). Iz prikaza razporeditve in abundance makrofitov (Slika 3) je razvidno, da se je v reki Rak več taksonov pojavljalo v spodnji polovici reke, obenem pa je bila večja tudi njihova abundanca, kar sovpada z ugodnejšimi ekomorfološkimi razmerami za rast makrofitov. Za razliko od zgornjega dela reke, kjer je bil vodni tok hiter, substrat pa so po večini sestavljale večje skale in kamenje, je bila v spodnjem delu reke hitrost vodnega toka počasnejša, substrat pa droben in primernejši za ukoreninjanje. Nizke do zmerne hitrosti vodnega toka, ki so se v reki Rak pojavljale v drugi polovici, ugodno vplivajo na rast makrofitov, saj povečajo dostopnost hranil. Na hitrost vodnega toka so najbolj občutljivi ukoreninjeni makrofiti, ki jih vodni tok lahko poškoduje, izkorenini ali prekrije s sedimentom (Zelnik s sodelavci 2021). Zasenčenost rečne struge je za razliko od povirnega dela reke Rak, ki ga obdaja gozd, v spodnjem delu omejena zgolj na bregove, kar nudi ugodne razmere za fotosintezno aktivnost vodnih rastlin. Razširitev rečne struge, zmanjšanje hitrosti vodnega toka in nižja stopnja zasenčenosti reke z obrežno vegetacijo so se odražale tudi v razlikah v temperaturi vode; izmerjene vrednosti so se gibale med 16 in 21 °C. Nižje temperature vode smo zabeležili v zgornjem, močno zasenčenem delu reke, višje pa od 8. rečnega odseka dolvodno.

Na vseh odsekih reke smo izmerili visoko električno prevodnost, gre namreč za reko ponikalnico, ki se na svoji poti do Zelških jam, kjer na površje priteče kot reka Rak, že dodobra obogati s hranili. Nihanje vodostaja vpliva na izmenjavo snovi med sedimenti in vodo ter stopnjo mineralizacije, s tem pa količino hranil v vodi (Zelnik s sodelavci 2021). Ker reka teče po karbonatni podlagi, je visoka električna prevodnost verjetno v največji meri posledica visoke vsebnosti karbonatov, delno pa tudi snovi, ki se v reko spirajo s prispevnega območja. V podzemlju je med drugim zmanjšana samočistilna sposobnost reke, obenem pa povečana ranljivost na antropogene vplive (Šraj-Kržič s sodelavci 2006; Zelnik s sodelavci 2021). V času našega vzorčenja je bil vodostaj Cerkniškega jezera v upadanju, kar je najverjetneje doprineslo k višji prevodnosti. Sklepamo, da je zaradi nižanja vodostaja prišlo do mehanskih poškodb rastlin in odmiranja vodnih rastlin, s tem pa do večje dekompozicije odmrle organske snovi, kar bi lahko bil tudi razlog za nižje izmerjene vrednosti pH v spodnjem delu reke. V zgornjem delu reke (rečnih odsekih od 1 do 9) smo izmerili višje prevodnosti (med 481 in 510 µS/cm) kot v spodnjem delu (rečni odseki od 10 do 15; razpon meritev od 371 do 405 µS/cm). Na Sliki 2e opazimo, da je prevodnost najbolj upadla med 9. in 10. odsekom. Vzrok za to je bil najverjetneje povečan privzem hranil s strani makrofitov (višja fotosintezna učinkovitost zaradi manjše zasenčenosti rečne struge), pa tudi obarjanje karbonata zaradi intenzivne fotosintezne aktivnosti makrofitov (Slika 9). Prav tako se po 10. odseku rečna struga razširi, poveča se količina vode, kar pripomore k redčenju snovi (med drugim hranil) v vodi, posledično pa nižji prevodnosti. Na visoko vsebnost hranil v vodi kažejo tudi prisotne rastlinske vrste. Znano je, da vrste *M. spicatum*, *S. emersum*, *P. lucens*, *P. crispus* in *P. perfoliatus* najbolje uspevajo v vodah z zmerno do visoko vsebnostjo hranil, vrsti *P. natans* in *R. trichophyllus* pa v vodah z zmerno vsebnostjo hranil (Haslam 1987; Preston 2003; Šraj Kržič s sodelavci 2006). Vrste *P. pectinatus*, *M. spicatum* in *S. erectum* agg. so med drugim indikatorji evtrofnih voda (Preston 2003; Germ s sodelavci 2021). Podobno velja za nitaste alge, katerih prisotnost smo zabeležili na 11. odseku reke.

V preteklosti je bilo ugotovljeno, da se izrazito senčenje reke odraža v odsotnosti submerznih potopljenih makrofitov. Raziskave vpliva senčenja obrežne vegetacije na vodne rastline so pokazale izrazito prevlado rasti vodnih rastlin na manj zasenčenih oziroma nesenčenih predelih, visoka intenziteta svetlobe namreč spodbuja rast potopljenih makrofitov in omogoča višjo stopnjo fotosinteze (Ali, Hassan & Shaheen 2011). Med drugim je bilo ugotovljeno, da so v presihajočih rekah submerzni makrofiti omejeni na predele, kjer se voda zadržuje dovolj dolgo, da lahko rastline zaključijo svoj življenjski cikel (Kržič-Šraj s sodelavci 2006). Na Sliki 3 lahko opazimo pojavljanje potopljenih makrofitov (*P. lucens*, *P. perfoliatus*, *P.* x *zizii*, *M. spicatum*) v spodnjem delu reke, kjer so poleg počasnejšega vodnega toka in večje globine vode tudi ugodne svetlobne razmere, kar je v skladu s podatki iz literature. V reki Rak so med submerznimi makrofiti sicer prevladovale vrste iz rodu *Potamogeton*. V spodnjem delu smo zabeležili štiri od skupno petih vrst rodu s potopljeno ukoreninjeno rastno obliko, prisotnih v reki Rak (*P. crispus, P. lucens, P. pectinatus* in *P. perfoliatus*), ter križanca med vrstama *P. gramineus* in *P. lucens, Potamogeton* x *zizii*, ki ga na območju Slovenije najdemo le še v reki Obrh (Germ, Kuhar in Gaberščik 2016). Predstavniki rodu *Potamogeton* uspevajo v habitatih s počasnim ali zmernim pretokom in finim substratom, najboljše razmere za njihovo rast pa predstavljajo mezotrofni ali evtrofni vodotoki (Preston 2003). Križanec *P.* x *zizii* se je v reki Rak pojavljal med 11. in 14. odsekom, in sicer skupaj s starševsko vrsto *P. lucens*. Znano je, da *P.* x *zizii* pogosto uspeva v odsotnosti ene ali obeh starševskih vrst (Preston 2003), kar potrjujejo tudi naši izsledki. V preteklih raziskavah je bil v reki Rak poleg *P.* x *zizii* (Germ, Kuhar in Gaberščik 2016) zabeležen tudi *P.* x *salicifoius* (Šraj-Kržič s sodelavci 2006), vendar križanca nikoli nista bila prisotna hkrati. Velika razlika med povprečnim masnim indeksom taksona v celotnem reki (MMT) in povprečnim masnim indeksom v odsekih, kjer se takson pojavlja (MMO), kaže na gručast vzorec razporeditve makrofitov *P. lucens*, *P.* x *zizii* in *S. sagittifollia* (Slika 5).

Večino predstavnikov rodu *Potamogeton*, z izjemo vrste *P. crispus* (kodravi dristavec), smo zabeležili v drugi polovici reke. Za vrsto *P. crispus* je sicer značilna pospešena rast v zgodnji pomladi, ko gozd še ne ozeleni v celoti in je posledično osvetljenost rečne struge večja, obenem pa mu struktura listov omogoča intenzivno fotosintezo tudi v vodah s hitrejšim vodnim tokom (Bolduan s sodelavci 1994), kar pojasnjuje pojavljanje vrste v senčnejših odsekih reke. Na onesnaženje najbolj tolerantna vrsta rodu *Potamogeton* je *P. pectinatus* (Preston 2003), ki smo jo v reki Rak zabeležili le na 11. odseku. Poleg submerznih vrst iz rodu *Potamogeton* smo na rečnih odsekih 9., 11. in 12. zabeležili tudi plavajočo ukoreninjeno vrsto *P. natans*, ki je sicer ekološko najbolj tolerantna vrsta iz rodu *Potamogeton* (Preston 2003).

S Slike 7 lahko razberemo, da je imela najvišjo relativno rastlinsko abundanco (RPA) amfibijska vrsta *Rorippa amphibia*, ki lahko uspešno raste tako v vodi kot na kopnem (na rastiščih z zadostno vlažnostjo). Prisotna je bila na vseh odsekih reke. Vrste z amfibijskim značajem so sicer pomemben sestavni del rastlinskih združb v kraških rekah. Skladno s pričakovanji so bile močno zastopane tudi v reki Rak, kjer smo zabeležili kar 11 vrst. Na Sliki 4 lahko vidimo, da se je delež amfibijskih vrst povečeval po toku navzdol. V prvih petih odsekih reke je delež amfibijskih vrst v povprečju znašal 26 %, v zadnjih petih pa 31 %. Visoka sposobnost regeneracije in razširjanja amfibijskih vrst predstavlja izrazito prednost v presihajočem vodnem sistemu (Šraj-Kržič s sodelavci 2006), zato ni presenetljivo, da smo največji delež vrst z amfibijskim značajem zabeležili v spodnjem delu reke, kjer se pojavljajo najbolj izrazita nihanja vodostaja in občasne presušitve. Poleg vrste *Rorippa amphibia* so visoko relativno rastlinsko abundanco dosegale še vrste *P. perfoliatus*, *P. lucens*, *S. sagittifolia*, *P.* x *zizii* in *S. latifolium*.

V nasprotju z izsledki raziskave Germ s sodelavci (2019), opravljeni na reki Ljubljanici *s. str.*, kjer je vrsta *Sparganium emersum* prevladovala v zasenčenih delih, smo v reki Rak vrsto zabeležili v spodnjem, bolj osončenem delu reke (od vključno 9. odseka dolvodno, z izjemo 12. odseka). Podobno kot v omenjeni študiji se je vrsta pojavljala v združbah s številnimi drugimi vrstami makrofitov, kar kaže na visoko fenotipsko plastičnost vrste (Germ s sodelavci 2019). V prvem delu reke, na rečnih odsekih od 2 do 9, smo zabeležili tudi vrsto *Sparganium erectum* agg., ki je bila na petem pregledanem odseku prisotna z visoko abundanco (4). Vrsti *S. emersum* in *S. erectum* agg. se med seboj razlikujeta v habitatnih zahtevah; prvo običajno najdemo v globljih vodah kot slednjo (Newman 2005), kar sovpada z razporeditvijo v reki Rak.

Znano je, da pH in z njim povezani dejavniki odločilno vplivajo na pestrost makrofitov. Pretekle raziskave so med drugim pokazale nižjo pestrost makrofitov v rekah s pH vrednostmi nad 8,4 (oz. v nekaterih primerih celo 8). Slednje naj bi bilo povezano s fiziološkimi lastnostmi makrofitov, določene vrste vodnih rastlin lahko namreč kot vir ogljika uporabljajo izključno CO_2, ki pa ga je v rekah s pH 8,3 malo - v tem pH območju prevladujejo predvsem bikarbonatni ioni (Germ s sodelavci 2021). Reka Rak teče po karbonatni

podlagi, zato so bile rahlo bazične vrednosti, ki smo jih namerili vzdolž celotnega reke, v skladu s pričakovanji. Karbonatna podlaga obenem blaži intenzivna nihanja pH, ki bi se sicer pojavljala zaradi intenzivne fotosinteze organizmov v dnevnem in prevlade respiracije v nočnem času. Na rečnih odsekih od 1 do 9 smo izmerili zelo podobne vrednosti pH (med 8,1 in 8,3), na 10. odseku pa se je vrednost pH znižala na 7,5 in se v nadaljnjih odsekih gibala med 7,1 in 7,8. Nižje izmerjene vrednosti pH v drugem delu reke bi lahko bile posledica dekompozicije in manjše abundance mahov, ki so sicer prevladovali v zgornjem delu reke. Znano je namreč, da mahovi kot vir ogljika iz vode privzemajo CO_2, s tem pa vplivajo na dvig pH.

Z izjemo 10. odseka (76 %) je nasičenost s kisikom zaradi biogenega prezračevanja vzdolž celotne reke presegala 100 % (izmerjene vrednosti od 103 % do 134 %). Podobno je tudi pri meritvah koncentracije raztopljenega kisika izstopalo merilno mesto 10, na katerem smo izmerili najnižjo vrednost (7,1 mg/L). Vrednosti so se sicer gibale med 9,8 in 12,4 mg/L. Meritve smo na 10. odseku izvajali v poznopopoldanskem času (okoli 19. ure) na delno zasenčenem delu struge, zato sklepamo, da je zaradi nizke intenzitete svetlobe poraba kisika v vodi zaradi respiracije organizmov že presegala njegovo produkcijo. Ker so v vodnih okoljih prisotna dnevna in dnevno nočna nihanja koncentracij kisika, bi bilo za boljšo primerljivost rezultatov meritve smiselno opraviti na vseh odsekih ob istem času oz. pri interpretaciji upoštevati tudi čas merjenja.

S pomočjo prirejene RCE metode smo zgornjih deset odsekov reke Rak uvrstili v 1. RCE kakovostni razred, ostale pa v 2. RCE kakovostni razred, kar kaže na zelo dobro ali odlično stopnjo ohranjenosti reke. Razlika je verjetno v največji meri posledica različnih razmer v zaledju reke; povirni del reke namreč obdaja gozd, v spodnjem delu pa za obrežnim pasom večinoma prevladujejo košeni travniki, ki ponekod segajo čisto do struge, kar je razvidno tudi z ortofoto posnetka na Sliki 8. Na podlagi indeksa rečnih makrofitov (RMI) smo 14 izmed 15 odsekov reke Rak uvrstili v razred "zelo dobro", enega (devetega po vrsti) pa v razred "dobro" ekološko stanje. Razlike v končni uvrstitvi odsekov glede na izbrano metodo oz. indeks so minimalne. RMI temelji na uvrstitvi makrofitskih taksonov v 5 ekoloških skupin, ki odražajo stanje (delež naravnih območij) v zaledju rek in trofičnost vode, kjer se pojavljajo. Iz računa so izločene vrste s široko ekološko valenco (nizko indikatorsko vrednostjo) (Kuhar s sodelavci 2011). Prirejena RCE metoda zajema dvanajst lastnosti, ki opisujejo strukturo zaledja, obrežnega pasu in struge reke (Petersen 1992). K razlikam v končnih seštevkih, ki so prvih devetih odsekov uvrstili v prvi, vse nadaljnje odseke pa v drugi RCE kakovostni razred, so v največji meri pripomogle razlike v ekomorfoloških dejavnikih – rabi tal za obrežnim pasom, širini obrežnega pasu (od roba reke do kmetijskih površin), sklenjenosti vegetacije v obrežnem pasu ter v manjši meri tudi različna sestava detrita.

Visoka stopnja ohranjenosti reke Rak je verjetno posledica izrazitega nihanja vodostaja, ki povečuje heterogenost habitatov, obenem pa povzroča pogoste poplave, ki preprečujejo oz. omejujejo človekove posege v prispevnem območju reke.

ZAKLJUČKI

Kraška reka Rak se je glede na prirejeno RCE metodo (Petersen 1992) in indeks RMI (Kuhar s sodelavci 2011) izkazala kot dobro ohranjen rečni ekosistem. Na podlagi prve metode smo gorvodni del (približno polovico) reke uvrstili v najvišji RCE kakovostni razred ("odlično"), preostali (dolvodni) del pa v drugi RCE kakovostni razred ("zelo dobro"). Na podlagi indeksa RMI smo vse odseke reke, z izjemo devetega po vrsti, uvrstili v zelo dobro ekološko stanje. Izmed 38 taksonov makrofitov smo zaznali prisotnost enajstih taksonov, ki so uvrščeni na Rdeči seznam ogroženih praprotnic in semenk, kar potrjuje visoko stopnjo ohranjenosti reke in pomembnost dosedanjega upravljanja ekosistema reke Rak. V naši študiji je bila v tem reki prvič zaznana prisotnost vrste *Zannichellia palustris*.

SUMMARY

Karst is a highly dynamic area strongly intertwined with water activity. The Rak River is an intermittent river flowing through the Rakov Škocjan valley in the heart of the Slovenian karst, measuring approximately two kilometers in length. The water regime in the Rak valley is intimately bound to the regime in Cerkniško

polje. When the lake Cerknica dries up, the part of the Rak River extincts too. Aquatic vegetation in the river is well adapted to high fluctuations of water level and therefore very vulnerable to human disturbances.

In the present study, we investigated macrophyte presence, distribution, and abundance and their possible correlation with the measured physical and chemical parameters of water. We also evaluated the ecological status of the river and assessed ecomorphological parameters of the river ecosystem. The field work was carried out at the end of June 2021. We divided the Rak river into 15 sections based on their distinctiveness. In every section (measuring between 50 m and 289 m in length) we investigated the physical and chemical parameters (water temperature, pH, dissolved oxygen concentration, oxygen saturation, conductivity) and macrophyte presence, distribution, and abundance. With the use of RMI (River Macrophyte Index) we assessed the ecological status in each section of the river and according to modified RCE method (*A Riparian, Channel, and Environmental Inventory*) we assessed ecomorphological parameters of the river ecosystem.

We concluded that the Rak river is a very dynamic system highly heterogeneous in time and space. The measurements of the physical and chemical parameters revealed a small increase of water temperature along the river (from 16°C to 21°C), pH that ranged from approximately 8 to 8,5 in sections 1-9 and lowered to approximately 7 in the downstream sections, and local differences of dissolved oxygen concentration, oxygen saturation and electric conductivity. The latter three could be slightly biased due to different times at which the measurements were taken throughout the river - the measurement at section 10 was carried out in late afternoon, which means that the photosynthesis level had already decreased. As a consequence, we observed lower production of oxygen and lower pH. The electric conductivity of water was very high throughout the river, ranging from 365 µS/cm to 515 µS/cm, significantly lowering after section 9. Since the substratum is calcareous, the river contains high levels of carbonate ions which increase water conductivity (and pH). During the time of the study (in late June) the adjacent water bodies (eg. lake Cerknica) were experiencing a steady decline in water levels, which in turn meant an increase in organic decomposition resulting in an increase of nutrient concentration in water, thus also increasing the conductivity of water. The observed decrease in water conductivity between sections 9 and 10 might be associated with a higher number of detected plant taxa and their abundance compared to the upstream sections, as plants effectively take up nutrients from the water.

We detected 38 taxa of macrophytes which differ in distribution and abundance throughout the Rak River. More macrophyte taxa were present in the downstream part of the river (after section 9 or section 10) than in the upstream sections. Plants from the *Potamogeton* genera were only present in the downstream half of the river with the exception of *Potamogeton crispus*. *Rorippa amphibia* was the most commonly detected taxon; we detected its presence in all sections of the river. Common taxa also included *Lythrum salicaria* and *Sium latifolium*. In the study, *Zannichellia palustris* was recorded in the Rak river for the first time. Distribution of present taxa throughout the river was quite even, with the exception of *Potamogeton lucens*, *Potemogeton* x *zizii*, *Cinclidotus fontinaloides*, *Potamogeton perfoliatus*, and *Sagittaria sagittifolia*, which appeared more or less clustered. Most of the detected taxa (70%) were present in less than 50% of the river which is related to the high heterogeneity and dynamics of the ecosystem. Species with the highest relative plant abundance was *Rorippa amphibia* (10 %), followed by *Potamogeton perfoliatus*, *Potamogeton lucens*, *Sagittaria sagittifolia*, and *Potamogeton* x *zizii* (all ranging from 7% to 8%).

Aquatic and semiaquatic plants play an important role in river ecosystems (Ebke et al. 2013), influencing their structure and function (Baattrup-Pedersen & Riis 1999; Blindow et al. 2002) and forming a link between water and sediment. Macrophytes influence morphological, physical and chemical characteristics of aquatic ecosystems and play a significant role in increasing habitat diversity. They influence water velocity, stabilize the banks, provide protection for invertebrates and fish, and serve as a substrate for epiphytes. They play an important role in energy flow and nutrient cycling, consuming large quantities of dissolved nutrients (phosphorus and nitrogen compounds) and producing oxygen which allows the water to aerate and therefore enable faster decomposition. As such, they can serve as important water and sediment quality indicators (Haslam 1987; Carbiener et al. 1990).

The ecomorphological assessment using modified RCE methods revealed that the Rak River is in an excellent (I. RCE quality class; sections 1-9) or very good condition (II. RCE quality class; sections 10-15). In addition, according to RMI, we classified it to "very good" (all sections except one) and "good" ecological status (section 9). 11 (out of a total of 38) detected taxa in the Rak River are listed as vulnerable (marked with »V«) on the Slovenian Red list of threatened pteridophytes and seed plants, which increases the importance of conservation and management of the karstic river Rak ecosystem.

ZAHVALA

Za pomoč pri izvedbi terenskega dela se iskreno zahvaljujemo Blažu Kekcu, Anžetu Nemcu in Mateju Holcarju. Raziskavo je financirala Agencija za raziskovalno dejavnost Slovenije, Raziskovalni program Biologija rastlin (P1-0212).

LITERATURA

Ali, M. M., Hassan, S. A., Shaheen, A-S M., 2011: Impact of Riparian Trees Shade on Aquatic Plant Abundance in Conservation Islands. Acta Bot. Croat. 70 (2): 1847-8476.

Baattrup–Pedersen, A., Riis, T., 1999: Macrophyte diversity and composition in relation to substratum characteristics in regulated and unregulated Danish streams. Freshwater Biol. 42(2): 375–385.

Barnabas A., Jimmy, R., Govender, K., Przybyłowicz, W. J., Mesjasz-Przybyłowicz, J., 2001:. Effects of Varying Salinity on Leaf Ultrastructure of *Zannichellia palustris*. Microscopy and Microanalysis 7(S2): 62-63.

Blindow, I., Hargeby, A., Andersson, G., 2002: Seasonal changes of mechanisms maintaining clear water in a shallow lake with abundant *Chara* vegetation. Aquat. Bot. 72(3-4): 315–334.

Bolduan, B. R., Van Eeckhout, G., Quade, H. W., Gannon, J. E., 1994:. *Potamogeton crispus* – The Other Invader. Lake and Reservoir Management 10(2): 113-125.

Bonacci, O., Željković, I., Galić, A., 2012: Karst Rivers' Particularity: an Example From Dinaric Karst (Croatia/ Bosnia and Herzegovina). Environmental Earth Sciences 70: 963–974.

Carbiener, R., Trémolières, M., Mercier, J.L., Ortscheit, A., 1990: Aquatic macrophyte communities as bioindicators of eutrophication in calcareous oligosaprobe stream waters (Upper Rhine plain, Alsace). Vegetatio, 86(1): 71–88.

Ebke, K.P., Felten, C., Dören, L., 2013: Impact of heterophylly on the sensitivity of *Myriophyllum aquaticum* biotests. Sciences Europe 25(6).

European Commission. E.C. 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. Available online: https:// eur-lex.europa. eu/eli/dir/2000/60/oj (accessed on 19 October 2021).

Ferk, M., Stepišnik, U., 2011: Geomorfološke značilnosti Rakovega Škocjana/ Geomorphological Characteristics of Rakov Škocjan. Ur. Drago Kladnik, Drago Perko. Ljubljana, Geografski inštitut Antona Melika ZRC SAZU: 70 str.

Gams, I., 2003: Kras v Sloveniji v prostoru in času. Postojna, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU

Germ, M., Janež, V., Gaberščik, A., Zelnik, I., 2021: Diversity of Macrophytes and Environmental Assessment of the Ljubljanica River (Slovenia). Diversity 13(6): 278.

Germ, M., Kuhar, U., Gaberščik, A., 2016: Abundance and Diversity of Taxa Within the Genus *Potamogeton* in Slovenian Watercourses. V: Natural and Constructed Wetlands. Springer International Publishing. Cham, Switzerland: 283–291.

Gojznikar, J., Fon Mervič, L., Kepec, M., Kraševec, R., Plaznik, D., Germ M., 2019: Razporeditev in pogostost makrofitov v kraški reki Rak. Hladnikia 44: 53–65.

Grinberga, L., 2011: Environmental factors influencing the vegetation in middle-sized streams in Latvia. Ann. Bot. 1: 37–44.

Haslam, S.M., 1987: River Plants of Western Europe. The macrophytic vegetation of watercourses of the European Economic Community. Cambridge, New York, New Rochelle, Melbourne, Sydney, Cambridge University Press: 512 str.

Kohler, A., 1978: Methoden der Kartierung von Flora und Vegetation von Süßwasserbiotopen. Landschaft und Stadt 10: 73-85.

Kuhar, U., Germ, M., Gaberščik, A., Urbanič, G., 2011: Development of a River Macrophyte Index (RMI) for assessing river ecological status. Limnologica 3(41): 235–243.

Lampret, Ž., Tertinek, Ž., Vodopivec, L., Gabor, M., Aljančič, G., Germ, M., 2020: Kaj pravijo makrofiti na reki Rak? Proteus 83(1): 6-14.

Mršić, N., 1997: Živali naših tal: uvod v pedozoologijo – sistematika in ekologija s splošnim pregledom talnih živali. Ljubljana, Tehnična založba Slovenije

Newman, J., 2005: CEH Information Sheet 19: *Sparganium emersum*. UK Centre for Ecology & Hydrology.

Pall., K., Janauer, G. A., 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.

Pleničar, M., 1963: Guidebook of sheet Postojna, Basic geological map of Yugoslavia 1:100.000. Beograd, Federal Geological Survey of Beograd.

Preston, C.D., 2003: Pondweeds of Great Britain and Ireland. London, Botanical Society of the British Isles.

Stepišnik, U., Repe, B., 2015: Identifikacija vročih točk geodiverzitete na primeru krajinskega parka Rakov Škocjan. Dela 44: 45–62.

Šraj-Kržič, N., Germ, M., Urbanc-Berčič, O., Kuhar, U., Janauer, G.A., Gaberščik, A., 2007: The quality of the aquatic environment and macrophytes of karstic watercourses. Plant Ecology 192(1):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, 2002: Pravilnik o uvrstitvi ogroženih rastlinskih in živalskih vrst v rdeči seznam. Uradni list Republike Slovenije 82/02.

Ur. l. RS, 2002a: Odlok o Notranjskem regijskem parku. Uradni list Republike Slovenije 75/2002: 8330.

Ur. l. RS, 2010: Pravilnik o dopolnitvah Pravilnika o uvrstitvi ogroženih rastlinskih in živalskih vrst v rdeči seznam. Uradni list Republike Slovenije 42/10.

Zelnik, I., Kuhar, U., Holcar, M., Germ, M., Gaberščik, A., 2021: Distribution of Vascular Plant Communities in Slovenian Watercourses. Water 13(08): 1071.

Zupan Hajna, N., Mihevc, A. in Prelovšek, M., 2010: Introduction to the Dinaric Karst. Postojna, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU