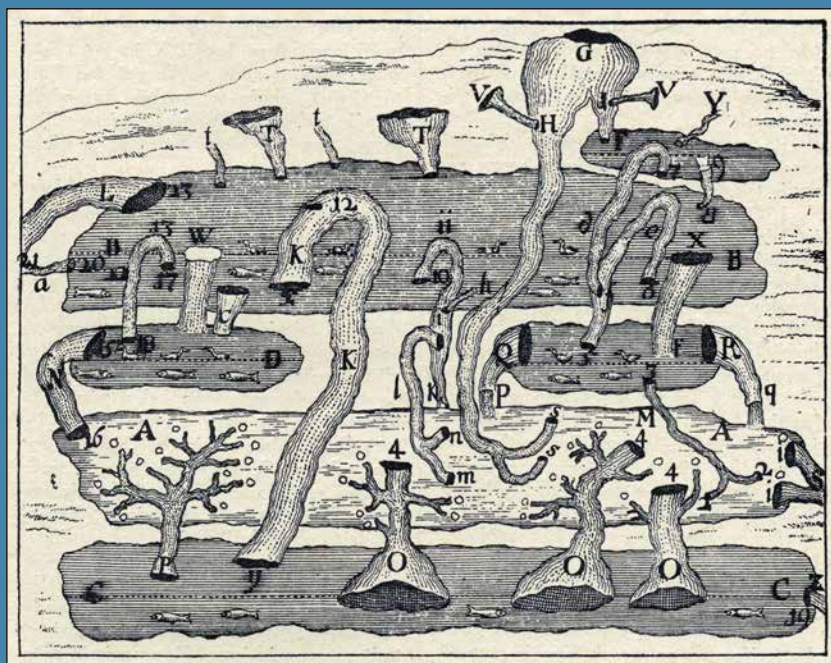




BF

UNIVERZA V LJUBLJANI
Biotehniška fakulteta



PRESIHAJOČE JEZERO

Monografija o Cerkniskem jezeru

Uredila: Alenka Gaberščik
Ljubljana, 2025

PRESIHAJOČE JEZERO

Monografija o Cerkniškem jezeru

Uredila: Alenka Gaberščik



BF

UNIVERZA V LJUBLJANI
Biotehniška fakulteta

Ljubljana, 2025

*Nekateri so ga imenovali Lugeam paludem, nekateri pa, kakor npr. Strabo, Lugeum lacum.
Pri novejših piscih nosi ime Lacus Zirknicensis ali Cerkniško jezero po trgu, ki je tam blizu.
Čeprav je to čudovito jezero mnoge privlačevalo, ga vendar doslej – res čudno – še nihče ni prav
podrobno opisal niti se potrudil, da bi si ga natanko ogledal in po preiskavi spravil na papir.*

Janez Vajkard Valvasor, 1689

Vsebina

Alenka Gaberščik: Knjigi na pot	6
Nataša Ravbar: Pomen in krasoslovne značilnosti Cerkniškega polja	8
Matej Blatnik, Nataša Ravbar, Franci Gabrovšek, Peter Frantar, Mišo Andjelov, Florjana Ulaga: Podnebje v zaledju Cerkniškega polja – splošne značilnosti, trendi in pričakovana dinamika v prihodnosti	23
Matej Blatnik, Nataša Ravbar, Metka Petrič, Franci Gabrovšek, Peter Frantar, Mišo Andjelov, Florjana Ulaga: Hidrološke značilnosti Cerkniškega polja – sezonska in dolgoletna dinamika v količini in kakovosti vode ter vpliv človekovih posegov	41
Alenka Gaberščik in Igor Zelnik: Ekosistem, ki mu vladajo motnje	68
Mateja Germ, Nina Šraj, Mateja Grašič, Matej Holcar, Alenka Gaberščik: Amfibijske rastline – najuspešnejša rastlinska skupina Cerkniškega jezera	86
Alenka Gaberščik in Nik Ojdanič: Navadni trst – prevladujoča rastlinska vrsta Cerkniškega jezera	100
Blaž Koderman, Rok Šturm, Danijel Kablar, Andrej Gogala, Danilo Bevk: Divje čebele Cerkniškega jezera	112
Nik Ojdanič, Nataša Dolinar, Matej Holcar, Dragan Abram, Mateja Grašič, Alenka Gaberščik: Primarna proizvodnja rastlin – osnova delovanja ekosistema	128
Nataša Dolinar, Nina Šraj, Paula Pongrac, Marjana Regvar, Alenka Gaberščik: Glivna kolonizacija korenin različnih rastlinskih vrst	146
Alenka Gaberščik, Nataša Dolinar, Mateja Grašič, Katarina Vogel-Mikuš, Matevž Likar: Razgradnja rastlinskega opada na presihajočem jezeru	164
Matevž Likar, Mateja Grašič, Alenka Gaberščik: Mikrobne združbe na opadu navadnega trsta v različnih razmerah	174
Nik Ojdanič, Katja Klančnik, Primož Gnezda, Igor Zelnik, Aleksandra Golob, Alenka Gaberščik: Optične lastnosti rastlin – od vrste do ekosistema	183
Nik Ojdanič, Mateja Germ, Matej Holcar, Igor Zelnik, Aleksandra Golob: Vpliv košnje na trstišča Cerkniškega jezera	204
Rudi Kraševac in Jošt Stergaršek: Izzivi upravljanja mokriščnih habitatov	218
Tomaž Jančar, Jošt Stergaršek, Rudi Kraševac: Izzivi ohranjanja kosca (<i>Crex crex</i>) na Cerkniškem jezeru	229
Mateja Germ, Aleksandra Golob, Urša Remic, Vekoslava Stibilj: Vpliv zaledja izbranih pritokov Cerkniškega jezera na koncentracijo selena v vodnem jetičniku	256
Viri poimenovanja organizmov	266
Mnenja strokovnjakov	267
Zahvala	272
Seznam avtorjev	273

Knjigi na pot

Triindvajset let je že minilo, odkar je ugledala luč sveta prva znanstvena monografija o Cerkniškem jezeru z naslovom Jezero, ki izginja. V njej je zbran velik del tedanjega védenja o Cerkniškem jezeru, od podnebnih, hidroloških in geoloških značilnosti, preko rastlinstva in različnih živalskih skupin, do naravovarstvenih, etnoloških in arheoloških posebnosti območja. Monografija je razkrila veliko biotsko pestrost in številne posebnosti tega edinstvenega sistema. Po več kot dveh desetletjih novih raziskav se dobro zavedamo, da Cerkniško jezero ni le posebnost v svetovnem merilu (o čemer priča tudi njegova uvrstitev na seznam Ramsarskih lokacij) in ekosistem, ki je zaradi presihanja buril domišljijo lokalnih prebivalcev in raziskovalcev v zgodovini, temveč tudi, da so izsledki raziskav tega ekosistema zelo aktualni in nas lahko marsikaj naučijo.

Živimo v času, ko se naše okolje globalno spreminja. Vse pogostejše smo priča skrajnim dogodkom, kot so suše in poplave, ki močno spreminjajo zgradbo in delovanje tako kopenskih kot tudi vodnih ekosistemov. Ekosistem Cerkniškega jezera oblikujejo skrajne spremembe vodostajev, zato lahko služi tudi kot model, na podlagi katerega je mogoče razbrati obseg in težnje spreminjanja zgradbe in delovanja drugih vodnih ekosistemov, ki so danes izpostavljeni skrajnim hidrološkim dogodkom. Kot model za razumevanje sprememb v drugih ekosistemih pa lahko služijo tudi nekatere vrste, ki domujejo na Cerkniškem jezeru, kot je kozmopolitska vrsta navadni trst, ki je razširjena po večini celin. Zanimive so tudi nekatere skupine organizmov, kot so na primer rastline z amfibijskim značajem, ki so zaradi velike fenotipske plastičnosti zelo uspešne ob spremembah vodostajev in so primerne za kolonizacijo motenih vodnih ekosistemov. Poleg obravnave Cerkniškega jezera kot modelnega sistema želimo z novo monografijo povečati tudi poznavanje različnih taksonomskih in ekoloških skupin organizmov in razumevanje delovanja tega edinstvenega ekosistema ter predstaviti povezave in povratne zveze med gradniki ekosistema in različnimi vplivi. Obenem želimo nakazati smer spreminjanja nekaterih pomembnih gradnikov ekosistema in procesov v povezavi z razmerami v okolju, predstaviti analizo nekaterih vidikov gospodarjenja in spodbuditi nadaljnje raziskave tega ekosistema. Pričujoča monografija bo Cerkniško jezero približala ljudem, zbrani izsledki pa bodo služili tudi kot osnova za gospodarjenje z njim. Monografija je pomembna tudi za razvoj slovenske znanstvene terminologije, saj obravnava področje, ki je razmeroma slabo raziskano.

Monografija je sestavljena iz treh delov. V prvem delu se bralec seznani s krasoslovnimi značilnostmi jezera in klimatskimi razmerami na širšem območju ter s hidrološkimi značilnostmi Cerkniškega polja. Sledi predstavitev značilnosti ekosistema, nekaterih taksonomskih in ekoloških skupin organizmov in ekosistemskih procesov, kot so primarna proizvodnja in razgradnja opada, ter interakcij med organizmi, kot je glivna kolonizacija rastlinskih korenin v odnosu do sprememb vodostaja. V okvir drugega dela sodi tudi predstavitev spektralnih lastnosti različnih ravni vegetacije od vrstne do ekosistemske, ki so izhodišče za ugotavljanje lastnosti listov različnih vrst in za vrednotenje dinamike rasti in vitalnosti vegetacije. V zadnjem delu so predstavljeni nekateri naravovarstveni in okoljevarstveni vidiki in ukrepi (npr. izzivi upravljanja kosca in mokriščnih habitatov, košnja trstišč in selen v vodnih rastlinah kot kazalnik obremenjenosti vodotokov s kmetijskimi odplakami).

Pri raziskavah smo sodelovali tako uveljavljeni raziskovalci kot tudi študentje različnih ravni študija od diplomantov do magistrandov in doktorandov, ki so s svojo srčnostjo, radovednostjo, inovativnostjo in trdim delom pomembno doprinesli k poznavanju Cerkniškega jezera in s

»pomočjo« Cerknškega jezera tudi zaključili svoj študij. Rezultat raziskav so številni znanstveni članki v uglednih tujih znanstvenih revijah, kot so Ecological Complexity, Aquatic Botany, Plant Ecology, Plants, Hidrobiologia in Ecological Engineering ter poglavja v znanstvenih knjigah znanih založb, kot sta Backhuys Publishers in Springer. Različne prispevke o Cerknškem jezeru smo objavili tudi v domačih znanstvenih, strokovnih in poljudnih revijah. Monografija povzema in nadgrajuje obstoječe objavljene in dodaja neobjavljene izsledke o Cerknškem jezeru, ki tako postajajo dostopni slovenski znanstveni, strokovni in drugi javnosti. Daljši angleški povzetki in bogat slikovni material omogočajo seznanjanje z bistvenimi izsledki tudi tujcem.

Kot urednica knjige sem bila prva, ki sem imela čast »ugledati« vse novo razkrite skrivnosti Cerknškega jezera. Veselim se, da jih lahko delimo z vami.

Alenka Gaberščik

Pomen in krasoslovne značilnosti Cerknškega polja

Nataša Ravbar

Pomen

Cerkniško polje, katerega del je tudi presihajoče Cerknško jezero, je izjemen naravni tako hidrološki kot geomorfološki pojav. Slovi kot tipični primer za nekatere površinske in podzemne kraške pojave, kot so izviri, reke ponikalnice, ponori in estavele ter poplavljanje kraških polj. Posebne naravne značilnosti omogočajo veliko biotsko raznovrstnost živalstva in rastlinstva. Posledično spada Cerknško polje zaradi posebnih geomorfoloških in hidroloških lastnosti ter edinstvenih habitatov med najbolj reprezentativna kraška območja v svetovnem merilu. Poplavljanje polja je tako dolgotrajno in redno, da ga prebivalci obravnavajo kot jezero in je njihovo življenje temu tudi prilagojeno (Kranjc, 1987). Čeprav so si prebivalci naravo polja želeli v preteklih stoletjih tudi podrediti, obdobje osušiti, drugič spet poplaviti, da ne bi nikoli več presahnilo, so se naravni procesi in večina pojavov ohranili.

Cerkniško polje je v preteklih stoletjih vzbujalo pozornost okoliških prebivalcev kot vir mnogih legend in pripovedk ter kot navdih neštetim umetnikom in raziskovalcem. Že od antike so ga opevali mnogi, med njimi Vergil in Dante, in opisovali številni popotniki (Gams, 2004). Njihovo zanimanje sta pritegnila predvsem fenomena presihanja vode na polju in njegova občasna ojezeritev. Zaradi lege ob pomembnih prometnih poteh je Cerknško jezero na zemljevidih označeno že od 15. stoletja. Prvič ga je bolj podrobno opisal J. V. Valvasor, ki si je njegovo delovanje predstavljal na podlagi nateg, ki vodo v jezero dovajajo iz višje ležečih podzemnih votlin. Njegova razlaga je spodbudila, da so nenavadnost jezera opisovali tudi drugi, npr. Steinberg, Nagel in Gruber (Kranjc, 1986).

Zaradi lege in naravnih značilnosti je Cerknško polje privlačno za poselitev in razne gospodarske dejavnosti. Poleg tradicionalno velikega pomena območja za kmetijstvo in ribištvo (Smrekar, 2000) ima presihajoče jezero vse večji pomen v turizmu in kot učilnica v naravi o krasu. Deluje kot naravni zadrževalnik poplavnih voda za območja dolvodno, poleg tega je to območje z bogato pestrostjo pomembnih rastlinskih in živalskih vrst (Kovačič in Ravbar, 2010; Siegel in sod., 2023). Na podlagi večstoletnega proučevanja je bilo Cerknško polje uvrščeno med izjemna in s krasoslovnega vidika pomembna območja klasičnega krasa, to je območja med Ljubljano, Trstom in Reko, od koder izhajajo zgodnji strokovni opisi značilnosti površinskih in podzemnih kraških pojavov v zahodnem svetu in s katerimi se primerjajo drugi kraški pojavi po svetu (Kranjc, 2006).

Da bi lažje razumeli pomen dinamike presihanja in polnjenja jezera ter nanjo vezanih nekaterih tudi redkih habitatnih tipov, prispevek povzema naravnogeografske razmere polja s poudarkom na geomorfoloških, speleoloških, podnebnih, hidroloških in ekoloških značilnostih.

Položaj

Cerkniško polje je del Notranjskega podolja na jugozahodu Slovenije, to je nekaj kilometrov široke nizke in izrazito kraške pokrajine z nizom kraških polj, obdanih z visokimi planotami (Perko in Orožen Adamič, 1998). Pripada območju dinarskega krasa, ki se razteza na zahodnem robu

Balkanskega polotoka in je najobsežnejše kraško območje v Evropi. Značilnost tega območja so kraška polja in slemenitev v smeri severozahod–jugozahod (slika 1A).

Kraška polja Notranjskega podolja si sledijo v tej smeri, imenovani tudi dinarski smeri, od Babnega polja (na 750 m nadmorske višine) na skrajnem jugovzhodu, prek Loškega (575 m), Cerkniskega (550 m) in Planinskega (450 m) do Logaškega polja (475 m) na severozahodu (slika 1B). Polja si stopnjasto sledijo v smeri severozahoda, ki usmerja tudi pretakanje voda z višje proti nižje ležečim poljem. Prečkajo jih med seboj podzemno povezane reke ponikalnice z izviri na eni in ponori na drugi strani, nazadnje pa napajajo izvire reke Ljubljanice.

Cerkniško polje se razteza na približno 70 km² (Žibrik in sod., 1976). Kot je značilno za kraška polja, je tudi Cerkniško v obliki kotanje z ravnim dnom, obdajajo pa ga vzpetine s strmimi pobočji. Njegovo dno leži na nadmorski višini med 546 in 552 m in je malce nagnjeno od jugovzhoda proti severozahodu (Gospodarič in Habič, 1979). Na zahodu in jugu polje zamejujejo Javorniki z Velikim Javornikom (1268 m), Škodovnikom (1257 m) in Bičko goro (1257 m), na vzhodu pa Pokojiško-bloška planota s Slivnico (1114 m) in Racno goro (1140 m).

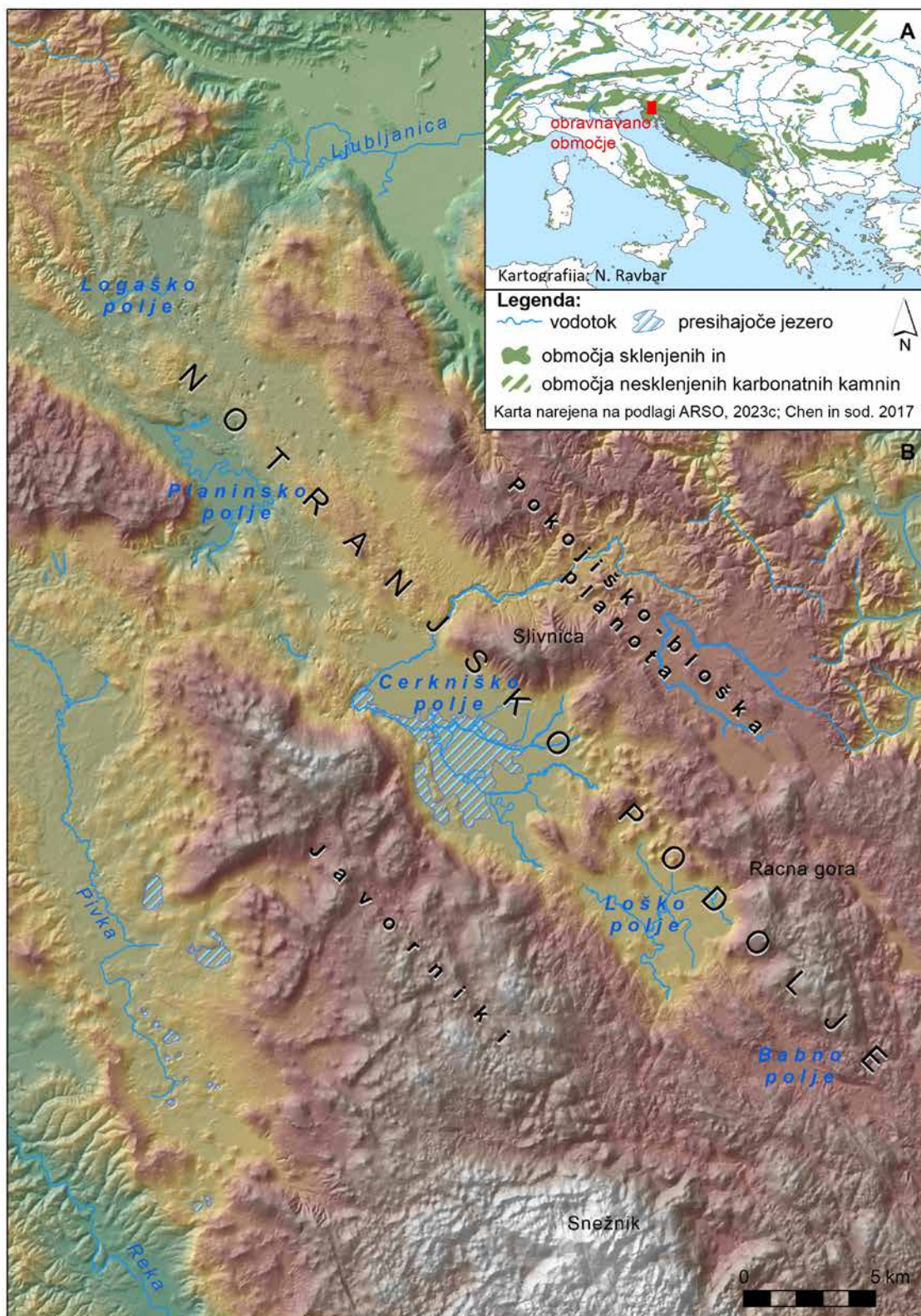
Geologija, geomorfologija in speleologija

Razvoj sklenjenih kraških kotanj, kot so polja, je navadno posledica tektonike, stika dobro in slabše prepustnih kamnin ter korozije, na katero vpliva specifična hidrološka mreža. Območje Notranjskega podolja je z geološkega vidika del Zunanjih Dinaridov, za katere je značilna narivna zgradba (Placer, 1981). Kraška polja Notranjskega podolja so nastala vzdolž Idrijske prelomnice, ene najpomembnejših tektonskih deformacij na slovenskem ozemlju, značilnih po prevladujočih desnih zmikih in radialnih premikih posameznih grud. Idrijska prelomnica poteka v dinarski smeri od doline Učje na severozahodu, prek Idrije in Cerkniskega polja proti jugovzhodu (slika 2A).

Skupaj z več vzporednimi prelomi sestavlja približno sto metrov široko zdrobljeno cono in poteka po dnu Cerkniskega polja, kjer se odcepi predjamski prelom. Tektonska zgradba odločilno vpliva na reliefno oblikovanost obravnavanega območja (Habič, 1982; Šebela in sod., 2023).

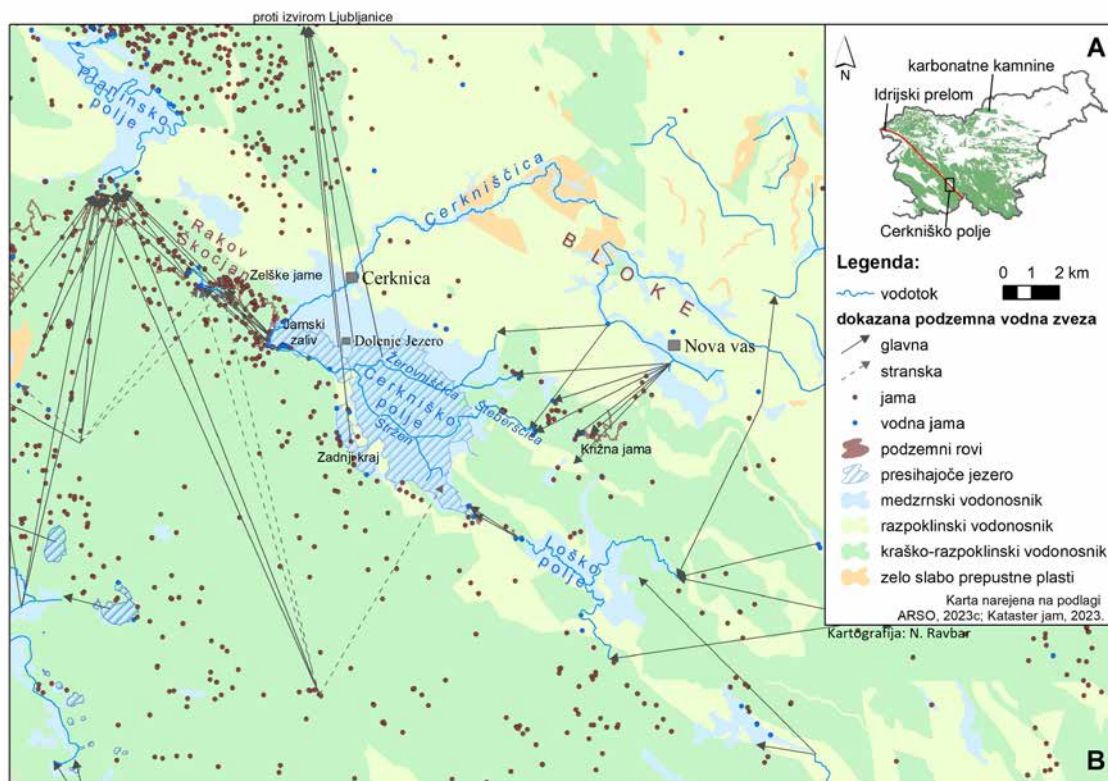
V širši okolici Cerkniskega polja prevladujejo karbonatne kamnine, natančneje triasni in jurski dolomiti ter jurski in kredni apnenci, ki so zaradi večfazne tektonike močno pretrti. Jurski in kredni apnenci prekrivajo največ prispevnega zaledja Cerkniskega polja, predvsem na njegovem zahodnem in južnem obrobju, in tvorijo obsežen kraško-razpoklinski vodonosnik (slika 2B). Dobro zakraseli apnenci gradijo Javornike v skupni debelini okoli 2800 m (Pleničar, 1953), nahajajo pa se tudi na območju Racne gore. Številne tektonske razpoke so odlični prevodniki vode, ta si s korozijo še povečujejo možnost pretoka v vertikalni in subhorizontalni smeri in tako omogoča nastanek raznih površinskih in podzemnih kraških oblik. Veliko je škrapelj in vrtač, številne so tudi kraške jame (Gospodarič in Habič, 1979).

Padavine na takšnih območjih hitro poniknejo in se podzemeljsko pretakajo proti izvirom. Severovzhodni del prispevnega zaledja Cerkniskega polja pokrivajo zelo slabo prepustne plasti skrilavcev, laporjev in peščenjakov spodnjetriasne starosti, na katerih se je razvila normalna rečna mreža zgornjega toka Cerknishčice. Tudi močno pretrti triasni in jurski dolomiti, ki tvorijo razpoklinski vodonosnik, so slabše prepustni. Pojavljajo se vzdolž Idrijske prelomne cone ter severno, severovzhodno in vzhodno od polja, v porečju Cerknishčice in na Blokah (Gospodarič in Habič, 1979).



Slika 1: Lega (A) in reliefne razmere (B) Notranjskega podolja.

Ker so ta območja obdana z dobro zakraselimi apnenci, preprečujejo prevladujoč podzemni vodni odtok. Tako se vode pojavijo na površju v obliki izdatnejših izvirov in polje prečkajo površinsko. Ponekod, na primer severno od Cerknice, je območje tudi precej zakraselo, prepredeno s številnimi vrtačami in škrapljami ter omogoča ponikanje in podzemeljsko pretakanje vod, kot je to na območju ponikev na dnu Cerkniskega polja. Dno Cerkniskega polja prekrivajo holocenski aluvialni nanosi rek in potokov, ki so posledica naplavljanja z višjega okoliškega sveta. Ti nanosi gradijo medzrnski vodonosnik. Značilne so gline, grušč in deloma prodi, teh je največ na vršaju Cerkniske. Debelina nanosa znaša 3 do 4 m, ponekod tudi do 15 m (Pleničar, 1953; Gospodarič in Habič, 1979), kar vpliva na to, da delno zadržuje odtok v kraško podzemlje.

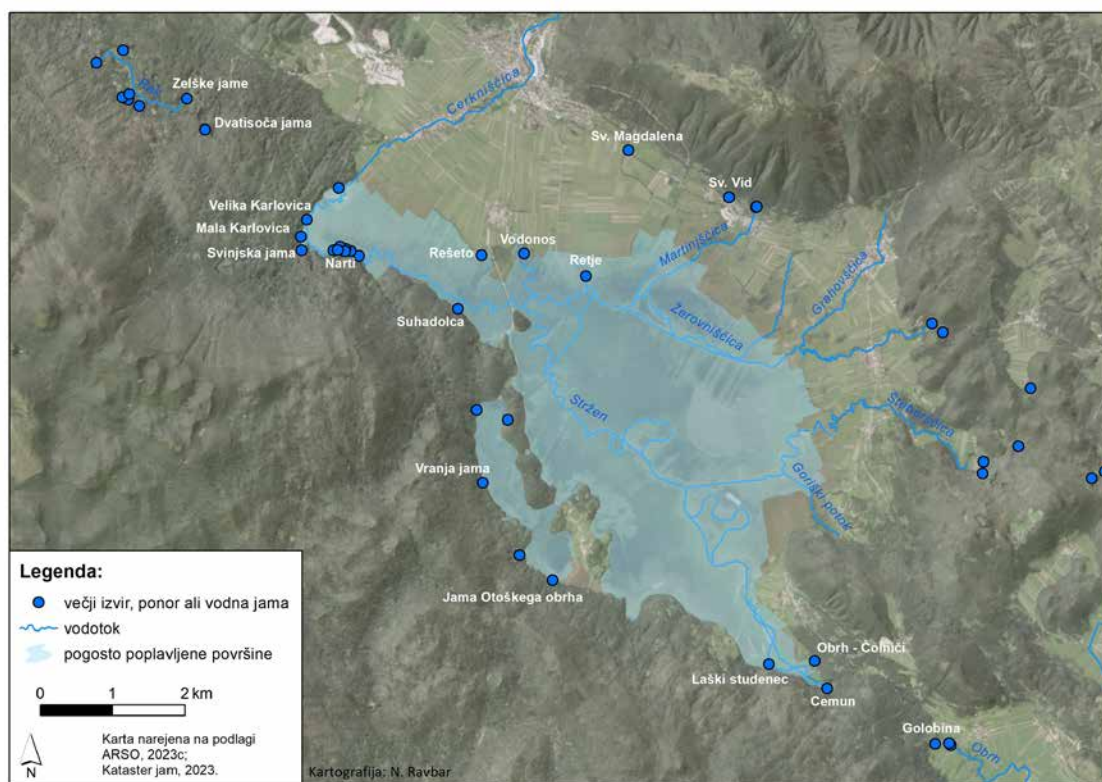


Slika 2: Potek Idrijske prelomne cone (A) ter hidrogeološke in speleološke razmere Cerkniskega polja in okolice (B).

Cerkniško polje spada med izvirno-ponorniška ali jezerska polja (Gams, 2004; Stepišnik, 2020), za katera je značilno, da je njihovo dno na območju spreminjanja nivoja podzemne vode. Za ta tip polja je značilno še, da jih prečkajo površinski vodotoki, ki se pretakajo od izvirnih k ponornim delom, vanje pa lahko s sosednjih nekraških območij vtekajo tudi površinski vodotoki. Ob visokih vodah, ko se nivo podzemne vode zviša, je del polja ojezerjen. Vse to velja za Cerkniško polje. Cerkniško jezero nastane predvsem v dolgotrajnih sezonskih poplavih in je v slovenskem merilu največje in najbolj tipično presihajoče jezero. Med drugimi morfološkimi in hidrološkimi oblikami, ki se pojavljajo na polju, velja omeniti še izvire, ponore, estavele, stalne in občasne vodotoke ter vrtače, udornice in jame.

Na območju Cerkniškega polja in v njegovi okolici je znanih več sto vhodov v jame in jamske sisteme, največ jih je na območju med Cerkniškim poljem in Rakovim Škocjanom. Najnižje ležeče jame so navadno vodne ali vsaj občasno vodne jame, višje ležeče jame pa so predvsem

korozijska brezna brez neposredne zveze s hidrološkim delovanjem jezera (Gospodarič, 1970; Kranjc, 2002; Kataster jam, 2023). Brezna so prevladujoča podzemna geomorfološka oblika in so globoka nekaj deset metrov, vendar so v hidrološkem smislu daleč bolj pomembni vodni jamski sistemi, ki prevajajo podzemne vodne tokove. Ti sistemi so na nivoju jezera in imajo ključno vlogo pri dovajanju in odvajanju vode in s tem pri polnjenju in presihanju jezera. Nekateri jamski sistemi spadajo med petnajst najdaljših jam v Sloveniji, npr. Križna jama (z izmerjeno dolžino 8273 m), sistema Karlovic z vhodi v Jamskem zalivu (9510 m) in Zelških jam v Rakovem Škocjanu (7338 m) (za lokacije glej slike 2 in 3).



Slika 3: Hidrološke značilnosti Cerkniškega polja.

Križna jama je vodna jama in je povezana z Novo Križno jamo. Njena posebnost so številna podzemna jezera s sigastimi pregradami, ki ustvarjajo več kot štirideset podzemnih jezer. Skozi jamski sistem voda z Blok priteka v izvir Šteberščice na vzhodnem delu Cerkniškega polja (Novak, 1969; Kogovšek in sod., 2008).

Na jugovzhodnem obrobju Cerkniškega polja z Loškega polja skozi podzemni sistem jame Golobina pritekajo vode Obrha, ki izvirajo v mnogih izvirih (slika 3). Eden od izvirov predstavlja vhod v jamo Čolnici, ki je jamarjem dostopna le ob zelo nizkih vodostajih, v njej pa so bile najdene kosti jamskega medveda. Te so bile najdene tudi v Križni jami. Med izvirne jame spadajo tudi Vranja jama, Suhadolca in Jama Otoškega obrha, ki dovajajo vode z Javornikov ter izvira Šteberščice in Žerovniščice.

Voda s polja odteka skozi številne talne ponore in požiralnike na obrobju oziroma med upadanjem vodostajev skozi estavele. Te so najbolj markantne v Zadnjem Kraju. Najbolj pomembne ponorne jame so v Jamskem zalivu (Svinjska jama in jamski sistem Velike in Male Karlovice) na

severozahodnem obrobju polja. Voda te ponorne jame doseže samo med večjimi poplavam, nato pa se prek cerkniškega jamskega sistema pretaka proti občasno poplavljeni Dvatisoči jami in Zelškim jamam v Rakovem Škocjanu. Iz Zelških jam izvira Rak (slika 3).

Klimatologija in hidrologija

Cerkniško polje z okolico leži na območju zmerno toplega vlažnega podnebja s toplim poletjem in viškom padavin jeseni (podnebni tip Cfb po Köppenovi podnebni klasifikaciji oziroma Cfbx po Ogrin in sod., 2023). Na podnebne značilnosti vplivata predvsem geografski položaj med Jadranskim morjem in celinskim delom Srednje Evrope ter reliefna oblikovanost površja. Cerkniško polje v obliki kotanje leži na nadmorski višini okoli 550 m in je omejeno s pomembno klimatsko ločnico, ki jo povzroča dinarska pregrada Javorniško-Snežniškega masiva. Ta zamejuje prevladujoče tokove zračnih mas, ki prihajajo od zahoda in jugozahoda, in povzroča nastanek obilnih padavin. Hkrati ovira prodor toplejšega zraka v notranjost celine. Zato so za obravnavano območje značilni zmerne temperature, hladne zime in topla poletja ter večja vlažnost. Ker je Cerkniško polje razmeroma zaprta kotanja, se v njej ob mirnem vremenu zadržuje hladen zrak in je predvsem v hladni polovici leta za območje značilna temperaturna inverzija (Zupančič, 2002).

Na klimatološki postaji Nova vas (za lokacijo glej sliko 2), ki leži nekoliko višje od Cerkniškega polja, a je najprimernejša bližnja postaja s homogeniziranim nizom podatkov, je v obdobju med letoma 1991 in 2020 povprečna temperatura zraka znašala 8,2 °C, januarska -1,7 °C, julijska pa 18,1 °C. Oktobrske povprečne temperature so bile višje od aprilskih (ARSO, 2023b). Povprečna letna temperatura je v primerjavi z vrednostmi za obdobje 1961–1990 višja za 1,3 °C, povprečna januarska za 1,1 °C, povprečna julijska pa za 1,7 °C (Zupančič, 2002).

Povprečna letna količina padavin v obdobju 1991–2020, izmerjena na padavinski postaji Cerknica (za lokacijo glej sliko 2), je znašala 1587 mm, v obdobju 1961–1990 pa je bila ta vrednost 1670 mm. Padavine so enakomerno razporejene čez vse leto, z viškom v jesenskih mesecih (november) in sekundarnim viškom spomladi (junij), najmanj padavin je v zimskih mesecih. V obdobju 1991–2020 je bilo v povprečju letno 53 dni s snežno odejo, v obdobju 1961–1990 pa je bilo takšnih dni povprečno 65 na leto. Tudi na postaji Nova vas je opazno zmanjšanje povprečnega števila dni s snežno odejo, saj jih je bilo v obdobju 1961–1990 95, v obdobju 1991–2020 pa le še 74 (Zupančič, 2002; ARSO, 2023b).

Glede na količino, intenzivnost in prostorsko porazdelitev padavin ter taljenje snega niha tudi vodostaj, to pa vpliva na obseg in trajanje poplavljenih površin Cerkniškega polja (slika 4). Visoki vodostaji so običajni za spomladanske in poznojesenske mesece, jezero pa navadno presahne v poletnih ali zimskih mesecih. V hidrološko mokrih letih jezero ne presahne, v hidrološko suhih letih pa je lahko Cerkniško polje suho tudi več mesecev. Glede na navedene značilnosti višanja temperature zraka, zmanjšanja padavin in povprečnega števila dni s snežno odejo v šestdesletnem obdobju sistematičnega merjenja meteoroloških parametrov, so novejša podrobnejša analize pokazale, da je napajanje vodonosnikov na širšem območju Cerkniškega polja zmanjšano, da jezero vse pogostejše presiha in da se čedalje pogostejše pojavljajo hidrološki ekstremi (Kovačič in sod., 2020; Blatnik in sod., 2024).

Postopoma količina dotekajoče vode, ki prihaja z okoliških hribov, preseže zmogljivost odtočnih jamskih kanalov. Pri tem je zelo težko natančno ovrednotiti, kolikšne so te količine, saj so med

poplavami mnogi dotoki in odtoki poplavljeni. Poleg tega se spreminja tudi narava estavel, ki med naraščanjem vodostajev delujejo kot izviri, med upadanjem vodostajev pa kot ponori.



Slika 4: Cerknica polje ob nizkem (levo) in visokem vodostaju (desno) (foto: Nataša Ravbar).

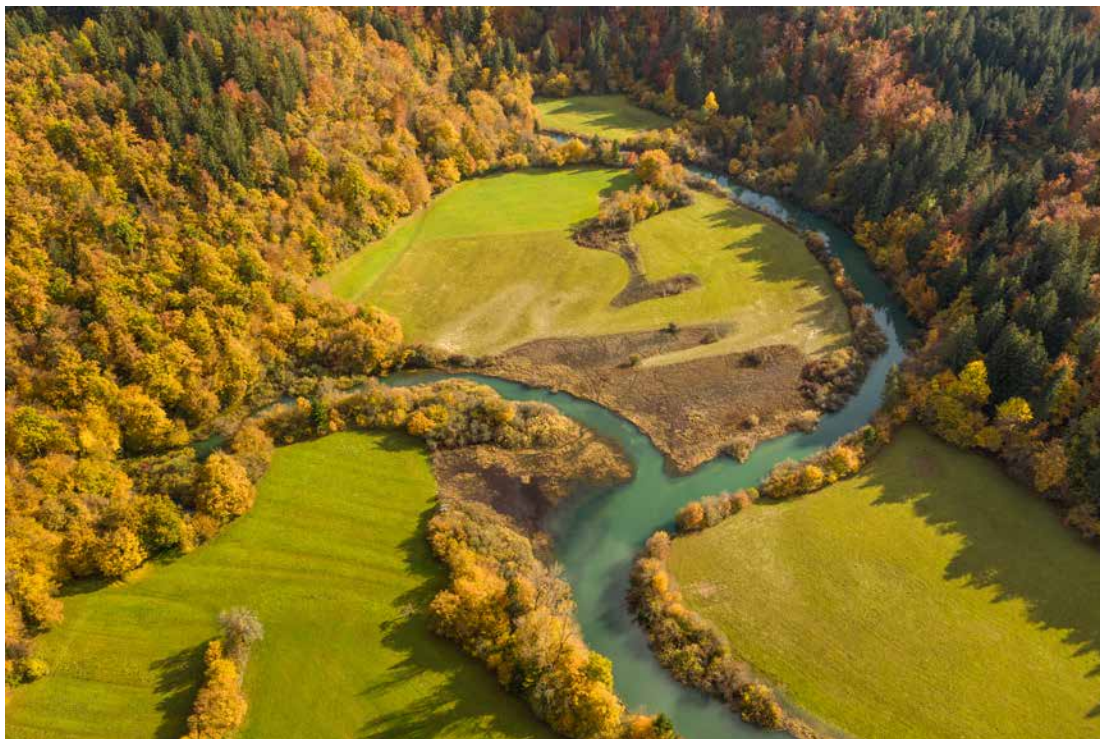
Ker je bilo v preteklosti opravljenih že mnogo študij, izvedenih z uporabo različnih pristopov, v različnih obdobjih in ob različnih vodostajih, se v literaturi pojavljajo različne dotočne in odtokne vrednosti (npr. Jenko, 1954; Žibrik in sod., 1976; Gospodarič in Habič, 1979; Kranjc, 1986; Kovačič, 2010).

Osrednji vodotok na polju je Stržen, ki v dinarski smeri prečka polje (slika 3). Izvira v več izvirih na skrajnem jugovzhodnem delu polja in se v začetku imenuje Obrh ali Jezerščica. Voda vanj podzemeljsko doteka z Loškega polja, katerega zaledje sega do Babnega polja in Loškega Potoka. Med izviri Stržena so najizdatnejši Obrh, Cemun in Laški studenec (slika 5). Ti izviri so vokliškega tipa, kar pomeni, da voda iz potopljenih sifonskih rogov priteka na površje pod pritiskom. Vsak od njih lahko doseže pretoke do okoli 25 m³/s, ob suši pa večinoma presahnejo. Skupno so maksimalni pretoki Stržena pri Gorenjem Jezeru ocenjeni na 84 m³/s (Žibrik in sod., 1976; Kranjc, 1986).

Vzdolž polja se v Stržen izliva večina vodotokov s Cerkniskega polja. Na vzhodnem robu polja se pojavlja več kraških izvirov, med njimi Žerovniščica, Šteberščica oziroma Lipsenjščica, Goriški potok ter nekaj studenčkov, ki zbirajo vode z Bloške planote, Bločiskega polja in Podložja. Njihov skupni pretok je ocenjen na okoli 35 m³/s (Žibrik in sod., 1976; Kranjc, 1986).

V regulirani strugi Žerovniščice se združujejo še vode, ki pritekajo z dolomitnih pobočij Slivnice, kot so potoka Sv. Magdalene in Sv. Vida, Martinjščica in Grahovščica s skupnim pretokom do okoli 6 m³/s. Kljub temu Žerovniščica le redko doseže Stržen, saj že pred tem ponikne v Retje in Vodonos. Svoje struge in požiralnike imajo nekateri izviri v jugozahodnem delu polja ob vznožju Javornikov (npr. Tresenc, Otoški Obrh, Mrzlik) s skupno izdatnostjo do 18 m³/s. Poleg teh izvirov na polje vodo dovajajo še številne estavele in manjši izviri. Edini površinski dotok na polje je Cerknica, ki zbira vode z Otavske, Vidovske in Bloške planote in se le ob višjih vodostajih v Jamskem zalivu združi s Strženom. Cerknica ima izrazite hudourniške značilnosti s pretoki med 0 in 37 m³/s, njen povprečni pretok v obdobju med letoma 1961 in 2020 pa je bil okoli 1 m³/s (ARSO, 2023a). Z Javorniško-Snežniškega masiva se na polje prelivajo zgolj srednje in visoke vode, nizke vode pa podzemeljsko odteka neposredno proti Planinskemu polju. Ob nizkem vodostaju je gladina podzemne vode ocenjena na 10 do 20 m pod površjem polja (Breznik, 1978; Petrič in sod., 2018). Takrat večina vode Stržena izginja skozi požiralnike na dnu polja

(Rešeto, Vodonos in Retje pri Dolenjem Jezeru) in vode odtekajo proti izvirom Bistre, Ljubije in Ljublanice (Gospodarič in Habič, 1976). Ob višjih vodostajih Stržen odteka v podzemlje skozi ponorne jame v Jamskem zalivu na zahodnem ali severozahodnem robu polja (Narti, Svinjska jama). Jamski sistem Velike in Male Karlovice na severozahodnem obrobju polja doseže samo med večjimi poplavlami (Gospodarič, 1970; Habič, 1974). Cerkniščica deloma ponika vzdolž struge od Begunj dolvodno, dokončno pa ponikne v ponorih v Jamskem zalivu. Od tod voda nadaljuje pot podzemno proti Rakovemu Škocjanu in naprej proti izvirom na Planinskem polju (Gabrovšek in sod., 2010). Vse leto se voda zadrži zgolj v Zadnjem kraju, presahne pa samo med največjo sušo.



Slika 5: Obrh in Cemun, ki izvirata v obliki vokliškega izvira, dovajata vodo iz Loškega polja in se stekata v Stržen. Cemun deluje kot estavela in v času suše prevzema vlogo požiralnika (foto: Matej Blatnik).

Odtok s Cerkniškega polja je tako v celoti kraški. Najprej voda skozi požiralnike na obodu Jamskega zaliva odteče z zahodnega dela polja s skupnim maksimalnim pretokom okoli 16 m³/s. Glavne talne ponikve Cerkniškega polja so v osrednjem delu, med robom Cerkniškega vršaja in skalnim Drvoščem, s skupno povprečno požiralnostjo do 8 m³/s. Del voda pa odteče tudi skozi ponore in estavele v Zadnjem kraju (Gospodarič in Habič, 1979; Kovačič, 2010).

Poplavljanje se začne, ko voda Stržena prestopi bregove in zalije najnižje dele poplavnega dna polja. To se zgodi, ko vodostaj na merilni postaji Dolenje Jezero doseže nadmorsko višino 547,4 m (Kolbezen, 1998; Kovačič in Ravbar, 2010). Nato se vodostaj počasi zvišuje do višine 550 m. Analiza pogostosti vodostajev je pokazala, da voda najpogosteje doseže koto 550,3 m, ko je poplavljen 21,8 km² površine (Ravbar in sod., 2021). Pod to nadmorsko višino ni njiv in pravih travnikov, še manj stavb (Kranjc, 1986; Smrekar, 2000; slika 6).



Slika 6: Kmetijske površine ponekod segajo prav do meje običajnih poplav. Pogled na ponikve na območju Vodonosa (foto: Matej Blatnik).

Največje poplave dosežejo okoli 552 m nadmorske višine. Takrat je jezero dolgo 10,5 km in široko 5 km, ojezeritev obsega okrog 26 km² in vsebuje približno 70 milijonov m³ vode (Gospodarič in Habič, 1979). Ob takih razmerah lahko ojezeritev traja več mesecev.

V primerjavi s poplavami v rečnih dolinah so poplave na krasu izrazito umirjene. Zaradi kraške retinence – časa, potrebnega, da se jamski kanali in razlivna območja na površju napolnijo z vodo – se tovrstne poplave pojavijo z zamikom. Poleg tega zaradi nizkega strmca voda nima velike erozijske moči in zunaj struge ne odlaga veliko materiala. Večinoma tovrstne poplave delujejo kot naravni zadrževalniki pretočnih viškov in dobri regulatorji poplav v spodnjih delih porečij, lahko pa povzročijo sekundarne poplavne viške v območjih dolvodno, ki jih napajajo (Kovačič in Ravbar, 2010).

Nestalne vodne razmere so bile v preteklosti razumljene kot omejitveni razvojni dejavnik in zato predmet številnih študij in načrtov upravljanja voda. V preteklih stoletjih je bilo Cerkniško polje podvrženo večkratnim poskusom ojezerjevanja oziroma osuševanja polja, odvisno od aktualnih načrtov. Stalno ojezeritev so poskušali doseči predvsem z zaježitvijo glavnih odtočnih kanalov, osuševanje pa z melioriranjem rečnih kanalov in širjenjem ponornih kapacitet (Gospodarič in Habič, 1979; Bidovec, 2007). Predvsem v drugi polovici prejšnjega stoletja je bilo opravljenih nemalo raziskav, da bi proučili možnosti stalne ojezeritve polja, in raziskav razsežnosti visokih voda (poplav). V zadnjem desetletju pa prevladujejo težnje po renaturaciji vodotokov, tj. vrnitev potokov v stare meandre, ki naj bi upočasnili odtekanje. Kljub obilici posegov v preteklosti polje ostaja v razmeroma naravnem stanju.

Biotška raznovrstnost in varovanje

Spremenljivim hidrološkim razmeram sta se prilagodila tudi živalstvo in rastlinstvo, in izoblikoval se je edinstven ekosistem. Ekosistem nudi ugodne življenjske pogoje tudi redkim in ogroženim rastlinskim ter živalskim vrstam, med katerimi so nekatere izjemno pomembne celo za evropske razmere. Poleg ustvarjanja posebnih habitatov, ki so osnova za veliko biotsko raznovrstnost in s tem raznolik genski material ima poplavljanje polja še številne druge ekološke posledice.

Na območjih, ki niso podvržena rednim poplavam, prevladujejo travniki, območja rednih poplav pa so pretežno porasla z močvirskimi rastlinami. Precej je trstič in visokega šašja, ob višjem vodostaju pa se v kotanjah množično pojavljajo alge parožnice in nekatere semenke, kot so dristavci. Močvirsko rastlinstvo ob visokih vodah zadržuje vodo, s čimer pripomore k zmanjšanju poplav dolvodno. V sušnem obdobju vlago počasi oddaja in s tem blaži sušnost. S koreninami utrjuje blatno dno, blaži erozijo ter čisti vodo. Obsežne interakcije med površinsko in podzemno vodo pomenijo večjo izmenjavo hranil, ki jih prinese poplavna voda, in razgradnjo nakopičenih organskih snovi (Gaberščik in Urbanc-Berčič, 2002; Martinčič in Leskova, 2002; Bordjan, 2012). Pogosto poplavljen območja z močvirskim rastjem zagotavljajo bivališče in zavetje številnim živalim, hkrati pa poplave omogočajo večjo izmenjavo organizmov med habitatami. V sušnem obdobju, ko prave vodne rastline, vodne oblike amfibijskih rastlin in nekatere vlagoljubne rastlinske vrste odmrejo, se razvijejo kopenske oblike amfibijskih rastlin. Območje postane pomemben kopenski habitat za številne živalske vrste.

Na območju jezera je bilo najdenih 37 vrst nižjih rakov, od tega kar 15 vrst ceponožnih rakov, med katerimi je največji posebnost *Eudiaptomus hadzici* (Brehm, 1933). Cerkniško jezero je edino znano nahajališče plenilske vodne bolhe *Polyphemus pediculus* (Linnaeus, 1761) v Sloveniji (Brancelj, 2002). Pogoste so tudi različne polžje vrste, tako take značilne za površinske kot podzemeljske vode (Brancelj, 2002; NRP, 2023). Najbolj so raziskane žuželke (kačji pastirji, enodnevnice, ravnokrilci, čebele, hrošči, mladoletnice in druge) – številne od njih imajo ličinke, ki so vezane na življenje v vodi. Znanih je na primer kar 125 vrst dnevnih metuljev (NRP, 2023). Veliko je dvoživk, med katerimi velja posebej omeniti človeško ribico (*Proteus anguinus* Laurenti, 1768), endemita Dinarskega krasa in edinega jamskega vretenčarja v Evropi, ki biva v vodnih jamah v okolici Cerkniškega polja (Pipan in Culver, 2019). V jezeru in pritokih je bilo najdenih osem stalnih vrst rib in vsaj še toliko nestalnih vrst, vnesenih od drugod. Tu živi devet vrst plazilcev, med katerimi so mnoge ranljive oziroma prizadete (npr. močvirska sklednica – *Emys orbicularis* (Linnaeus, 1758); Polak, 2002a).

Vodni nevretenčarji, ribe in nekateri plazilci predstavljajo hrano za ostale živali, zlasti za vodne ptice. Cerkniško jezero je v mednarodnem merilu pomembno ornitološko območje, saj je bilo opaženih kar 276 vrst vodnih in drugih ptic. Med 45 znanimi vrstami sesalcev (npr. ris, volk, vidra, medved, divja mačka, drevesni polh) posebno mesto zasedajo netopirji (Polak, 2002b; 2002c; NRP, 2023). Poleg velike biotske raznovrstnosti, pestrost habitatov hkrati predstavlja izredno estetsko vrednost. Mnoge od vrst, ki jih najdemo na Cerkniškem polju, so uvrščene na rdeči seznam ogroženih rastlinskih in živalskih vrst. Kot posledica spremenjenih okoljskih razmer, povzročenih s podnebnimi spremembami in posegi človeka, se kažejo vse hitrejši odtoki vode s polja ter s tem povezana večja dinamika vodostajev in manj vodnih površin ob nizkih vodostajih. Pomanjkanje vode ali njeno prehitro odtekanje ima na primer za vodne ptice med njihovim gnezdenjem hude negativne posledice, saj mladiči še ne morejo leteti in so zato lahek plen. Pomembno je tudi, da so poplavne površine obsežnejše, ko ribe drstijo, saj se v primeru prezgodnje osušitve ne morejo umakniti v rečne struge (Trontelj, 1993). Voda se ob nižjem vo-

dostaju tudi hitreje segreva, manjša je samočistilna sposobnost in hitreje poteka mineralizacija organske snovi, kar vpliva na vodne rastlinske in živalske vrste (Gaberščik in Urbanc-Berčič, 2002; Ravbar in Pipan, 2022).

Zaradi izjemne biotske raznovrstnosti in pomena obravnavanega območja za delovanje naravnih in antropogenih sistemov, predvsem z vidika pitne vode in zagotavljanja hrane, je bilo leta 2006 Cerkniško jezero z okolico priznано kot mednarodno pomembno mokrišče in vpisano na seznam Ramsarskih mokrišč (Ramsar Convention Secretariat, 2022). Občina Cerknica je v okviru svojih meja leta 2002 ustanovila Notranjski regijski park z namenom, da se ohranijo, varujejo in raziskujejo naravne in kulturne vrednote tega območja (Uradni list RS, 2002). Poleg tega je območje Cerkniškega polja zaradi pomena za življenje ogroženih ptic opredeljeno kot območje Natura 2000 (Natura 2000; Natura 2023). To kaže, da je bil pomen Cerkniškega polja prepoznan in priznan z več vidikov.

Zaključek

Cerkniško polje je pomembno zaradi presihajoče narave voda in izjemne biotske raznovrstnosti, kar je posledica geološke zgradbe, specifičnih geomorfoloških in hidrometeoroloških razmer ter posebne rabe prostora. Na podlagi večstoletnega proučevanja (vse od Valvasorja) velja za *locus typicus* za nekatere površinske in podzemne kraške pojave in je med drugim Sloveniji prinesel naziv zibelka krasa in krasoslovja. Spada med izjemna in s krasoslovnega vidika pomembna območja klasičnega krasa ter se je ohranil kljub preteklim poskusom zaježitve in delne melioracije njegovih vodotokov. Izjemnost tega kraškega polja je bila že večkrat prepoznana, kar se kaže v različnih oblikah varovanja ter z uveljavitvijo več oblik mednarodnega naravovarstvenega pomena. Nestalno hidrološko naravo Cerkniškega polja so prebivalci poskušali krotiti na različne načine, odvisno od zgodovinskih razmer in interesov, v katerih so pobude nastale. Vendar posegi na kraških poljih zahtevajo temeljit premislek, ne samo glede posledic s hidrogeološkega vidika, temveč z ozirom na celoten ekosistem, vključno s posledicami za obstoječo in načrtovano rabo tal. Poleg tega je treba kraško polje obravnavati kot celoto in preprečiti stihijsko naravnane ukrepe. Zaradi posebnih geomorfoloških in hidroloških procesov so kraška območja namreč izjemno dovzetna za uničenje. Nepremišljene človekove dejavnosti, kot so med drugim sprememba rabe zemljišč, spremembe površinskega odtoka, odpiranje ali zapiranje podzemnih prostorov, povečujejo ranljivost kraških območij z vidika naravnih razmer oblikovanja površja, napajanja in praznjenja vodonosnikov, kar lahko močno vpliva na kraško geomorfologijo, hidrologijo in ekologijo Cerkniškega polja. Vsak poseg v naravno ravnovesje posameznih elementov okolja (voda, zemlja, habitat) in procesov (npr. korozija, odlaganje sige) lahko povzroči nepopravljivo škodo in sproži dinamično interakcijo med posameznimi elementi, ki so lahko vzrok za kompleksne povratne mehanizme. Zato so nepremišljeno načrtovani posegi nedopustni in bi bilo treba človekove aktivnosti smiselno uskladiti z naravnimi zakonitostmi tega krhkega okolja.

Summary

The importance and karsological features of the Cerknica Polje

The Cerknica Polje is important because of the intermittent character of the waters and its exceptional biological diversity, which is due to the geological structure, special hydromete-

orological conditions and specific use of the area. Due to centuries of research that has been carried out here, it is considered a *locus typicus* for some surface and underground karst phenomena, which earned Slovenia the title of the cradle of the karst and karstology. With an area of around 70 km², it is located in the Notranjska lowlands in south-western Slovenia and is part of the Dinaric Karst, the largest karst area in Europe. The relatively flat bottom is surrounded by plateaus with steep slopes consisting mainly of dolomites from the Triassic and Jurassic periods, and limestones from the Jurassic and Cretaceous. The wider area is dominated by the karst aquifer, which is characterized by a predominantly underground flow of water that appears on the surface when it comes into contact with less permeable rock. There is also surface inflow to Cerknica Polje from the neighbouring non-karst areas, while the outflow is entirely of a karstic nature.

Floods typically begin at times when the groundwater level rises. Springs' discharges begin to increase and temporary springs and estavelles are activated. Gradually, the amount of inflowing water from the surrounding hills exceeds the capacity of the underground drainage channels. The water level rises depending on the quantity, intensity and geographical distribution of rainfall and snowmelt. Floods often occur in spring and late autumn, while the lake usually dries up in summer and winter. Compared to river valley flooding, karst flooding is remarkably calm. Due to so-called karst retention – the time it takes for cave channels and overflow areas on the surface to fill with water – such floods occur with a delay. In addition, due to the low gradient, the water has little erosive power and accumulates little material outside the riverbeds. These types of floods generally act as natural retention areas and good regulators of flooding in downstream areas but can also cause secondary flood peaks.

Unstable water conditions have always been considered a limiting factor for development and have therefore been the subject of numerous studies and management plans. However, the special nature of the Cerknica Polje has been recognized several times, which is reflected in numerous protective measures and in the establishment of several forms of international nature conservation. It is considered an important area of the classical karst, one that has been preserved despite previous melioration interventions. Due to the increase in air temperature, and the decreases in both precipitation and the average number of days with snow cover over the last 60 years of systematic measurement of meteorological parameters, recent detailed analyses have shown that groundwater recharge is decreasing in the wider area. In addition, the lake dries out more frequently and hydrological extremes occur more often. These conditions negatively impact the ability of many plant and animal species to adapt and survive, including rare, endangered or even endemic species. The management of the area under the influence of environmental changes must therefore be carefully considered and remains a challenge for the future.

Zahvala

Delo je sofinancirala Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije iz državnega proračuna preko programa Raziskovanje krasa P6-0119 in Evropska Komisija preko projekta LIFE-TRŠČA (LIFE22-NAT-SI-LIFE TRSCA - 101114184).

Viri

- ARSO 2023a. Arhiv hidroloških podatkov [online]. Agencija RS za okolje. Dostopno na: <http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/> [dostop 5. september 2023].
- ARSO 2023b. Arhiv meteoroloških podatkov [online]. Agencija RS za okolje. Dostopno na: <http://www.meteo.si> [dostop 4. september 2023].
- ARSO 2023c. Geoportal Atlas okolja [online]. Agencija RS za okolje. Dostopno na: <https://gis.arso.gov.si> [dostop 12. oktober 2023].
- Bidovec, M. 2007. Pretekli posegi na Cerkniskem jezeru. Novice Notranjskega regijskega parka, 1/2, 2–7.
- Blatnik, M., Gabrovšek, F., Ravbar, N., Frantar, P., Gill, L. 2024. Assessment of climatic and anthropogenic effects on flood dynamics of a karst polje – an example of analysis of a seventy-year observation dataset of Cerknisko Polje, SW Slovenia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101609. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101609>
- Bordjan, D. 2012. Vodne ptice in ujede Cerkniskega polja (južna Slovenija) v letih 2007 in 2008, s pregledom zanimivejših opazovanj do konca leta 2010. *Acrocephalus*, 33(152–153), 25–104. <https://doi.org/10.2478/v10100-012-0002-z>
- Brancelj, A. 2002. Škrgonožci, vodne bolhe ter ceponožci. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru* (str. 138–147). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Breznik, M. 1978. Problematika zaščite podzemne vode u aluvialnim ravnica. Zbornik 5. jug. simp, o hidrogeol. i inžen. geol., 1, 27–32.
- Chen, Z., Auler, A.S. and Bakalowicz, M. 2017. The World Karst Aquifer Mapping project: concept, mapping procedure and map of Europe. *Hydrogeology Journal*, 25, 771–785. <https://doi.org/10.1007/s10040-016-1519-3>
- Gaberščik A., Urbanc-Berčič O. 2002. Ekosistem, ki ga ustvarja igra vode. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniskem jezeru* (str. 51–57). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Gabrovšek, F., Kogovšek, J., Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N., Turk, J. 2010. Recent results of tracer tests in the catchment of the Unica River (SW Slovenia). *Acta Carsologica*, 39, 27–37. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i1.110>
- Gams, I. 2004. Kras v Sloveniji v prostoru in času. 516 str.
- Gospodarič, R. 1970. Speleološke raziskave Cerkniskega jamskega sistema. *Acta Carsologica* 5, 109–169.
- Gospodarič, R., Habič, P. 1976. Underground water tracing. 312 str.
- Gospodarič, R., Habič, P. 1979. Kraški pojavi Cerkniskega jezera, *Acta Carsologica* 8, 7–162.
- Habič, P. 1974. Tesnjenje požiralnikov in presihanje Cerkniskega jezera, *Acta Carsologica* 6, 35–56.
- Habič, P. 1982. Kraški relief in tektonika. *Acta Carsologica*, 10, 23–43.
- Jenko, F. 1954. Hidrogeologija krasa. Vodnogospodarska osnova porečja Ljublanice, Prirodne osnove, Hidrogeologija, knj. 4, 4–89.
- Kataster jam 2023. Kataster jam Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU in Jamarske zveze Slovenije. Postojna, Ljubljana.
- Kogovšek, J., Prelovšek, M., Petrič, M. 2008. Underground water flow between Bloke Plateau and Cerknica Polje and hydrologic function of Križna jama, Slovenia. *Acta Carsologica*, 37(2–3), 213–225. <https://doi.org/10.3986/ac.v37i2-3.147>
- Kolbezen, M. 1998. Hidrografija. V I. Vrišer (ur.), *Geografija Slovenije*, 139 –172.
- Kovačič, G. 2010. An attempt towards an assessment of the Cerknica polje water balance. *Acta Carsologica* 39, 39–50. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i1.111>

- Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N. 2020. Evaluation and quantification of the effects of climate and vegetation cover change on karst water sources: Case studies of two springs in South-Western Slovenia. *Water*, 12(11), 3087. <https://doi.org/10.3390/w12113087>
- Kovačič, G., Ravbar, N. 2010. Extreme hydrological events in karst areas of Slovenia, the case of the Unica River basin. *Geodinamica Acta*, 23(1-3), 89-100. <https://doi.org/10.3166/ga.23.89-100>
- Kranjc, A. 1986. Cerkniško jezero in njegove poplave, *Geografski zbornik*, 25, 71–123.
- Kranjc, A. 1987. Cerkniško jezero, primer človekovega vpliva na kraško hidrografijo, *Notranjska, Zbornik 14. zborovanja slovenskih geografov*, Postojna.
- Kranjc, A. 2002. Speleologija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 39–43). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Kranjc, A. 2006. Seasonal karst lake Cerknica (Slovenia)–2000 years of man versus nature. *Helictite*, 39(2), 39–46.
- Martinčič, A., Leskovar, I. 2002. Vegetacija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 96–105). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Natura 2000, 2023. Naravovarstveni atlas [online]. Dostopno na: <https://www.naravovarstveni-atlas.si/> [dostop 7. oktober 2023].
- Novak, D. 1969. O barvanju potoka v Križni jami. *Geografski vestnik* 41, 75–79.
- NRP 2023. Cerkniško jezero [online]. Notranjski regijski park. Dostopno na: <https://www.notranjski-park.si/narava/naravne-znamenitosti/cerknisko-jezero> [dostop 7. oktober 2023].
- Ogrin, D., Repe, B., Štaut, L., Svetlin, D., Ogrin, M. 2023. Podnebna tipizacija Slovenije po podatkih za obdobje 1991–2020. *Dela*, 59, 5-89. <https://doi.org/10.4312/dela.59.5-89>
- Perko, D., Orožen Adamič, M. 1998. Slovenija: pokrajine in ljudje, 735 str.
- Petrič, M., Kogovšek, J., Ravbar, N. 2018. Effects of the vadose zone on groundwater flow and solute transport characteristics in mountainous karst aquifers – the case of the Javorniki-Snežnik massif (SW Slovenia). *Acta Carsologica*, 47, 35-51. <https://doi.org/10.3986/ac.v47i1.5144>
- Pipan, T., Culver, D.C. 2019. Wetlands in cave and karst regions. V *Encyclopedia of caves*, 1156–1164. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-814124-3.00135-7>
- Placer, L. 1981. Geologic structure of southwestern Slovenia. *Geologija* 24(1), 27–60.
- Pleničar, M. 1953. Prispevek h geologiji Cerkniškega polja. *Geologija* 1, 111–119.
- Polak, S. 2002a. Cerkniško jezero – mednarodno pomembno območje za ptice. Climate. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 248-257). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Polak, S. 2002b. Plazilci (Reptilia) jezera in okolice. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 236–247). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Polak, S. 2002c. Sesalci (Mamalia) jezera in okolice. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 258–263). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Ramsar Convention Secretariat 2022. Ramsar Sites information service [online]. Dostopno na: <https://rsis Ramsar.org/ris-search> [dostop 27. oktober 2023].
- Ravbar, N., Mayaud, C., Blatnik, M., Petrič, M. 2021. Determination of inundation areas within karst poljes and intermittent lakes for the purposes of ephemeral flood mapping. *Hydrogeology Journal*, 29(1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02268-x>
- Ravbar, N., Pipan, T. 2022. Karst groundwater dependent ecosystems: typology, vulnerability and protection. V K. Tockner, T. Mehner, (ur.) *Encyclopedia of inland waters*, 460–473.

- Siegel, L., Goldscheider, N., Petitta, M., Xanke, J., Andreo, B., Bakalowicz, M., Barberá, J. A., Bouhlila, R., Burg, A., Doummar, J., Ezzine, I., Fernández-Ortega, J., Ghanmi, M., Jourde, H., Marín, A. I., Mhimdi, A., Pipan, T., Ravbar, N., Maran Stevanović, A., Stevanović, Z. 2023. Distribution, threats and protection of selected karst groundwater-dependent ecosystems in the Mediterranean region. *Hydrogeological Journal*, 31, 2231–2249. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02711-9>
- Smrekar, A. 2000. Cerkniško polje kot primer poseljenega kraškega ranljivega območja. *Geographica Slovenica* 33/1, 117–156.
- Stepišnik, U. 2020. Kraška polja v Sloveniji. *Dela*, (53), 23–43. <https://doi.org/10.4312/dela.53.23-43>
- Šebela, S., Tasič, I., Pahor, J., Mali, M., Novak, U., Năpăruș-Aljančič, M. 2023. Development of SLO KARST Near Fault Observatory site in SW Slovenia. *Carbonates Evaporites* 38, 43. <https://doi.org/10.1007/s13146-023-00864-y>
- Trontelj, P. 1993. O naravovarstvenem konceptu Cerkniškega jezera s poudarkom na varstvu ptic. - *Acrocephalus* 14 (56/57), 63–79.
- Uradni list RS, 2002. Odlok o ustanovitvi javnega zavoda Notranjski regijski park. Uradni list RS 75, 8327.
- Zupančič, B. 2002. Klima. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 4–17). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Žibrik, K., Lewicki, F., Pičinin, A. 1976. Hydrologic investigations. Investigations in Ljubljanica river basin, Investigations before the tracing test 1972–1975. V R. Gospodarič, P. Habič (ur.) *Underground water tracing*, 43–56.

Podnebje v zaledju Cerkniškega polja – splošne značilnosti, trendi in pričakovana dinamika v prihodnosti

Matej Blatnik, Nataša Ravbar, Franci Gabrovšek, Peter Frantar, Mišo Andjelov, Florjana Ulaga

Uvod

Na hidrološke značilnosti Cerkniškega polja in z njim povezano biotsko raznovrstnost poleg lege, reliefnih in geoloških razmer poglavitno vplivajo tudi podnebne razmere. Te so v preteklosti obravnavali številni raziskovalci (npr. Bernot, 1976; Kranjc, 1986; Smrekar, 2000; Zupančič, 2002), nedavno pa tudi Miklič in Trobec (2023).

Meteorološki podatki in simulacije skladno nakazujejo spremenjene vzorce padavinskih in temperaturnih režimov (IPCC 2022). V tem prispevku zato obravnavamo dolgoletni niz podatkov o glavnih podnebnih spremenljivkah, kot so temperatura zraka, padavine, snežna odeja, evapotranspiracija in efektivne padavine, ki jih Agencija Republike Slovenija za okolje na območju hidrološkega zaledja Cerkniškega polja neprekinjeno spremlja od leta 1948.

Splošne značilnosti podnebja

Cerkniško polje in njegovo zaledje se nahaja na prehodu med jugozahodno in južno Slovenijo na širokem razponu nadmorskih višin od 550 do 1800 m. S podnebnega vidika gre tu za prepletanje dveh od treh glavnih tipov podnebja, ki so prisotni v Sloveniji: podgorsko in gorsko podnebje. Mestoma se v nekaterih obdobjih kažejo tudi vplivi zmernege sredozemskega podnebja (Ogrin in sod., 2023).

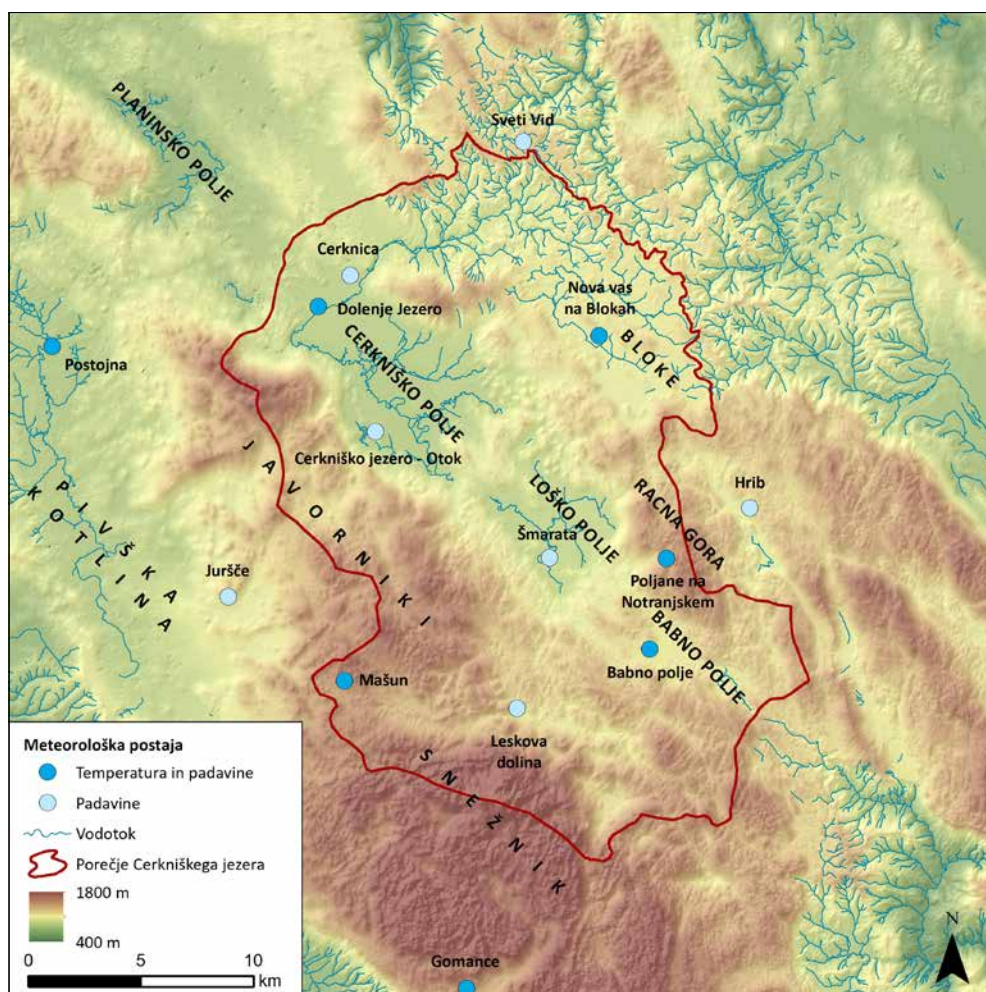
Večina hidrološkega zaledja Cerkniškega polja (celotno območje z izjemo najvišjih vrhov Javornikov in Snežnika) ima podgorsko podnebje. Zanj je značilno, da je povprečna temperatura najhladnejšega meseca med -3 in 0 °C, povprečna temperatura najtoplejšega meseca med 16 in 20 °C, povprečna letna temperaturna amplituda je med 18 in 20 °C, oktober pa je v povprečju toplejši od aprila. Letna višina padavin je preko 1400 mm, padavinski režim pa je zmerno sredozemski z viškom jeseni (Ogrin in sod., 2023). Zaledje Cerkniškega polja najbolj ustreza podtipu »zelo vlažnega podgorskega podnebja« z Langovim padavinskim faktorjem (razmerje med povprečno višino padavin in povprečno letno temperaturo zraka) preko 160 (Ogrin in sod., 2023).

Za gorsko podnebje je značilno, da je povprečna temperatura najhladnejšega meseca pod -3 °C, povprečna letna temperatura pod 6 °C, povprečna letna temperaturna amplituda pod 18 °C in letna višina padavin nad 1600 mm (Ogrin, 1996; Ogrin in sod., 2023). Najvišji predeli Javornikov in Snežnika najbolj ustrezajo podtipu »podnebja nižjega gorskega sveta« (Ogrin in sod., 2023). Zanj je značilno, da je povprečna temperatura najtoplejšega meseca nad 10 °C, povprečna letna temperatura 3 – 6 °C, povprečna letna višina padavin 1400 – 2000 mm in zmerno sredozemski padavinski z viškom padavin v jesenskih mesecih (Ogrin in sod., 2023). S splošnim višanjem temperatur in spreminjanjem padavinskega režima nekatera območja s podgorskim podnebjem postopoma kažejo značilnosti zmernege sredozemskega podnebja, kar je v posameznih letih po letu 2000 mogoče zaznati tudi na nižjih območjih zaledja Cerkniškega polja (Kovačič in sod., 2020). Za zmerno sredozemsko podnebje je sicer značilno, da je temperatura najhladnejšega

meseca nad 0 °C, povprečna temperatura najtoplejšega meseca nad 20 °C, povprečne oktoberске temperature so višje od aprilskih, povprečna letna temperaturna amplituda pa je pod 20 °C. Povprečna letna višina padavin je med 900 in 1400 mm, padavinski režim pa je zmerno sredozemski z viškom padavin v jesenskih mesecih (Ogrin in sod., 2023).

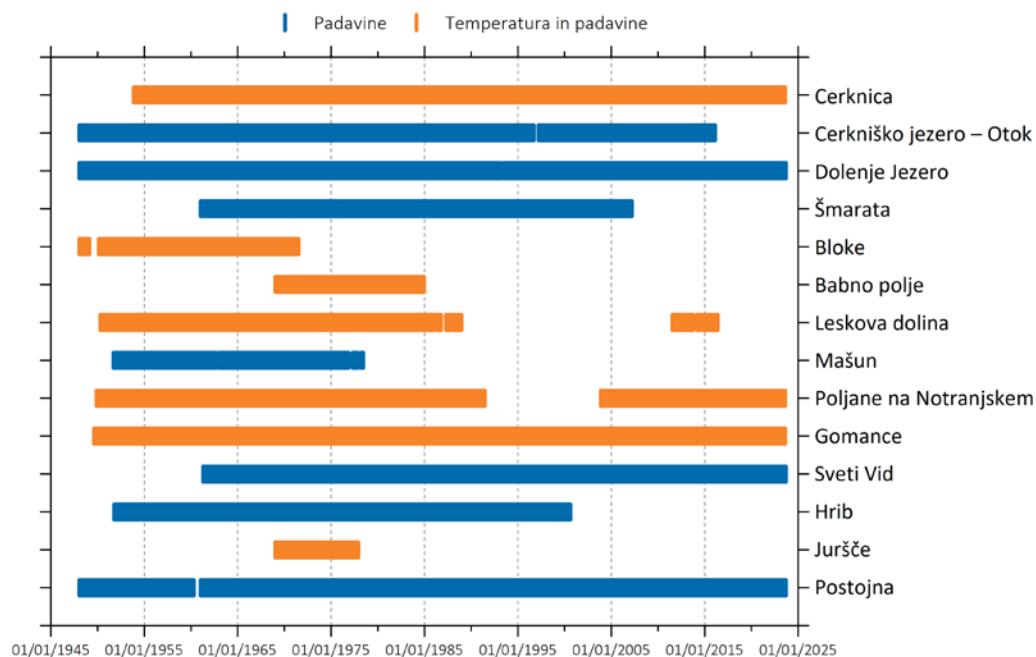
Metodologija

Za razumevanje podnebnih razmer smo analizirali meteorološke podatke celotnega hidrološkega zaledja Cerkniškega polja, ki meri okoli 475 km² (Žibrik in sod., 1976; Kranjc, 1986). V sklopu meteoroloških meritev, ki jih izvaja Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO), je na tem območju 9 meteoroloških postaj z vsaj 10 leti zveznih meritev padavin in/ali temperature zraka, in sicer so to: Cerknica, Dolenje Jezero, Cerkniško jezero - Otok, Nova vas na Blokah, Šmarata, Babno polje, Poljane na Notranjskem, Leskova Dolina in Mašun (ARSO, 2017a; b; c). Meteorološke postaje so geografsko enakomerno razporejene po celotnem zaledju, prav tako pokrivajo velik razpon nadmorskih višin (od 563 m na Dolenjem Jezeru do 1030 m na Poljanah na Notranjskem), s čimer je zajeta večina regionalnih podnebnih posebnosti območja (slika 1).



Slika 1: Opredelitev hidrološkega zaledja Cerkniškega polja z okoliškimi meteorološkimi postajami (vir podatkov ARSO, 2017a; b; c).

Glavne podnebne značilnosti smo analizirali na podlagi meritev padavin in temperature zraka. Te na različnih meteoroloških postajah potekajo od leta 1948 naprej (slika 2), uporabljeni podatki pa so v dnevni ali mesečni časovni ločljivosti (ARSO, 2023a; b). Pri izboru podatkov smo se osredotočili na podatke postaj znotraj zaledja Cerknškega polja, na območju z redkejšo mrežo meritev pa smo uporabili tudi podatke okoliških postaj: Postojna (temperatura, padavine, potencialna evapotranspiracija), Gomance (temperatura, padavine), ter Juršče, Sveti Vid in Hrib - Loški Potok (padavine).



Slika 2: Obdobje meritev posameznih spremenljivk na izbranih meteoroloških postajah (vir podatkov ARSO, 2017a; b; c).

Dejansko evapotranspiracijo in odtok (površinski ter podzemni) za zaledje Cerknškega polja smo izračunali z vodno bilančnim modelom mGROWA, ki je sicer izdelan za ugotavljanje napajanja podzemne vode v izbranem hidrološkem zaledju. Model mGROWA pri analizi upošteva klimatske razmere (padavine, izhlapevanje in temperaturo zraka), geološko zgradbo, vrsto tal, rabo prostora, naklon površja in globino do podzemne vode (Frantar in sod., 2018). Napajanje podzemne vode se izračunava na podlagi skupnega odtoka preko modeliranja transporta vode v tleh (Engel in sod., 2012), modeliranja snega ter s pomočjo sheme indeksa baznega odtoka za določitev deleža podzemnega odtoka (Demuth, 1993). Zanesljivost izračuna je bila potrjena s podatki o pretokih z državne mreže hidroloških merilnih postaj.

Sezonska dinamika glavnih podnebnih spremenljivk in modelska vodna bilanca

Temperatura

Na območju Cerknškega polja je bila v preteklosti samo ena meteorološka postaja, ki je beležila temperaturo zraka in višino padavin, in sicer Dolenje Jezero (1969–1977). Na širšem območju – to je na območju celotnega hidrološkega zaledja Cerknškega polja so bile v preteklosti vzpostavljene meritve na petih mestih.

Dve med njimi (Nova vas na Blokah in Babno polje) sta še vedno aktivni, meritve na postajah Mašun in Poljane na Notranjskem pa so bile že pred časom opuščene (slika 2, preglednica 1), zato je neposredna primerjava med postajami otežena. Ker se meteorološki postaji Nova vas na Blokah (720 m) in Babno polje (753 m) nahajata na nekoliko večji nadmorski višini kot dno Cerkniškega polja (okoli 550 m), za primerjavo ponujamo še meteorološko postajo Postojna s primerljivo nadmorsko višino (533 m) in reprezentativno dolгим obdobjem meritev. Zaradi redkejšje merilne mreže na kraških planotah dodajamo tudi zgodovinske meritve iz meteorološke postaje Gomance, ki se je nahajala nekaj kilometrov južneje od meje hidrološkega zaledja Cerkniškega polja (preglednica 1, slika 1).

Povprečna temperatura zraka v okoli 70-letnem obdobju meritev je v Postojni (533 m) znašala 9,1 °C, kar je nekoliko več kot je bilo v obdobju 1969–1977 na Dolenjem Jezeru (8,3 °C) na podobni nadmorski višini. Na skoraj 200 m večji nadmorski višini v Novi vasi na Blokah (720 m) je bila temperatura še nekoliko nižja (7,6 °C), na Babnem polju (753 m) pa 6,5 °C. Letna dinamika temperature kaže podobno porazdelitev z najtoplejšim mesecem julijem in najhladnejšem mesecem januarjem, ko je povprečna temperatura na skoraj vseh lokacijah negativna (preglednica 1). Podrobnejša primerjava med meteorološkimi postajami kaže, da so razlike v povprečni temperaturi najmanjše v topli polovici leta, največje pa v hladni, ko se sicer na dnu vseh kraških polj pojavlja temperaturni obrat (slika 3), a je ta izrazitejši na Blokah in Babnem polju.

Preglednica 1: Povprečna mesečna in letna temperatura zraka (°C) na meteoroloških postajah v okolici Cerkniškega polja. Pod imenom postaje je navedena njena nadmorska višina in obdobje zajetih podatkov. Modri odtenki prikazujejo nižje, rdeči pa višje temperature zraka (vir podatkov ARSO, 2023a).

	Postojna 533 m 1954–2022	Dolenje Jezero 553 m 1969–1977	Nova vas na Blokah 720 m 1957–2022	Babno polje 753 m 1950–2022	Gomance 937 m 1953–1970	Mašun 1027 m 1972–1985	Poljane na Notranjskem 1030 m 1969–1984
Januar	-0,1	0,1	-2,0	-3,0	-2,1	-3,0	-1,3
Februar	1,0	0,9	-0,7	-1,9	-1,4	-2,3	-1,4
Marec	4,2	3,1	2,6	1,2	1,0	1,0	1,6
April	8,1	7,4	6,8	5,8	5,5	4,3	4,8
Maj	12,8	12,7	11,7	10,6	9,8	9,0	10,0
Junij	16,6	15,5	15,5	14,6	13,5	12,6	13,3
Julij	18,6	17,5	17,3	16,3	15,4	14,6	15,6
Avgust	17,9	16,7	16,4	15,3	14,9	13,8	15,1
September	13,9	13,1	12,4	11,4	12,2	10,7	12,0
Oktober	9,8	8,0	8,1	7,2	7,9	6,6	7,4
November	5,0	5,0	3,5	2,7	3,6	1,4	3,1
December	1,0	-0,7	-0,8	-1,5	-0,1	-1,1	-0,1
POVPREČJE	9,1	8,3	7,6	6,5	6,7	5,6	6,7

Pretekli podatki o temperaturi zraka na višje ležečih postajah Gomance, Mašun in Poljane na Notranjskem kažejo podobno razporeditev temperature preko leta z najvišjimi temperaturami v juliju in najnižjimi v januarju. Povprečna temperatura zraka v celotnem obdobju je bila na Mašunu (1027 m) najnižja (5,6 °C), na Gomancah (937 m) in Poljanah na Notranjskem (1030 m) pa rahlo višja (6,7 °C) kot na precej nižje ležečem Babnem polju (preglednica 1).

Ti dve postaji nista bili postavljeni na dnu kraške globeli, tako da v času meritev nista bili izpostavljeni izrazitemu temperaturnemu obratu. Na to nakazujejo mesečne temperature zraka, ki so v zimskem obdobju (november, december, januar, februar) višje kot na Babnem polju, v preostanku leta pa so zaradi večje nadmorske višine temperature nižje.



Slika 3: V jasnih zimskih nočeh se zrak učinkovito ohlaja, tako da lahko zaledeni obsežna površina jezera (foto: Matej Blatnik).

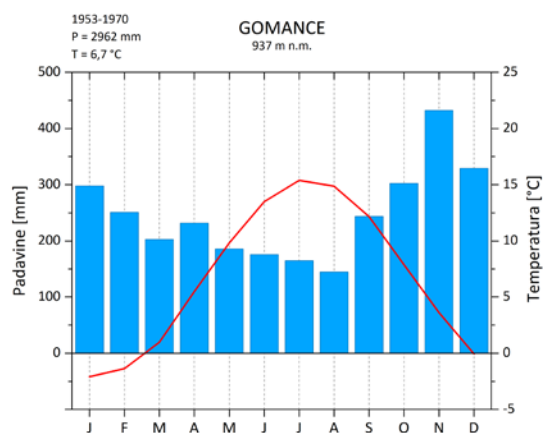
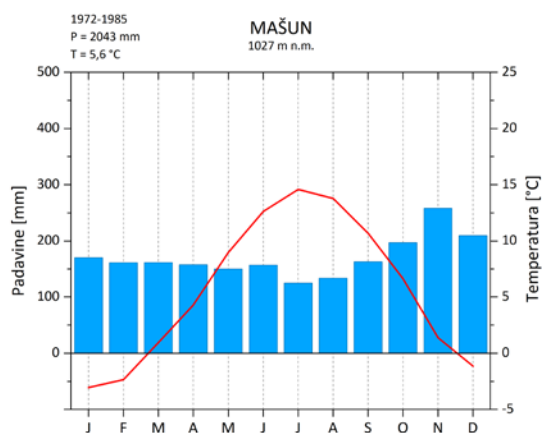
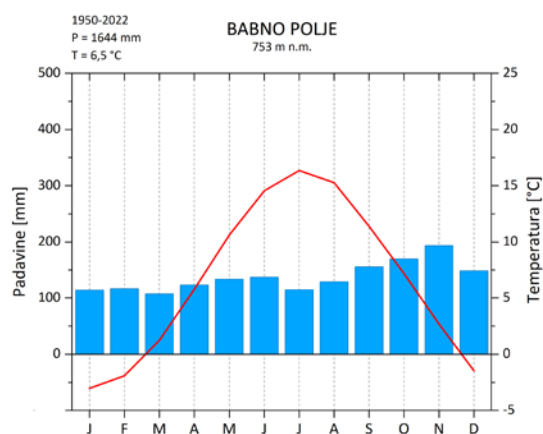
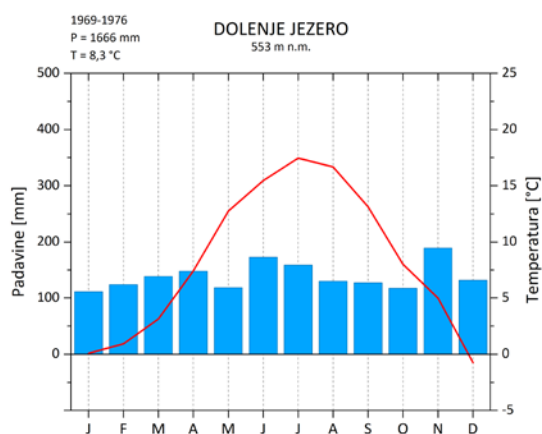
Padavine

Višina padavin v zaledju Cerkniškega polja ima podobno prostorsko razporeditev, kot je značilna za celotno Slovenijo. Vrednost namreč upada od zahoda proti vzhodu, hkrati pa tudi od višjih proti nižjim predelom. Največja je na kraških planotah Javorniki in Snežnik na jugozahodnem obrobju zaledja. Na meteorološki postaji Gomance, ki se sicer nahaja okoli 10 km južneje od južne meje hidrološkega zaledja, je bila povprečna letna višina padavin v obdobju 1951–1970 skoraj 3000 mm (preglednica 2), pri čemer so imela najbolj namočena leta (na primer leto 1962) tudi prek 4000 mm padavin.

Na območju Mašuna in Leskove doline je v obdobju med letoma 1951 in 1985 letna višina padavin rahlo presegala 2000 mm, medtem ko ostale postaje v nižjih predelih hidrološkega zaledja beležijo precej podobne vrednosti, in sicer med 1450 in 1650 mm padavin letno (preglednica 2). Porazdelitev padavin preko leta se med padavinskimi postajami nekoliko bolj razlikuje. Celotno zaledje Cerkniškega polja ima submediteranski padavinski režim, za katerega sta značilna dva padavinska viška. Primarni je jeseni (september–november, ponekod tudi december) z najbolj namočenim mesecem novembrom, sekundarni višek pa je spomladi (april–junij) z najbolj namočenim mesecem junijem (preglednica 2, sliki 4 in 5). Najbolj sušni meseci so pozimi (januar–marec) z glavnim nižkom januarja, sekundarni nižek pa je julija (preglednica 2, slika 4). Razmerje med najbolj sušnim in najbolj namočenim mesecem v večinskem (manj hribovitem) delu hidrološkega zaledja je 100 : 170 mm.

Preglednica 2: Povprečna mesečna in letna višina padavin (v mm) v okolici Cerkniškega polja. Pod imenom postaje je navedena njena nadmorska višina in obdobje zajetih podatkov. Temnejši odtenki zelene barve odražajo večjo višino padavin, svetlejši manjšo (vir podatkov ARSO, 2023a).

	Postojna 533 m 1954– 2022	Cerknica 569 m 1948– 2022	Šmarata 579 m 1962– 2022	Sveti Vid 851 m 1961– 2006	Hrib 827 m 1948– 2022	Nova vas na Blokah 720 m 1950– 2022	Babno polje 753 m 1950– 2022	Gomance 937 m 1951– 1970	Leskova dolina 794 m 1952– 1975	Mašun 1027 m 1951– 1985	Poljane na Notr. 1030 m 1969– 1984
Januar	102	112	93	83	97	91	114	298	161	170	97
Februar	97	109	94	85	96	96	117	251	164	161	97
Marec	105	109	95	103	95	97	108	203	150	161	114
April	123	128	108	135	124	124	123	232	175	158	121
Maj	129	131	115	127	132	127	133	186	168	150	116
Junij	133	149	130	160	139	138	137	176	147	157	140
Julij	107	130	108	136	123	120	115	165	140	125	120
Avgust	116	132	128	145	131	135	129	145	126	134	130
September	153	154	139	153	146	149	156	244	158	163	126
Oktober	154	151	146	149	154	147	170	303	207	197	143
November	165	176	172	158	167	154	194	432	243	258	143
December	143	148	125	115	123	122	149	329	212	210	119
SKUPAJ	1528	1631	1452	1550	1526	1498	1644	2962	2049	2043	1467



Slika 4: Sezonska dinamika v temperaturi in višini padavin za izbrane meteorološke postaje v različnih časovnih obdobjih (vir podatkov ARSO, 2023a).

Opisani vzorec padavin je še posebej izrazit na postaji Gomance, nekoliko manj izrazit pa na postajah Mašun in Leskova dolina. Poljane na Notranjskem tako z vidika količine kot tudi razporeditve padavin kažejo značilnosti, kakršne imajo nižje ležeče postaje. Opisana prostorska in količinska razporeditev padavin je v največji meri posledica delovanja orografske pregrade, ki ovira prehod prevladujočih tokov zračnih mas z zahoda in jugozahoda in povzroča izrazitejšo padavine na zahodni strani Javornikov. Za vse štiri višje ležeče postaje se opisi nanašajo na arhivske podatke, saj so bile meritve povsod opuščene do leta 1985 (preglednica 2).

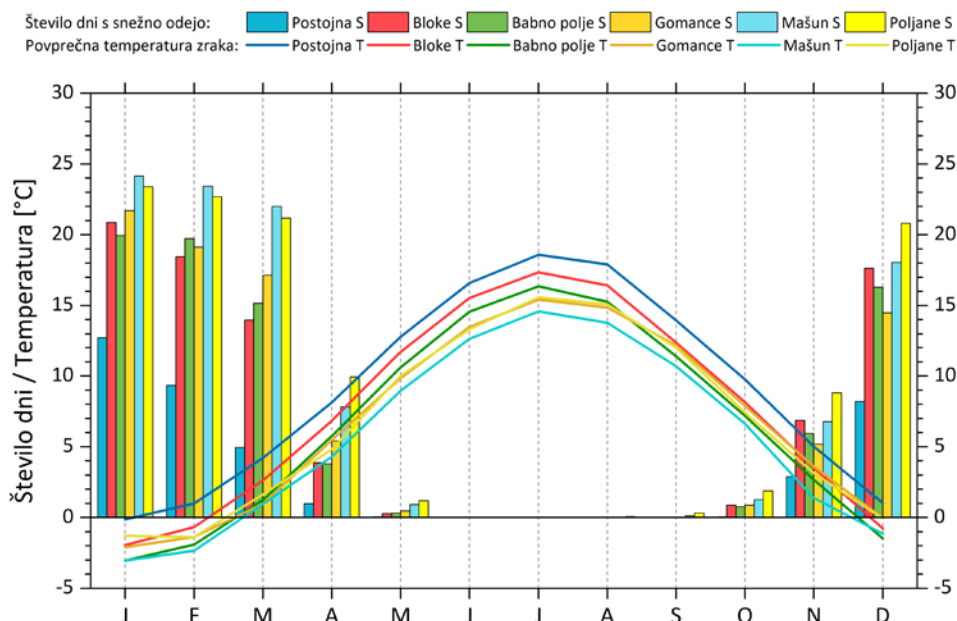
Nekoliko drugačne značilnosti pri sezonski dinamiki padavin kažejo padavinske postaje na kraških planotah (Javorniki in Snežnik). Za njih je značilen le en izrazit padavinski višek, ki je prav tako jeseni z najbolj namočenim mesecem novembrom. Dokaj namočeni so tudi zimski meseci, tako da je primarni jesenski višek spojen s sekundarnim spomladi. Izrazit padavinski nižek je torej le poleti (julij in avgust) (preglednica 2, slika 4).



Slika 5: Ob obilnih padavinah se lahko na nekraških vodotokih, kot je Cerkniščica v kratkem času izrazito povečajo pretoki. Fotografija je bila posneta 17. maja 2021, ko je pretok Cerkniščice narasel na $51 \text{ m}^3/\text{s}$. Srednji pretok je sicer okoli $1 \text{ m}^3/\text{s}$ (foto: Matej Blatnik).

Snežna odeja

Trajanje snežne odeje je v največji meri odvisno od nadmorske višine in z njo povezano temperaturo (slika 6). Pomembno vlogo lahko predstavljajo tudi geomorfološke značilnosti območja, kot na primer lega v kotanji in z njo povezani temperaturni obrati v hladni polovici leta. Glede na trajanje in največjo višino snežne odeje v sezoni je meteorološke postaje v zaledju Cerkniškega polja mogoče razdeliti v tri skupine. Visoke dinarske planote Javornikov, Snežnika in Racne gore (slika 7) imajo glede na meritve na Mašunu, v Leskovi dolini in na Poljanah na Notranjskem v povprečju po 100–110 dni letno prisotno snežno odejo, največja debelina pa je v povprečju 75–90 cm (preglednica 3).



Slika 6: Sezonska dinamika v trajanju snežne odeje na izbranih meteoroloških postajah, kjer se beleži tudi temperatura zraka (vir podatkov ARSO, 2023a).

Meteorološka postaja Postojna se nahaja izven zaledja Cerknškega polja in glede na trajanje (v povprečju 40 dni letno) in največjo višino snežne odeje (povprečno 30 cm) zaradi svoje lege odstopa od drugih lokacij meritev znotraj zaledja Cerknškega polja (preglednica 3).

Preglednica 3: Povprečno mesečno in letno trajanje snežne odeje (dnevi) v zaledju Cerknškega polja in njegovi okolici. Pod imenom postaje je navedena njena nadmorska višina in obdobje zajetih podatkov. Temnejši odtenki zelene barve odražajo daljše trajanje snežne odeje, svetlejši odtenki kažejo krajše trajanje ali odsotnost. Spodnja vrstica prikazuje povprečno največjo višino snega (cm) (vir podatkov ARSO, 2023a).

	Postojna 533 m 1954– 2022	Cerknica 569 m 1948– 2022	Šmarata 579 m 1962– 2022	Sveti Vid 851 m 1961– 2006	Hrib 827 m 1948– 2022	Nova vas na Blokah 720 m 1950– 2022	Babno polje 753 m 1950– 2022	Gomance 937 m 1951– 1970	Leskova dolina 794 m 1952– 1975	Mašun 1027 m 1951– 1985	Poljane na Notr. 1030 m 1969– 1984
Januar	13	16	16	20	20	21	20	22	24	24	23
Februar	9	14	14	17	18	18	20	19	24	23	23
Marec	5	8	8	14	14	14	15	17	22	22	21
April	1	2	2	4	4	4	4	5	8	8	10
Maj	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
Junij	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Julij	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Avgust	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
September	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Oktober	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	2
November	3	4	4	7	6	7	6	5	6	7	9
December	8	13	12	18	18	18	16	15	17	18	21
SKUPAJ	39	57	57	81	81	83	82	84	102	105	110
POVPREČNA NAJVEČJA VIŠINA SNEGA	30	45	42	60	64	59	59	62	76	82	91

Sneg je večinoma prisoten od decembra do marca, relativno pogosto tudi v novembru in aprilu, redko pa oktobra ali maja. Nizke planote (Sveti Vid) in višje ležeča kraška polja (Babno polje, Bloke in sosednji Loški Potok) imajo v povprečju okoli 80 dni s snežno odejo letno, največja debelina v sezoni pa je običajno okoli 60 cm. Snežna odeja je večinoma prisotna med decembrom in marcem, redkeje novembra in aprila (preglednica 3). Podobno dinamiko ima tudi debelina snežne odeje na postaji Gomance na nekoliko večji nadmorski višini, a ta lokacija zaradi položaja izven kraške globeli ni tako izpostavljena temperaturnemu obratu. Najnižji predeli zaledja, in sicer dna Cerkniškega in Loškega polja, imajo sneg v povprečju do 60 dni letno, največja debelina snežne odeje v sezoni pa je običajno okoli 40–45 cm. Sneg je večinoma prisoten med decembrom in februarjem, pogosto marca, redkeje pa novembra in aprila.



Slika 7: Rahlo zasneženo obrobje Cerkniškega polja (naselje Goričice) in bolj zasneženo hribovito zaledje (Racna Gora) (foto: Matej Blatnik).

Evapotranspiracija in efektivne padavine

Pomembna spremenljivka pri podnebnih značilnostih določenega območja je tudi evapotranspiracija. Ta kaže, kakšna je izguba vode zaradi izhlapevanja ali porabe rastlin. V hidrološkemu zaledju Cerkniškega polja sta samo dve meteorološki postaji, na katerih se spremlja potencialno evapotranspiracijo, in sicer Nova vas na Blokah in Babno polje (ARSO, 2023b). Obe postaji se nahajata na podobni nadmorski višini – 720 oz. 753 m. Za primerjavo z dnem Cerkniškega polja prilagamo tudi podatke z meteorološke postaje Postojna (533 m). Pri računanju potencialne evapotranspiracije se sicer uporablja Penman-Monteithova metoda, ki upošteva temperaturo zraka, relativno zračno vlago, hitrost vetra in sončno sevanje (ARSO, 2023c).

Meritve kažejo, da potencialna evapotranspiracija najbolj sledi dinamiki temperature zraka – višja kot je temperatura, večja je poraba vode. V obdobju 1961–2016 je bila največja potenci-

alna evapotranspiracija v juliju, in sicer med 114 mm na Babnem polju in 131 v Postojni. V tem mesecu je ta približno tako velika kot višina padavin, v primeru Postojne pa je celo večja in s tem predstavlja negativno bilanco (preglednica 4). Najmanjša potencialna evapotranspiracija je v decembru in januarju, ko znaša med 8 in 15 mm. Ker sta ta meseca v zaledju Cerkniškega polja relativno sušna, vrednost efektivnih padavin (razlika med padavinami in potencialno evapotranspiracijo) v tem obdobju ni največja. Količina efektivnih padavin je največja v novembru, ko je največ padavin, evapotranspiracija pa je skoraj najmanjša v celotnem letu (preglednica 4).

Na celoletni ravni je bila v obdobju 1961–2016 največja potencialna evapotranspiracija na najnižje ležeči meteorološki postaji Postojna, in sicer okoli 770 mm. To je približno polovica letne vsote padavin, tako da efektivnih padavin ostaja okoli 800 mm. Zaradi nižjih temperatur je na Blokah in na Babnem polju potencialna evapotranspiracija na letni ravni manjša – okoli 660 mm. Posledično je efektivnih padavin več, in sicer okoli 870 mm na Blokah in 1050 mm na Babnem polju. Povprečje vrednosti na vseh postajah je okoli 1600 mm padavin, okoli 700 mm potencialne evapotranspiracije in kot končna razlika okoli 900 mm efektivnih padavin (preglednica 4).

Preglednica 4: Povprečna mesečna in letna višina padavin, evapotranspiracija (ET) in vrednost efektivnih padavin (mm) v hidrološkem zaledju Cerkniškega polja in njegovi okolici v obdobju 1961–2016. Pod imenom postaje je navedena njena nadmorska višina. Temnejši odtenki zelene barve kažejo večjo vrednost, svetlejši odtenki pa manjšo (vir podatkov ARSO, 2023b).

	Postojna 533 m			Nova vas na Blokah 720 m			Babno polje 753 m			SKUPAJ		
	Padavine	ET	Efektivne padavine	Padavine	ET	Efektivne padavine	Padavine	ET	Efektivne padavine	Padavine	ET	Efektivne padavine
Januar	103	15	88	87	10	77	117	10	107	102	12	91
Februar	106	25	80	102	17	85	131	17	114	113	20	93
Marec	108	47	61	105	36	69	119	35	84	111	39	71
April	129	72	57	130	62	68	132	62	70	130	65	65
Maj	131	98	33	124	91	33	137	90	47	131	93	38
Junij	136	118	18	151	109	42	156	106	50	148	111	37
Julij	105	131	-25	122	118	4	115	117	-2	114	122	-8
Avgust	115	113	2	138	99	38	134	97	38	129	103	26
September	161	73	87	151	63	88	157	63	94	156	66	90
Oktober	154	42	112	148	33	115	170	35	134	157	37	120
November	178	22	156	164	16	148	209	17	191	184	18	165
December	140	13	127	115	8	107	138	8	130	131	10	121
SKUPAJ	1566	769	797	1537	663	873	1714	658	1056	1605	697	909

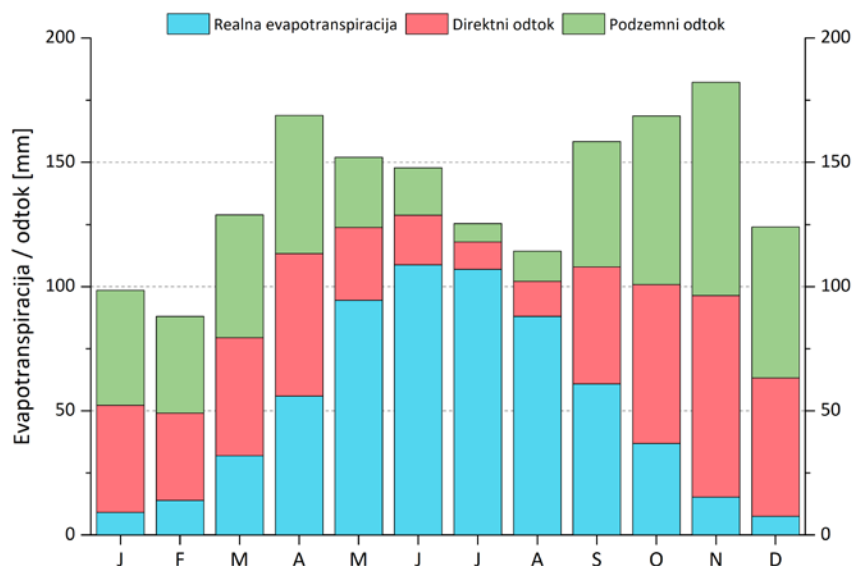
Modelska vodna bilanca

Glavne komponente vodne bilance zaledja Cerkniškega polja smo izračunali iz rezultatov modela mGROWA (ARSO, 2023d). Analiza je bila opravljena za obdobje 1991–2020 na mesečnem nivoju (slika 8) za del hidrološkega zaledja polja, ki se nahaja znotraj meja Slovenije. Za območje, ki je na ozemlju Hrvaške, potrebnih podatkov ni na voljo. Skupna višina stolpcev (slika 8) prikazuje agregirane vrednosti mesečnih padavin – z dvema viškoma jeseni in spomladi. Modri stolpci predstavljajo izračun realne evapotranspiracije, ki se zaradi upoštevanja meteoroloških spremenljivk in rabe tal na celotnem območju nekoliko razlikuje od predhodno opisane evapotranspiracije, v splošnem pa kaže zelo podobno dinamiko. Največja evapotranspiracija je v poletnih mesecih (julij in avgust) z dobrih 100 mm mesečno, najmanjša pa v zimskih (december in januar) z okoli 10 mm mesečno. Razliko med višino padavin in evapotranspiracijo predstavlja odtok, ki ima zelo velike razlike v sezonskosti. Tako kot pri padavinah, sta dva viška, primarni jeseni in sekundarni spomladi. Poletni nižek odtoka je zaradi velikega izhlapevanja zelo izrazit, sekundarni zimski v februarju pa je manj

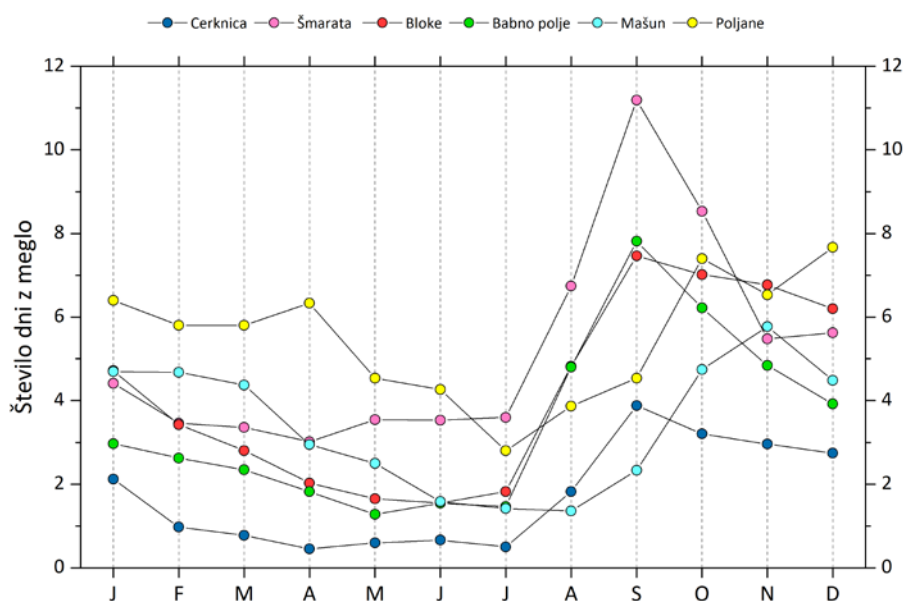
izrazit in je posledica zadrževanja padavin v obliki snega. Zaradi pretežno kraškega površja je na območju Cerkniškega polja okoli polovica odtoka podzemnega (Frantar in sod., 2019).

Megla in veter

Natančno spremljanje pojava megle in vetra je bolj težavno od spremljanja ostalih meteoroloških spremenljivk zaradi premajhnega števila merilnih postaj in časovno preredkega odčitavanja podatkov. Pri nekaterih spremenljivkah (na primer prepoznavanje megle ali nizke oblačnosti) dodatno težavo lahko povzroča tudi subjektivna presoja opazovalca (Zupančič, 2002). Slika 9 prikazuje število dni z meglo za izbrane meteorološke postaje.



Slika 8: Sezonska dinamika v direktnem in podzemnem odtoku ter realni evapotranspiraciji za obdobje 1991-2020 - rezultat modeliranja z modelom mGROWA (vir podatkov ARSO, 2023d).



Slika 9: Sezonska dinamika v številu dni z meglo na izbranih meteoroloških postajah (vir podatkov ARSO, 2023a).

Na večini postaj je največ meglenih dni v septembru, zelo pogosta megla pa je tudi v oktobru, novembru in decembru. Število dni z meglo nato postopoma upada iz meseca v mesec, najmanj pa jih je v juliju.

Med izbranimi postajami je najmanj meglenih dni v Cerknici (v povprečju do 4 dni v septembru), ki se nahaja na dvignjenem obrobju Cerkniškega polja. Zgodovinske meritve na Dolenjem Jezeru, ki se nahaja v nižjih predelih Cerkniškega polja, kažejo na približno dvakratno pogostost dni z meglo (v povprečju do 7 dni z meglo v septembru) (Zupančič, 2002). Na Blokah in Babnem polju so značilnosti podobne tistim na Dolenjem Jezeru (v povprečju do 8 dni v septembru), največje število dni z meglo pa je v Šmarati na Loškem polju (v povprečju do 11 dni v septembru). Višinske postaje na Mašunu in Poljanah na Notranjskem imajo podatke samo za obdobje do leta 1985, je pa razporeditev dni z meglo preko leta nekoliko drugačna. Na obeh postajah je največ dni z meglo v obdobju med oktobrom in decembrom (do 8 dni na mesec), nižek pa je prav tako julija. Do največjih odstopanj prihaja v septembru, ko je dni z meglo bistveno manj kot v nižinskih postajah. Po drugi strani je v obdobju med januarjem in aprilom takšnih dni več (slika 9). Najbolj mogoča razlaga za to pa je, da v veliko primerih niti ne gre za meglo ampak za nizko stratusno oblačnost (Zupančič, 2002).

Veter je na splošno na območju Cerkniškega polja in širše okolice šibek, smer vetra pa v največji meri odvisna od reliefnih značilnosti posamezne lokacije (slika 10). Ob močnejših vetrovih je najpogostejša smer iz jugozahoda, kar sicer velja tudi za celotno Slovenijo. Precej pogosta smer vetra je tudi iz severovzhoda (burja). Za ta veter je sicer značilno, da se pojavlja v sunkih, najpogosteje v zimskih mesecih in po nekaj dni zapored (Zupančič, 2002).

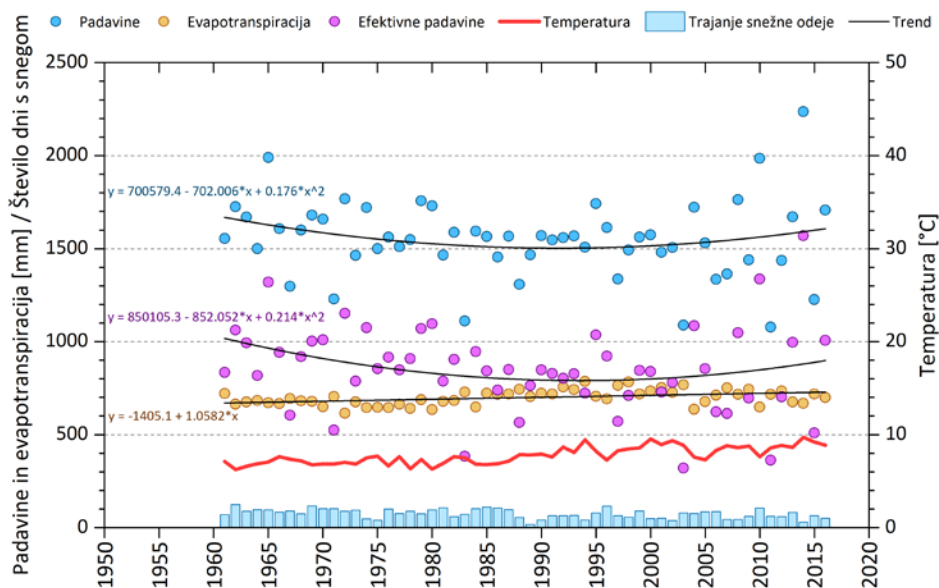


Slika 10: Ob šibkem jugozahodnem vetru nad pobočjem Slivnice občasno letajo »novodobne coprnice« oziroma jadralski padalci (foto: Ana Kafol).

Trendi temperature, padavin, evapotranspiracije in trajanja snežne odeje

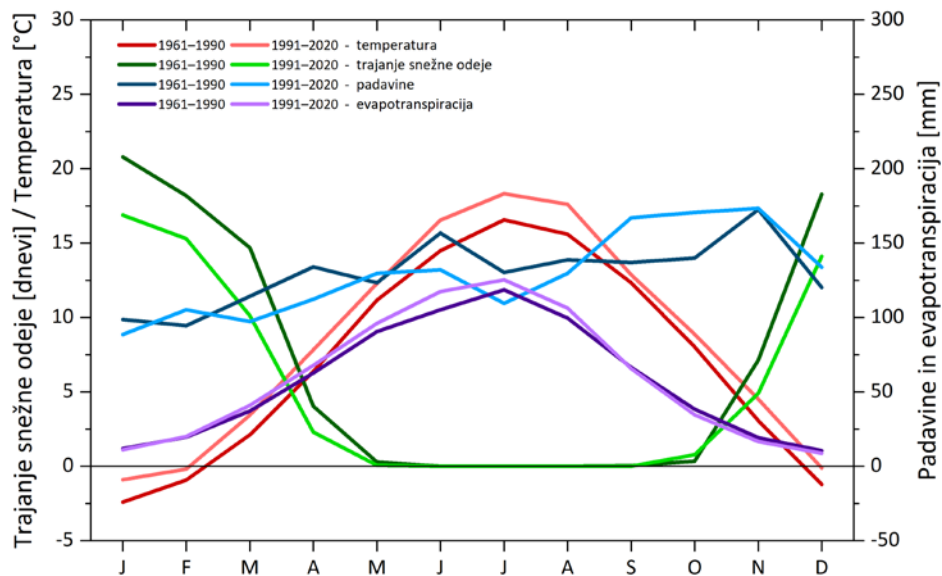
Vrednosti izbranih meteoroloških spremenljivk so izračunane na ravni celotnega povprečja, pri čemer smo temperaturo zraka in potencialno evapotranspiracijo izračunali kot povprečje med tremi meteorološkimi postajami (Nova vas na Blokah, Babno polje in Postojna), padavine in trajanje snežne odeje pa kot povprečje med šestimi meteorološkimi postajami (Cerknica, Šmarata, Sveti Vid, Hrib, Nova vas na Blokah in Babno polje). Za zgoraj navedene postaje je na voljo dolgoročni niz podatkov med letoma 1961 in 2016, pri drugih postajah (predvsem višje ležečih) dolgoročnih zveznih meritev žal ni.

Temperaturna dinamika kaže pozitiven trend s porastom okoli 4 °C/100 let. Posledično je pozitiven trend tudi pri potencialni evapotranspiraciji s porastom okoli 105 mm/100 let. Zaradi višjih temperatur je število dni s snežno odejo vse manjše – v analiziranih 55 letih je vsako leto približno 0,7 dneva krajše trajanje snežne odeje (Blatnik in sod., 2022; 2024). Ob nadaljevanju takšnega trenda bi bilo čez 100 let za 66 dni krajše trajanje snežne odeje v letu oziroma skorajšnja odsotnost snega (sliki 11 in 12). Višina padavin nima izrazitega linearnega trenda. Do leta 2000 je precej dobro viden upad v višini padavin, po tem letu pa so vrednosti zelo razpršene (pogosta sušna ali zelo namočena leta) z rahlo dvigajočim trendom. Podobno dinamiko kot padavine ima tudi količina efektivnih padavin. Do leta 2000 je trend negativen (Kovačič in sod., 2020), po tem letu pa rahlo pozitiven a z zelo veliko razpršenostjo vrednosti (slika 11).



Slika 11: Letna dinamika temperature, padavin, potencialne evapotranspiracije, efektivnih padavin in trajanja snežne odeje v hidrološkemu zaledju Cerkniškega polja v obdobju 1961–2016 (vir podatkov ARSO, 2023a; b).

Slika 12 prikazuje primerjavo v izbranih meteoroloških spremenljivkah na mesečni ravni za dve referenčni obdobji, in sicer 1961–1990 in 1991–2020. Dinamika temperature zraka kaže porast v vseh mesecih, pri čemer je največji porast (tudi do 2 °C v 30 letih) v poletnih mesecih (junij, julij in avgust). Trajanje snežne odeje je krajše v skoraj vseh mesecih, ko se ta sicer pojavi. Največji upad števila dni s snežno odejo je v mesecih, ko je ta najdlje prisotna (december, januar, februar in marec). V teh mesecih je v 30-letnem obdobju po štiri dni s snegom manj. Edini mesec z nekoliko daljšo prisotnostjo snežne odeje je oktober, ko je snežna odeja sicer zelo redko, razlika pa je lahko povezana s povečano pogostostjo meteoroloških ekstremov (slika 12).



Slika 12: Mesečna dinamika temperature, padavin, evapotranspiracije in trajanja snežne odeje v hidrološkemu zaledju Cerkniškega polja v obdobjih 1961–1990 in 1991–2020 (vir podatkov ARSO, 2023a; b).



Slika 13: Ob poletnih sušah, ko je padavin malo, evapotranspiracija pa je velika, lahko presahnejo tudi najdlje poplavljeni območja Cerkniškega polja, kakršen je Zadnji kraj (foto: Matej Blatnik)

Višina padavin ne kaže izrazitega trenda sprememb. Primerjava dveh obdobjev kaže, da je predvsem spomladi in poleti višina padavin nekoliko manjša, medtem ko je pozimi (december, januar, februar) podobna, jeseni (predvsem september in oktober) pa je večja (Blatnik in sod., 2022;

2024). Podobne značilnosti kaže tudi analiza padavin v posameznih letnih časih (Miklič in Trobec 2023). Potencialna evapotranspiracija je precej povezana s temperaturo in za večji del leta kaže porast. Največji porast je v poletnih mesecih (do 12 mm v juliju), nekoliko manjši spomladi in v začetku jeseni, kar se odraža v vse pogostejšem daljšem sušnem obdobju (slika 13). V zimskem in predvsem jesenskem obdobju 1991–2020 je evapotranspiracija manjša kot v obdobju 1961–1990 in sicer do okoli 2 mm mesečno (slika 12).

Zaključek

Zaradi velike dinamičnosti hidroloških procesov in z njimi povezano biotsko raznovrstnostjo so kraška presihajoča jezera še posebej dovzetna na vplive različnih okoljskih sprememb. V prispevku smo predstavili poglobljene podnebne značilnosti hidrološkega zaledja Cerkniškega polja, saj njihovo poznavanje omogoča boljše razumevanje hidrološke dinamike pojavljanja Cerkniškega presihajočega jezera ter lažje predvidevanje morebitne spremembe njegovega hidrološkega režima.

Na obravnavanem območju so večdesetletna zbiranja podatkov pokazala na vse bolj izrazite vplive podnebnih sprememb. Sezonska dinamika in dolgoročni trendi kažejo naslednje značilnosti:

- Temperatura z višino upada, na vseh postajah je najvišja julija in najnižja januarja. V hladni polovici leta je pogost temperaturni obrat, ki je še zlasti pogost na dnu kraških polj. Dolgoročni trendi kažejo porast temperature, še zlasti v spomladanskih in poletnih mesecih (do 4 °C/100 let).
- Višina padavin v splošnem upada z zahoda proti vzhodu zaradi smeri potovanja zračnih mas in zaradi učinkovanja orografske pregrade Javornikov in Snežnika. Značilna sta dva viška (primarni jeseni in sekundarni spomladi) in dva nižka (primarni zimski in sekundarni poletni). Dolgoročni trendi kažejo na rahel porast padavin jeseni in upad v preostalih letnih časih. Od leta 2000 je povečana pogostost let z zelo malo ali veliko padavinami. Zaradi povečanja temperature je vse manj padavin v obliki snega, kar pomeni vse manjše število dni s snegom.
- Potencialna evapotranspiracija sledi dinamiki temperature, kar pomeni, da je največja poleti in najmanjša pozimi, v splošnem pa upada z nadmorsko višino. Zaradi porasta temperature dolgoročni trendi kažejo tudi porast v potencialni evapotranspiraciji.
- Rezultati modeliranja vodne bilance kažejo, da je dejanska evapotranspiracija nekoliko manjša od potencialne, saj model upošteva vse glavne meteorološke spremenljivke in dejansko rabo tal za celotno območje Cerkniškega polja. Letna dinamika dejanske evapotranspiracije je sicer podobna potencialni in kaže, da je posledičen odtok (razlika med padavinami in dejansko evapotranspiracijo) najmanjši poleti, največji pa jeseni in spomladi.
- Megla je zelo značilen pojav za kraška polja in se najpogosteje pojavlja v jeseni (september–november), medtem ko je dinamika na postajah z večjo nadmorsko višino drugačna in pri merjenju lahko zaznava tudi nizko oblačnost.

Podrobnejša analiza kaže na opazne spremembe tako v sezonski kot tudi v dolgoročni dinamiki, kar vpliva na spremenjeno poplavno dinamiko Cerkniškega polja in nanjo vezane spremembe habitatov. Velika pestrost habitatov je nekakšen zaščitni znak Cerkniškega polja, to pestrost pa bi nadaljnje spremembe v podnebjju lahko tudi ogrozile.

Summary

Climatological conditions of the Cerknica Polje recharge area - general characteristics, trends and expected future dynamics

The Cerknica Polje and its recharge area lie in southwestern Slovenia, which is characterized by the temperate continental type of the climate. There are also some influences of the mountainous type of the climate, which is characteristic for the highest areas in high Dinaric plateaus Javorniki and Snežnik. In the lowest areas there is the influence of the Submediterranean climate.

The Slovenian Environment Agency has been conducting continuous meteorological observations for over 70 years at different parts of the recharge area. High resolution and diversity of measurements show different patterns on both seasonal and long-term scale. They can be summarized as follows:

- The temperature decreases with altitude. At all meteorological stations the highest temperature is in July and the lowest in January. In the cold half of the year, thermal inversion occurs, which is especially common at the bottom of the karst poljes. Long-term measurements show an increase in temperature, especially in the spring and summer months (up to 4°C/100 years).
- The amount of precipitation generally decreases from west to east due to the typical movements of the air masses and because of the orographic barrier of Javorniki and Snežnik mountains. Two high peaks (primary in autumn and secondary in spring) and two low peaks (primary in winter and secondary in summer) are typical. Long-term trends show a slight increase in precipitation in autumn and a decrease in the rest of the year. Since 2000, there has been an increase in the frequency of years with very low or high precipitation. Due to the increase in temperature, there is a lower percentage of the precipitation that falls as snow and as a result there is a decreasing number of days with snow.
- Potential evapotranspiration follows the temperature dynamics, which means that it is the highest in summer and the lowest in winter. Due to lower temperature and different land use (more forests) it generally decreases with altitude. Due to the rise in temperature, long-term trends also show an increase in potential evapotranspiration.
- The results of the water balance modelling show that the actual evapotranspiration is slightly lower than the potential, since the model considers all the main meteorological variables and actual land use for the entire area of the Cerknica Polje recharge area. The annual dynamics of actual evapotranspiration is similar to the potential evapotranspiration and shows that the resulting runoff (the difference between the amount of precipitation and actual evapotranspiration) is the highest in autumn and spring and the lowest in the summer.
- Fog is a very characteristic phenomenon for karst poljes and occurs most often in autumn (September–November), while the dynamics at higher stations is different and low clouds can also be detected during observations.

A more detailed analysis shows noticeable changes in both seasonal and long-term dynamics, which is reflected in the changes of the flooding dynamics of the Cerknica Polje. This further impacts on the habitat distribution, where high biodiversity is one of the most characteristic elements of the Cerknica Polje.

Zahvala

Predstavljena vsebina je del raziskave opravljene v sklopu projekta Opredelitev ekohidrološke dinamike Cerkniškega jezera z interdisciplinarnim pristopom raziskave (Z6-2667) in programa Raziskovanje krasi (P6-0119), ki ju finančno podpira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, ter projektov LIFE-TRŠČA (LIFE22-NAT-SI-LIFE TRSCA - 101114184) in eLTER – European Long-Term Ecosystem and socio-ecological Research Infrastructure, ki ju delno financira Evropska Komisija. Uporabljena oprema je bila podprta s projekti Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora – RI-SI-EPOS in RI-SI-LifeWatch.

Viri

ARSO 2017a. Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011, Meteorološka opazovanja I. <https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Meteoroloska%20opazovanja%20I%20splet.pdf> (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2017b. Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011, Meteorološka opazovanja II, A-O. <https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Meteoroloska%20opazovanja%20II%20A-O%20splet.pdf> (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2017c. Podnebna spremenljivost Slovenije v obdobju 1961–2011, Meteorološka opazovanja II, P-Z. <https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/climate/text/sl/publications/Meteoroloska%20opazovanja%20II%20P-Z%20splet.pdf> (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023a. Meteorološki arhiv. URL: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023b. Referenčna evapotranspiracija in padavine samodejnih postaj (dnevni podatki v mm od leta 2017). https://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv_etp/ (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023c. Razlaga spremenljivk. https://meteo.arso.gov.si/uploads/probase/www/agromet/bulletin/sl/bilten.html?ind_podreg=7#razlaga-spremenljivk (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023d. Rezultati vodnobilančnega modela mGROWA-SI. ARSO.

Bernot, F. 1976. Meteorological investigations. V R. Gospodarič, P. Habič (ur.), Underground water tracing: Investigations in Slovenia 1972–1975 (str. 38–42). Postojna, Inštitut za raziskovanje krasi ZRC SAZU.

Blatnik, M., Gabrovšek, F., Ravbar, N., Frantar, P., Gill, L. 2022. Ocena vpliva podnebnih sprememb in človekovih dejavnosti na poplavno dinamiko Cerkniškega polja. V M. Kuhar in sod. (ur.), Raziskave s področja geodezije in geofizike 2022 : zbornik del. (str. 35–46). Ljubljana, Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko.

Blatnik, M., Gabrovšek, F., Ravbar, N., Frantar, P., Gill, L. 2024. Assessment of climatic and anthropogenic effects on flood dynamics in the Cerkniško Polje (SW Slovenia) based on a 70-year observation dataset. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101609. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101609>

Demuth, S. 1989. The application of the west German IHP recommendations for the analysis of data from small research basins. V L. Roald, K. Nordseth, K.A. Hassel (ur.), *FRIENDS in Hydrology. Proceedings*, (str. 47–60), Wallingford, Oxfordshire, International Association of Hydrological Sciences.

Engel, N., Müller, U., Schäfer, W. 2012. BOWAB – Ein Mehrschicht-Bodenwasserhaushaltsmodell. *GeoBe-richte - Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie*, 20, 85–98.

Frantar, P., Herrmann, F., Andjelov, M., Draksler, A., Wendland, F. 2018. Vodnobilančni model mGROWA-SI. 29. Mišičev vodarski dan – zbornik referatov, 199–205.

- Frantar, P., Draksler, A., Herrmann, F., Wendland, F. 2019. Climate change impact on groundwater recharge in Slovenia in the period 2011–2100. Groundwater management and governance: coping with uncertainty. Proceedings of IAH2019, the 46th Annual Congress of the International Association of Hydrogeologists, Málaga (Spain), 172.
- IPCC, 2022. Climate Change 2022. Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. Cambridge, 3056 pp.
- Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N. 2020. Evaluation and quantification of the effects of climate and vegetation cover change on karst water sources: Case studies of two springs in south-western Slovenia. *Water*, 12 (11), 3087. <https://doi.org/10.3390/w12113087>
- Kranjc, A. 1986. Cerkniško jezero in njegove poplave, *Geografski zbornik*, 25, 71–123.
- Miklič, S., Trobec, T. 2023. Sezonske spremembe gladine Cerkniškega jezera v obdobju 1961–2020. *Dela*, 59, 91–120. <https://doi.org/10.4312/dela.59.91-150>
- Ogrin, D. 1996. Podnebni tipi v Sloveniji. *Geografski vestnik*, 68, 39–56.
- Ogrin, D. Repe, B., Štut, L., Svetlin, D., Ogrin, M. 2023. Podnebna tipizacija Slovenije po podatkih za obdobje 1991–2020, *Dela*, 59, 5–45. <https://doi.org/10.4312/dela.59.5-89>
- Smrekar, A. 2000. Cerkniško polje kot primer poseljenega kraškega ranljivega območja. *Geographica Slovenica*, 33(1), 117–156.
- Zupančič, B. 2002. Klima. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 4–17). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Žibrik, K., Lewicki, F., Pičinin, A. 1976. Hydrologic investigations. Investigations in Ljubljana river basin, Investigations before the tracing test 1972–1975. V R. Gospodarič, P. Habič (ur.), *Underground water tracing: Investigations in Slovenia 1972–1975* (str. 43–56). Postojna, Inštitut za raziskovanje krask ZRC SAZU.

Hidrološke značilnosti Cerknškega polja – sezonska in dolgoletna dinamika v količini in kakovosti vode ter vpliv človekovih posegov

Matej Blatnik, Nataša Ravbar, Metka Petrič, Franci Gabrovšek, Peter Frantar, Mišo Andjelov, Florjana Ulaga

Uvod

Cerkniško jezero je največje presihajoče jezero v Sloveniji in zaradi svoje pestre dinamike poplavljanja in presihanja ter velike biotske raznovrstnosti že več kot 300 let predmet številnih znanstvenih raziskav. Med raziskavami, povezanimi s hidrološko tematiko, večinoma prevladujejo tiste, ki se nanašajo na dinamiko poplavljanja, smeri pretakanja vode, analizo kakovosti vode, ugotavljanje vpliva podnebnih sprememb in nenazadnje tudi prilagajanje človeka na spremenljivo dinamiko poplav.

Prve znane omembe Cerknškega jezera so nastale pred okoli 2000 leti in so delo grškega geografa Straba (Shaw in Čuk, 2015), kar nakazuje, da je bilo jezero dobro poznano že v antiki. Prve podrobnejše opise napajanja in odtekanja vode na jezeru je leta 1551 napravil Georg Wernher (Shaw in Čuk, 2015), prispevek pa je obogatil tudi z nazorno ilustracijo dotokov in požiralnih območij. Verjetno najbolj poznano zgodovinsko delo, ki že zelo dobro pojasnjuje dinamiko poplavljanja Cerknškega polja, pretakanje ter skladiščenje podzemne vode, ter način življenja ljudi na tem območju, je napravil Janez Vajkard Valvasor v delu Slava Vojvodine Kranjske (Valvasor, 1689). Interpretacijo poplavne dinamike jezera so kasneje nadgrajevali Anton Nagel (1748), Franz Anton Steinberg (1758), Balthasar Hacquet (1778–1789) in Thobias Gruber (1781) z ugotavljanjem smeri pretakanja vode v podzemlju in bolj natančnem vključevanju podzemnih jam, dvoran in sifonov, ki s svojo razporeditvijo vplivajo na časovno zamaknjen odziv pri poplavljanju polja, na delovanje estavel in v splošnem na različno dolgo poplavljenost posameznih območij na polju. Konec 19. stoletja je bil zaznamovan s prvimi večjimi človekovimi posegi, predvsem na požiralnem območju, z namenom omejevanja poplav. Dela so potekala pod vodstvom inženirja Viljema Puticka (1889) in se nadaljevala v 20. stoletju. V tem obdobju so bili zaradi različnih interesov določeni posegi napravljeni tudi z namenom daljšega zadrževanja vode (Jenko, 1959; Breznik, 1961; Habič, 1974; Bidovec, 2007). Večina novejših študij je osredotočena na posamično hidrološko problematiko, kot je na primer ugotavljanje smeri podzemnega pretakanja vode in kakovosti vode (Gospodarič in Habič, 1976) ter opredelitev vodne bilance polja (Kovačič, 2010). Vse več je tudi študij, ki za hidrološke analize uporabljajo nove tehnologije hidroloških meritev, grafične in analitične programe ter podatke s satelitskih posnetkov (Mayaud in sod., 2019; Breznik in sod., 2023). Na podlagi vse daljših neprekinjenih hidroloških meritev nekatere študije proučujejo dolgoročne trende vodostajev in ugotavljajo vplive podnebnih sprememb ter človekovih posegov (Kovačič in sod., 2020; Miklič in Trobec, 2023; Blatnik in sod., 2022; 2024).

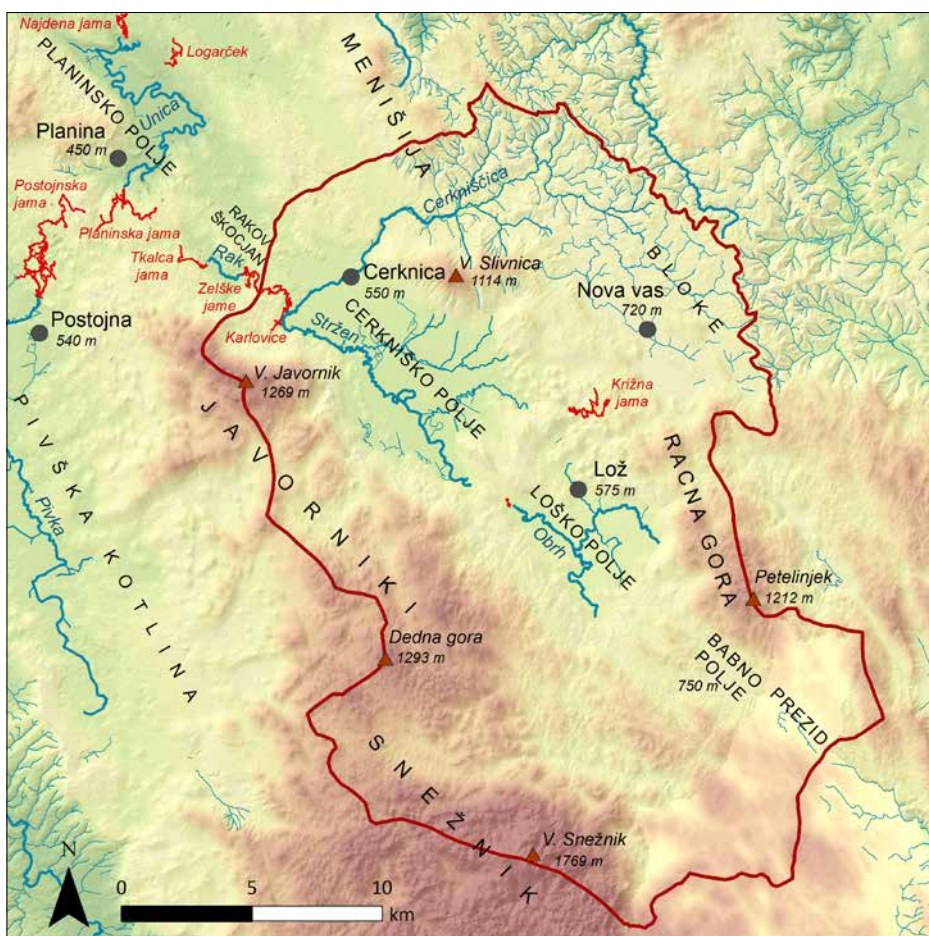
Vse te raziskave so pokazale, da je napajanje Cerknškega polja zaradi številnih dotokov in odtokov zelo zapleteno. K še večji kompleksnosti so prispevali raznoliki človekovi posegi, ki so zaradi različnih interesov pogosto sami sebi nasprotujoči in kljub želji po boljšem nadzoru nad poplavljanjem kažejo negativne učinke. Stanje še dodatno zapletajo podnebne spremembe z vse bolj neenakomerno razporejenimi padavinami in višjimi temperaturami. Rezultat vseh dejavnikov so

vse pogostejše zelo visoke poplave in prav tako vse pogostejše dolgotrajne suše, ki se odražajo v težavah pri vitalnosti določenih habitatnih tipov, pa tudi oteženem delovanju človeka.

V pričujočem prispevku najprej opisujemo splošne značilnosti pretakanja vode na Cerkniškem polju in dinamiko poplavljanja. V nadaljevanju predstavljamo novejšje rezultate raziskav, in sicer značilnosti sezonske in dolgoletne dinamike v pretakanju vode in poplavljanju polja, ki smo jih ugotovili na podlagi analiz dolgoročnih hidroloških meritev, vodenih s strani Agencije RS za okolje (ARSO). Na kratko analiziramo tudi lokalna odstopanja v vodostajih, katera smo ugotovili z lastnimi hidrološkimi meritvami na dodatnih merilnih mestih na polju. Na podlagi celoletnega vzorčenja vode opisujemo prostorsko in časovno razporeditev geokemičnih lastnosti vode. V zaključku predstavljamo tudi novejšje ugotovitve o učinku preteklih človekovih posegov na poplavno dinamiko Cerkniškega polja.

Splošen opis območja

Cerkniško polje je del porečja Ljubljanske, za katerega je značilno izmenjevanje številnih kraških polj in planot, ki imajo prevladujočo orientacijo in razporeditev v dinarski smeri, in sicer severovzhod – jugovzhod. Takšna je denimo slemenitev kraških planot, sosledje kraških polj in splošna smer površinskih in podzemnih vodnih tokov (slika 1).



Slika 1: Hidrološko zaledje Cerkniškega polja (vir podatkov ARSO, 2023e).

Z okoli 40 km² površine je Cerkniško polje največje kraško polje znotraj porečja Ljubljane, hidrološko zaledje, območje, s katerega se napaja jezero, pa je ocenjeno na okoli 475 km² površine (Žibrik in sod., 1976). Najpomembnejša dotoka sta kraška izvira Cemun in Obrh na južnem obrobju polja (sliki 2 in 3). To sta dve skupini izvirov, ki prejemata vodo iz višje ležečih polj (Loško, Babno in Prezidsko polje) (Kranjc, 2002a; Kovačič, 2010). Voda iz teh izvirov se po okoli 300 m toka združi v Stržen (tudi ime Jezerščica), po nadaljnjih 1,5 km toka pa se priključi še Laški studenec. Skupni srednji pretok omenjenih izvirov je ocenjen na okoli 15 m³/s, maksimalni pa okoli 85 m³/s (Žibrik in sod., 1976; Kovačič, 2010).

Pomemben dotok vode je tudi z vzhoda v obliki površinskih vodotokov (Cerkniščica) ali preko kraških izvirov (Martinjščica, Grahovščica, Žerovniščica in Lipsenjščica) (sliki 2 in 3), ki se napajajo iz manj zakraselega dolomitnega območja okolice Slivnice in kraške planote Bloke (Kranjc, 2002a,b; Kovačič, 2010). Vsi vodotoki tečejo preko polja nekaj kilometrov, dokler se ne združijo s Strženom. Lipsenjščica (tudi Štebersčica) se s Strženom združi na najbolj meandrirajočem območju Beli breg in Ključ. Manj vodnati Grahovščica in Martinjščica se najprej združita z Žerovniščico, ta pa nato s Strženom pri vodomerni postaji Dolenje Jezero. Cerkniščica prečka polje na njegovem severnem obrobju in teče neposredno proti ponornemu območju, tako da se s Strženom združi šele tam. Srednji pretok vseh dotokov z vzhoda je okoli 2,5 m³/s, maksimalni pa je lahko prek 70 m³/s (Kovačič, 2010).

Na zahodnem robu polja je več manjših kraških izvirov, ki se napajajo z avtogeno vodo iz kraške planote Javorniki. Na jugozahodnem obrobju polja med večje izvire spadajo Tresenec in Žabjek (odtekata proti Leviščem) ter Otoški Obrh in Mrzlik (odtekata v Zadnji kraj) (Kranjc, 2002a). Na severozahodnem obrobju je najpomembnejši občasni izvir Suhadolca (Kranjc, 2002c), ki se nadaljuje z najmanj 2 km dolgo istoimensko vodno jamo (sliki 2 in 4).

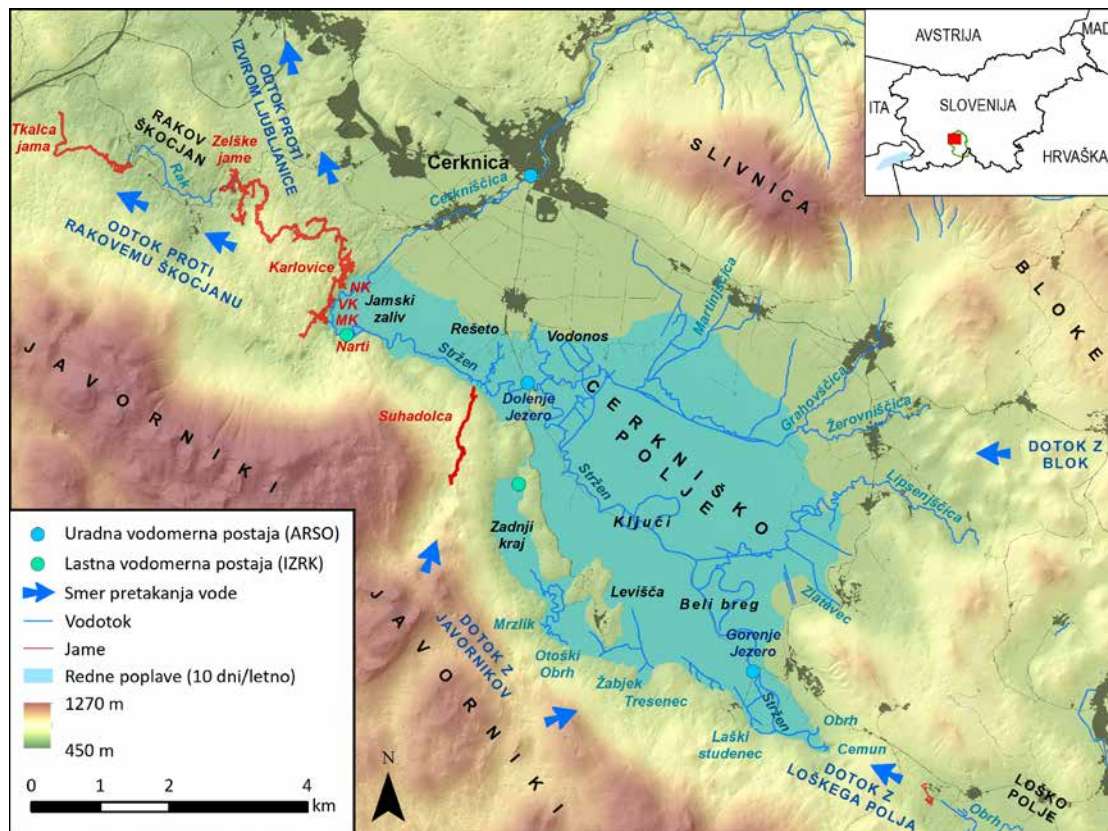
Občasne dotoke vode na Cerkniško polje predstavljajo tudi estavele v Zadnjem kraju (slika 5). Estavele so kraški pojavi z dvojno vlogo – po intenzivnih padavinah te delujejo kot izviri, v času upadanja vodostaja pa kot požiralniki (Kranjc, 2002a).

Najpomembnejše odtočno območje se nahaja na skrajnem severozahodnem delu polja, na območju imenovanem Jamski zaliv (slika 2). Tam voda ponika v številnih požiralnikih, med katerimi najpomembnejšega predstavlja okoli 10 km dolg jamski sistem Karlovice (Kranjc, 2002c; Kataster jam, 2023). Jamski sistem ima dva glavna vhoda: Velika in Mala Karlovica (slika 4), rovi obeh jam pa se spojijo nekaj sto metrov naprej od vhodov. Obstaja tudi tretji veliki vhod, in sicer umetno napravljen 26 m dolg tunel z zapornico za kontroliranje odtoka, ki se imenuje Nova Karlovica. Pomembni ponorni območji sta tudi Svinjska jama ter niz manjših kraških jam in za človeka neprehodnih kraških votlin, ki se nahajajo okoli 500 m jugovzhodno od vhoda v Karlovice in se imenujejo Narti (slika 2). Pomemben del vode odteka v požiralni območji Vodonos in Rešeto, estavele v Zadnjem kraju in skozi manjše ponikve vzdolž struge Stržena, med katerimi je najbolj obsežno Retje.

Od ponornega območja naprej voda teče proti nižje ležečemu Rakovem Škocjanu in Planinskemu polju ter nato proti izvirom Ljubljane pri Vrhniku. Del vode Cerkniškega polja obide ta niz kraških polj in preko Rešeta in Vodonosa teče neposredno proti izvirom Ljubljane, približno 20 km severneje (Gospodarič in Habič, 1976).

Poplave na polju nastanejo, ko dotok vode preseže odtočne zmogljivosti, kar se najpogosteje zgodi jeseni in spomladi, ko je višina padavin največja, evapotranspiracija pa majhna. Ker je dno polja rahlo nagnjeno in ima najnižje dele na zahodni strani, so ta območja poplavljenaja najdlje, do približno 8 mesecev letno na območju Rešeta in Levišč. Ojezerjena površina (slika 2) je

lahko velika do okoli 26 km² (slika 6), na polju pa se uskladišči do okoli 70 milijonov m³ vode (ob povprečni globini vode 2,7 m) (Gams, 1970; Kranjc, 1986; Smrekar, 2000; Ravbar in sod., 2021).



Slika 2: Območje Cerkniškega polja z dotoki, ponornimi območji, splošnimi smermi pretakanja vode, vodomernimi postajami in prikazom območij, ki so poplavljeni najmanj 10 dni letno (vir podatkov ARSO, 2023e; Gabrovšek in sod., 2010; Ravbar in sod., 2021).

Zaradi številnih dotočnih in odtočnih območij, med katerimi imajo nekatera dvojno vlogo, natančna opredelitev vodne bilance polja še ni mogoča. Na podlagi analize razlik v gladini vode v hidrološkem letu 1975 je Kovačič (2010) ocenil, da je bil srednji letni dotok/odtok s polja 23,7 m³/s. Ocenjene maksimalne vrednosti so bile bistveno večje, in sicer z 92 m³/s odtoka in 232 m³/s dotoka. V teh razmerah je okoli 140 m³/s presežka.



Slika 3: Levo izvir Cemuna na južnem obrobju Cerkniškega polja, desno Lipsenjščica (foto: Matej Blatnik).



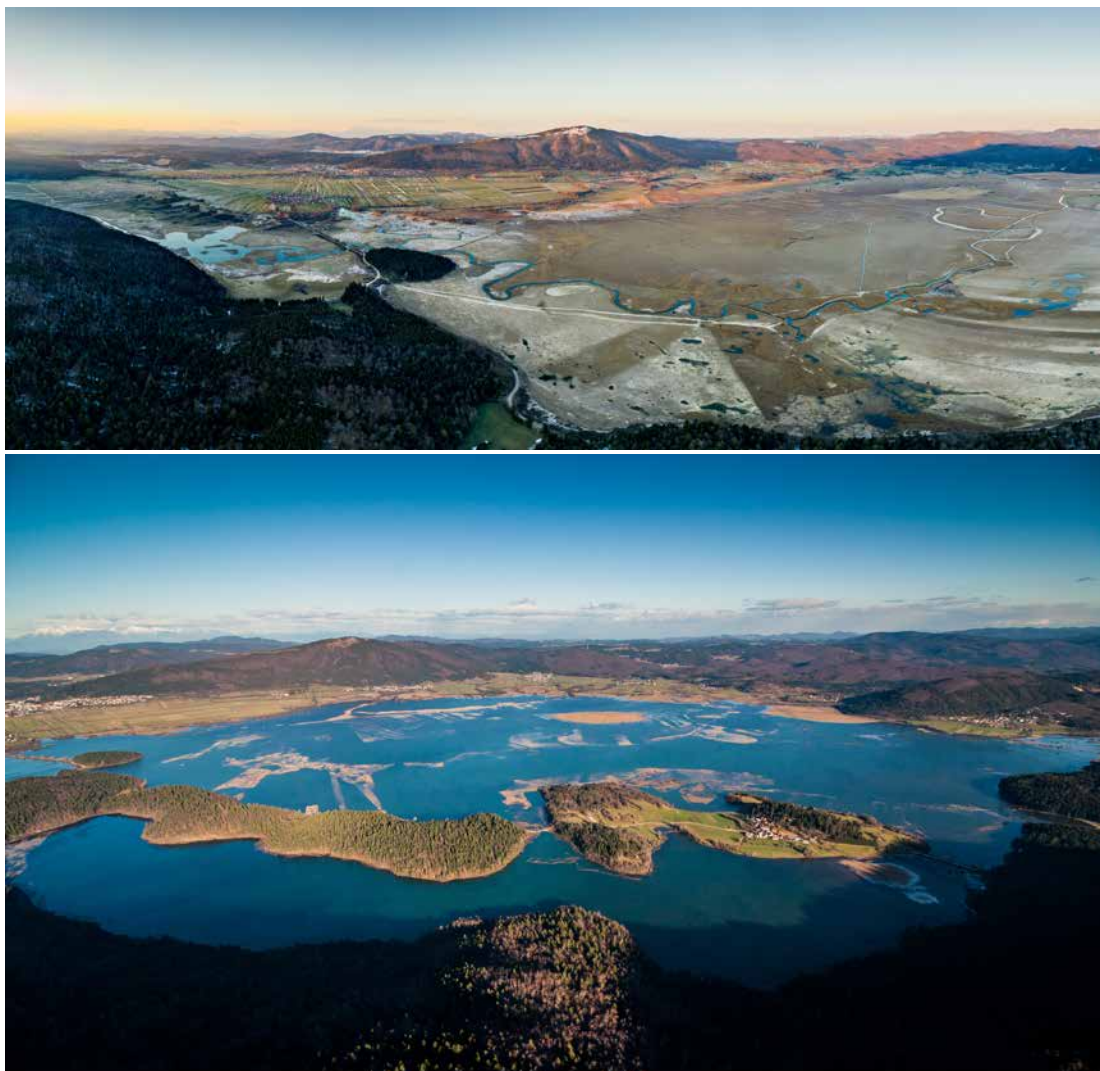
Slika 4: Levo izvir Suhadolce ob visokih vodah in delni zaledenitvi jezera, desno ponorno območje Jamski zaliv z vhodom v Veliko Karlovico, kamor prek kanalizirane struge dotekata Stržen (dotok z leve) in Cerkniščica (dotok z desne) (foto: Matej Blatnik).



Slika 5: Zadnji kraj s številnimi estavelami v času presihanja.

Za nadzor nad poplavljanjem Cerkniškega polja so ljudje v preteklosti izvajali različne aktivnosti. Odvisno od namena (bodisi za omejevanje poplav prek učinkovitejšega otekanja, bodisi za daljše zadrževanje vode) so bile v zadnjih nekaj stoletjih izvedeni različni človekovi posegi, a najboljše delo je bilo opravljeno v sredini 20. stoletja. Da bi mokrotna območja postala primernejša za kmetijstvo, so domačini poglobili in kanalizirali več kilometrov strug (slika 7). Razširili so tudi vhode v največje kraške jame (Mala in Velika Karlovica) in nekatere manjše jame v Nartih. Po drugi strani pa so bili na nekaterih odsekih ob vodotokih zgrajeni manjši jezovi za lokalno zadrževanje vode. Največji jez je bil zgrajen na območju Rešeta (slika 7) z namenom, da ob najnižjih vodostajih vsa voda ne more ponikniti v požiralnike (Bidovec, 2007). Akumulacija vode za tem jezom nekaterim živalskim in rastlinskim vrstam omogoča boljše možnosti preživetja v najbolj sušnih obdobjih.

Precej obsežna dela so bila izvedena tudi v ponornem območju Jamskega zaliva. Večino odprt in so ljudje razširili in obzidali, nekatere tudi prekrili z rešetkami, da bi povečali odtočno zmogljivost ob visokih vodah. Okoli 300 m severno od vhoda v Veliko Karlovico je bil leta 1969 zgrajen 26 m dolg in 3 m širok tunel (Habič, 1974; Kranjc, 1987; Bidovec, 2007), ki predstavlja krajšo povezavo med poljem in jamskimi rovi Velike Karlovice. Vhod v rov ima zapornico za kontroliran iztok iz polja.



Slika 6: Cerknisko polje ob nizkem (zgoraj) in visokem (spodaj) vodostaju (foto: Matej Blatnik).



Slika 7: Levo Stržen z regulirano in renaturirano strugo pri meandrih Ključi, desno območje Rešeta in vodni zadrževalnik (foto: Matej Blatnik).

Ob koncu 60-ih let 20. stoletja so večino požiralnikov poskusno zaprli za 3 leta, da bi preverili možnost koriščenja polja za zadrževanje velike količine vode in postavitev hidroelektrarne. Rezultat so bile nekoliko bolj izrazite poplave, obdobja presihanja pa so se zaradi še vedno prisotnih in spregledanih požiralnikov vseeno pojavljala, a v nekoliko krajših obdobjih. Eksperiment so kasneje opustili, blokade in jezove na požiralnikih pa delno odstranili (Habič, 1974; Kranjc, 1987; Bidovec, 2007).

Metodologija

Večina predstavljenih hidroloških značilnosti je rezultat analiz podatkov, ki smo jih pridobili iz hidrološkega arhiva Agencije Republike Slovenije za okolje (ARSO, 2023a).

Hidrološki podatki večinoma obsegajo meritve temperature vode in vodostaja, na nekaterih lokacijah tudi meritve pretoka. Na Cerkniškem polju dolgoročne zvezne meritve potekajo na treh postajah od leta 1954 in eni od leta 1961 v ločljivosti 30 minut. Opazovanja Cerkniščice potekajo od leta 1961 v naselju Cerknica, merilna postaja pa je približno 15 m nad najnižjim delom polja. Hidrološke lastnosti Stržena se spremlja od leta 1954 na dveh lokacijah, in sicer pri naseljih Gorenje Jezero in Dolenje Jezero. Merilno mesto Gorenje Jezero se nahaja približno 2 km dolvodno od glavnih izvirov Cemun in Obrh, medtem ko je merilno mesto Dolenje Jezero na severozahodnem delu polja dolvodno od sotočij vseh pomembnejših pritokov (slika 2). Ker je lega obeh hidroloških postaj na Strženu dovolj nizko v strugi vodotoka, izmerjeni podatki ob ojezeritvi ne predstavljajo le Stržena ampak tudi nastalo Cerkniško jezero. V preteklosti so bile vzpostavljene tudičasne meritve na Lipsenjščici (1954–1975), Žerovniščici (1955–1985), Grahovščici (1958–1975) in Martinjščici (1962–1975) (ARSO, 2023a).

Za hidrološke podatke (vodostaje in, kjer so na voljo, tudi temperature in pretoke) smo izračunali njihove srednje, najmanjše in največje vrednosti na mesečni in letni ravni. Podatke o mesečnih vrednostih smo uporabili za ugotavljanje sezonske dinamike na posameznih merilnih mestih in za medsebojno primerjavo merilnih mest. S primerjavo vrednosti posameznih mesecev v različnih letih smo ugotavljali trende v sezonski dinamiki vodostajev, pretokov in temperatur. Podatke na letni ravni smo uporabili za ugotavljanje splošnih trendov v vodostajih in pretokih. Izračunane vrednosti za trajanje poplavljanja in najvišje vodostaje po posameznih mesecih smo tudi kartografsko prikazali (program ArcGIS) in sicer na podlagi digitalnega modela višin, pridobljenega z lidarskim snemanjem (ARSO, 2023e).

Za ugotavljanje vplivov podnebnih sprememb in za ugotavljanje hitrosti odziva vodostajev na padavine smo hidrološke podatke primerjali s klimatološkimi (padavine, potencialna evapotranspiracija in efektivne padavine kot razliko med njima) (ARSO, 2023b; 2023c). Vpliv podnebnih sprememb smo opredelili ob primerjavi vodostajev in efektivnih padavin na letni ravni, medtem ko smo za ugotavljanje hitrosti odziva vodostaja na efektivne padavine uporabili dnevne podatke, iz teh pa računali kumulativne vrednosti efektivnih padavin za različno dolga predhodna obdobja (1–100 dni). Za dobljene vrednosti smo izračunali Pearsonov koeficient korelacije. Na voljo so tudi podatki o dejanski evapotranspiraciji in odtoku, izračunani s pristopom mGROWA (Andjelov in sod., 2016; Frantar in sod., 2018; ARSO, 2023d), vendar za krajše obdobje (30 let) in v daljšem časovnem intervalu (1 mesec). Takšna časovna ločljivost žal ne omogoča, da bi te podatke lahko uporabili za podrobnejše analize v tej raziskavi. Se pa izračuni vodne bilance pri pristopu mGROWA za prekrivajoče se časovno obdobje 30 let precej dobro ujemajo z našimi izračuni, tako da ocenjujemo, da so podatki, uporabljeni v tej študiji, dovolj zanesljivi za kompleksnejše analize pri daljšem časovnem obdobju (70 let) in krajšem časovnem intervalu (1 ura).

Za ugotavljanje učinka človekovih posegov smo primerjali dnevne vrednosti vodostajev z efektivnimi padavinami (vsote za 45 predhodnih dni, ki so se izkazali za najbolj verjetne). Podatke smo razvrstili v različna desetletja, v katerih so se izvajali različni človekovi posegi. Pridobljene oblake točk smo pretvorili v krivulje z izračunom drsečih sredin za 2000 zaporednih vrednosti vodostajev glede na določeno višino padavin, pri čemer vsaka dobljena krivulja predstavlja posamično desetletje z različnimi človekovimi vplivi.

V letu 2020 je Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU z namenom ugotavljanja lokalnih odstopanj v vodostajih vzpostavil zvezne meritve vodostajev in temperature vode na dveh dodatnih mestih na Cerkniškem polju. Ta merilna mesta so na območju estavel Zadnji kraj (natančneje Velika Bobnarica) in na ponornem območju Narti v bližini Svinjske jame. Meritve se izvajajo z merilniki *in situ* v ločljivosti 30 minut. V letih 2020–2022 je Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU opravil tudi 13 terenskih meritev in vzorčenj vode na okoli 20 različnih lokacijah na obrobju Cerkniškega polja. Pri tem smo zajeli različna mesta z dotoki vode na polje in njegova požiralna območja, za primerjavo pa tudi nekaj izvirov v Rakovem Škocjanu, ki se napajajo z vodo iz Cerkniškega polja. Terenske meritve so obsegale temperature in specifično električno prevodnost (SEC) vode. Vzorce vode smo analizirali z ionsko kromatografijo, pri čemer je bila pozornost na zaznavanju koncentracije kalcija, magnezija, natrija, kloridov, nitratov in sulfatov (slika 15).

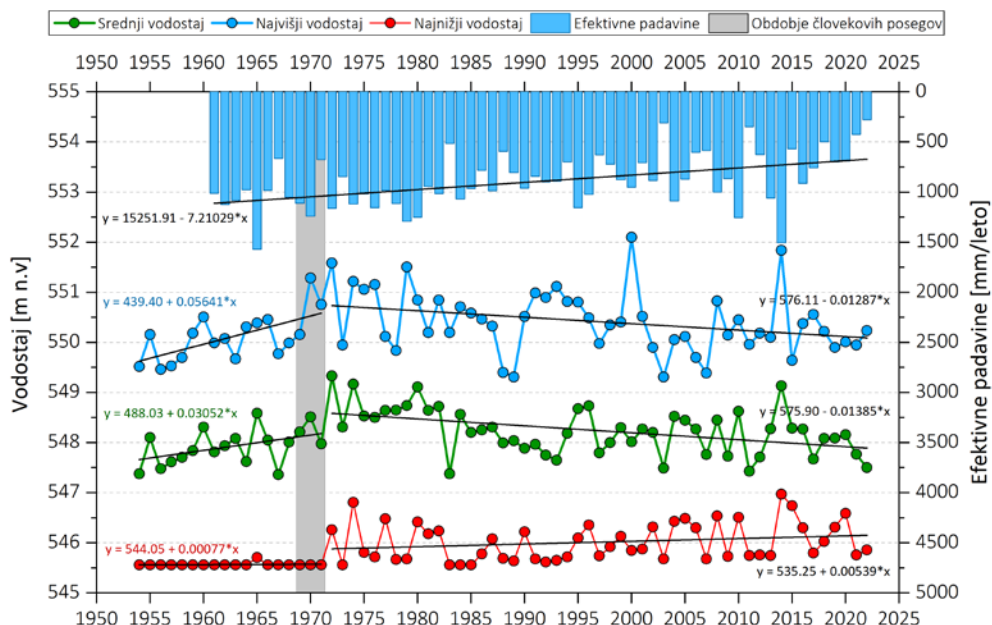
Dinamika vodostajev, pretokov in temperature vode

Splošna dinamika in trendi

Med letoma 1954 in 2022 je bil srednji letni vodostaj na hidrološki postaji Dolenje Jezero (Stržen) 548,15 m n.v., kar ustreza približno 4500 m³ uskladiščene vode na polju. Srednji letni vodostaj je bil najnižji leta 1967 (547,36 m), najvišji pa leta 1972 (549,33 m). Te meritve predstavljajo precej velike razlike med posameznimi leti, še posebej če to preračunamo v količino uskladiščene vode. Če upoštevamo rahlo nagnjeno dno polja, 2 m višinske razlike med najnižjo in najvišjo srednjo letno gladino, predstavlja zelo veliko razliko v uskladiščeni vodi, in sicer med 1270 m³ pri vodostaju 547,36 m do 8.300.000 m³ pri 549,33 m. Podatki kažejo na izrazito naraščajoč trend v srednjem letnem vodostaju med letoma 1954 in 1971 (pred poskusom trajne ojezeritve), ko je bila stopnja naraščanja +30 cm v 10 letih, po letu 1971 (po opustitvi poskusa) pa je bil trend negativen s stopnjo -14 cm na 10 let. Padeč v višini vodostajev je posledica ne samo nadaljnjih človekovih posegov (delne opustitve trajne ojezeritve), ampak tudi vse manjših količin efektivnih padavin. Količina slednjih namreč upada s stopnjo -70 mm/10 let (slika 8).

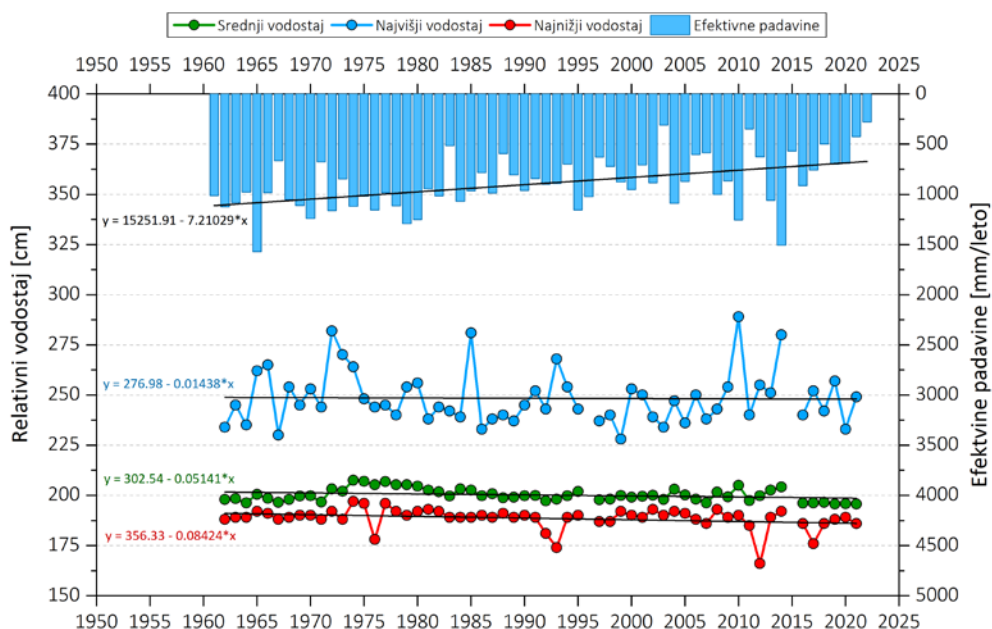
Najvišji letni vodostaji so se gibali od 549,31 m (kar ustreza 8 milijonom m³ uskladiščene vode) v letih 1989 in 2003 do 552,1 m (71 milijonov m³ uskladiščene vode) leta 2000. Do leta 1971 je bil linearni trend pozitiven in je kazal stopnjo naraščanja +56 cm v 10 letih, po letu 1971 pa negativen s hitrostjo upadanja -13 cm na 10 let (slika 8). Velika razpršenost najvišjih vodostajev od leta 2000 naprej kaže na povečano pogostost ekstremnih dogodkov v tem obdobju. Izmera najnižjih vodostajev je nekoliko problematična, saj je delno odvisna od položaja senzorja na vodomerni lati (najnižji vodostaji se namreč lahko spustijo pod višino senzorja), delno pa tudi od človekovih aktivnosti z zadrževanjem vode pri jezu Rešeto, ki se nahaja v neposredni višini. Najnižji vodostaj je tako znašal 545,6 m (višina, ki jo predstavlja najnižja točka senzorja na vodomerni postaji) in je bil zabeležen v različnih letih, najverjetneje pa je bil v teh obdobjih dejanski vodostaj še nižji (slika 8). Do leta 1970 je vodostaj skoraj vsako leto padel pod višino senzorja na vodomerni lati, po tem pa se je dinamika spremenila. V tem obdobju je bil trend v najnižjih vodostajih pozitiven

s stopnjo +5 cm na 10 let in je najverjetneje posledica človekovih dejavnosti, predvsem izgradnje in nadgradnje vodnega zadrževalnika Rešeto, ki vzdržuje nekoliko višji minimalni vodostaj.



Slika 8: Srednji, najvišji in najnižji vodostaji za posamezna leta in izračunani trendi (črne črte z enačbami v pripadajočih barvah) za hidrološko postajo Dolenje Jezero v obdobju 1954–2022. Sivo obarvani pas predstavlja obdobje z najintenzivnejšimi človekovimi posegi z namenom poskusne trajne ojezeritve.

Negativni trend srednjega vodostaja sta zabeležili tudi hidrološki postaji Gorenje Jezero (-0,2 cm/leto) in Cerkniščica (0,05 cm/leto) (slika 9).

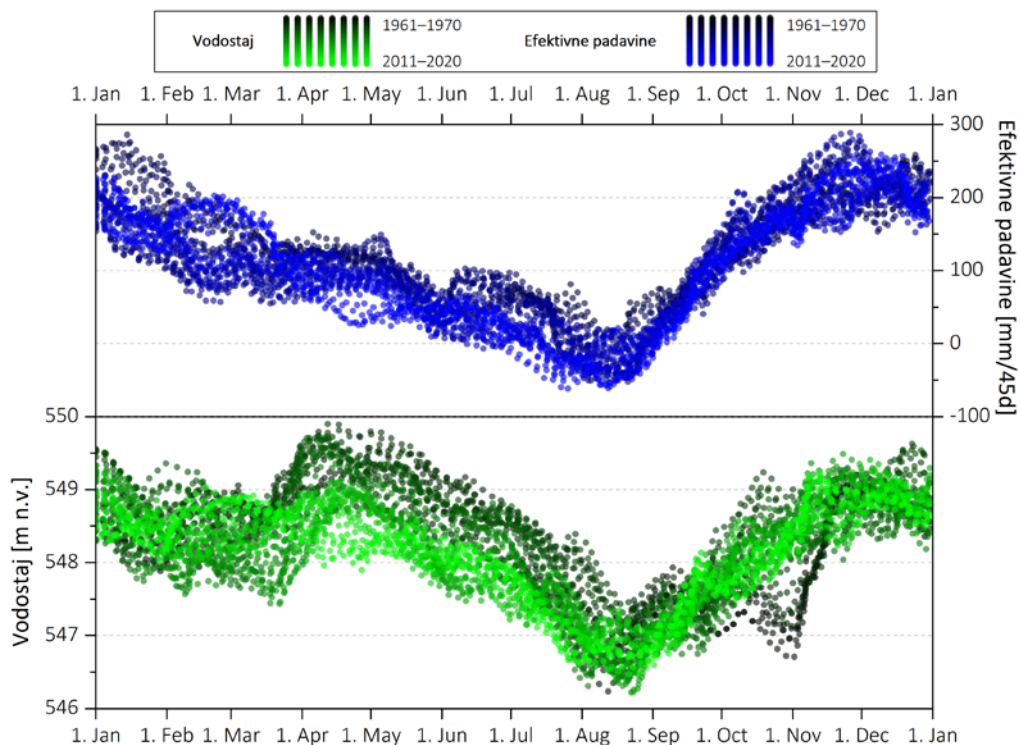


Slika 9: Srednji, najvišji in najnižji vodostaji za posamezna leta in izračunani trendi (črne črte z enačbami) za hidrološko postajo na Cerkniščici v obdobju 1961–2022.

Pri Cerkniščici (najmanjši pretok = $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$, srednji pretok = $1 \text{ m}^3/\text{s}$, največji pretok = $\sim 50 \text{ m}^3/\text{s}$ v obdobju 1961–2022) to predstavlja 5 l/s manjši srednji pretok vsako leto. Trend v najvišjem letnem vodostaju na Cerkniščici je prav tako negativen s stopnjo okoli $-0,01 \text{ cm/leto}$, medtem ko je trend v najnižjem vodostaju bolj izrazito negativen s stopnjo $-0,08 \text{ cm/leto}$. Nenadne spremembe, ki so vidne v začetku 70-ih let 20. stoletja, po letu 1996 in po letu 2015 (slika 9) so po vsej verjetnosti vezane na človekove posege, ki bi lahko predstavljali spremembe v oblikovanosti struge (regulacije vodotoka) ali spremembi lokacije vodomerne postaje, zato je interpretacija dinamike vodostajev v nekaterih obdobjih lahko vprašljiva.

Sezonska dinamika

Slika 10 prikazuje sezonsko dinamiko vodostajev (hidrološka postaja Dolenje Jezero) in efektivnih padavin (hidrološko zaledje Cerkniškega polja) za obdobje med letoma 1961 in 2020. Vsaka točka predstavlja 10-letna drseča povprečja za posamezne datume. Temnejši odtenki predstavljajo začetno obdobje meritev, svetlejši pa novejša meritve. Iz grafikona je razvidno, da so najvišji vodostaji pozno jeseni (november, december), ko je največja tudi vrednost efektivnih padavin. Zelo visoki vodostaji so tudi spomladi (april, maj) (preglednica 2), ko je efektivnih padavin sicer manj, a v tem obdobju pomemben dotok vode predstavlja tudi taljenje snega na okoliških planotah. Januarja, februarja in marca je vodostaj nekoliko nižji, kar je lahko posledica zadrževanja snega. Najnižji vodostaji so poleti in zgodaj jeseni (avgust, september), kar lahko pojasnimo s primanjkljajem vode v jezeru zaradi zelo majhnih (ali celo negativnih) efektivnih padavin.

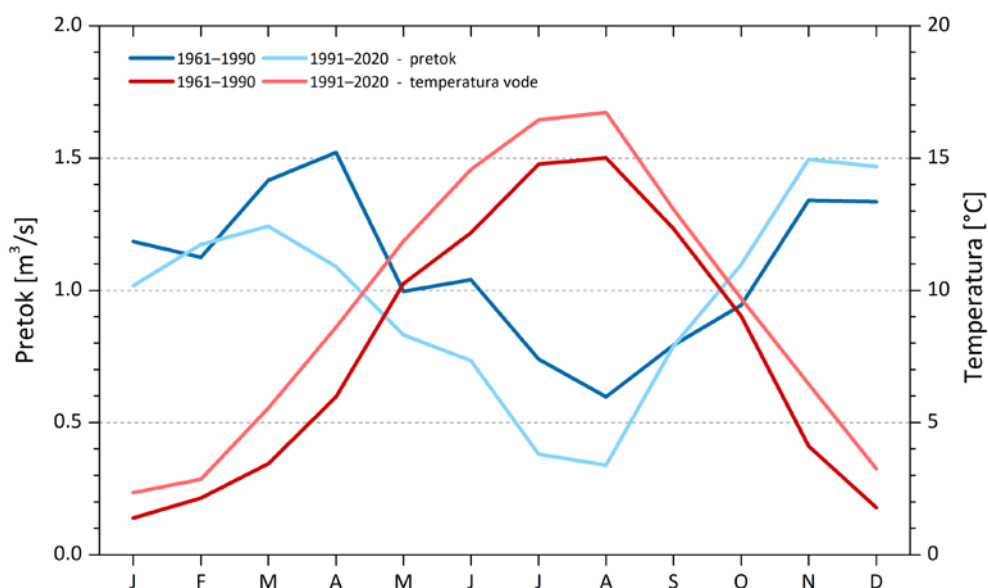


Slika 10: Sezonska porazdelitev efektivnih padavin (modre točke) in vodostaja (zelene točke) na vodomerni postaji Dolenje Jezero po desetletjih v obdobju 1961–2020.

Primerjava različnih obdobj kaže, da je vodostaj sedaj skoraj preko celega leta nižji kot je bil v preteklosti, največji padec pa je prisoten spomladi, poleti in zgodaj jeseni (slika 10). Nižji vo-

dostaji v teh obdobjih so najverjetneje zaradi manjših efektivnih padavin, manjša razpoložljiva količina vode spomladi pa je lahko tudi posledica manjših količin staljenega snega z okoliških kraških planot. Pri analizi vodostajev je potrebno upoštevati, da so bili predvsem v 70-ih letih 20. stoletja relativno višji vodostaji zabeleženi tudi zaradi človekovih aktivnosti za poskusno trajno ojezeritev polja.

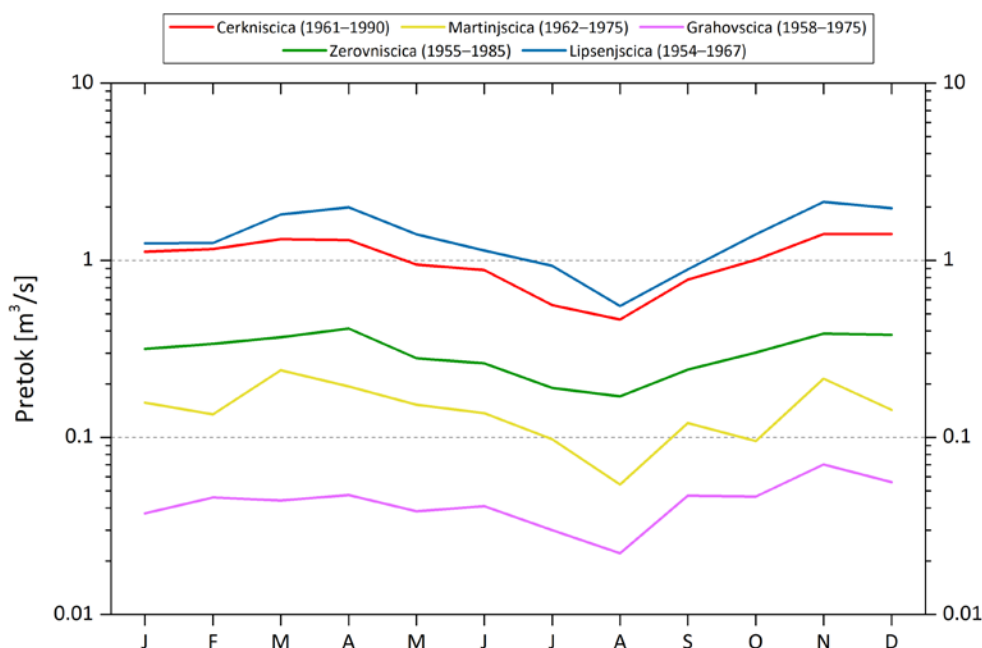
Letna dinamika vodostaja in pretoka Cerkniščice je podobna kot dinamika vodostaja na Cerkniškem jezeru. V dveh referenčnih obdobjih (1961–1990 in 1991–2020) so bili največji pretoki Cerkniščice pozno jeseni in spomladi, najmanjši pa poleti. Medsebojna primerjava obeh referenčnih obdobji kaže, da so bili v obdobju 1991–2020 vodostaji skoraj preko celega leta nižji kot v obdobju 1961–1990, največja razlika pa je v spomladanskem in poletnem obdobju, ko so pretoki tudi do 40 % manjši (april, julij in avgust) (slika 11). Že tako relativno veliki pretoki pozno jeseni in zgodaj pozimi (november in december) so v zadnjem obdobju še nekoliko narasli.



Slika 11: Srednji pretoki in temperatura Cerkniščice po posameznih mesecih v dveh referenčnih časovnih obdobjih 1961–1990 in 1991–2020.

Vse manjši pretoki ob poletnih sušah in vse večji pretoki v najbolj namočenih jesenskih mesecih predstavljajo izrazitejša nihanja kot so bila značilna v preteklosti. Temperatura vode je po pričakovanjih najnižja v zimskih mesecih (december in januar), najvišja pa v poletnih (julij in avgust). Primerjava referenčnih časovnih obdobji kaže, da je temperatura voda v sedanjosti višja v prav vseh mesecih. Največje razlike so v spomladanskem in poletnem obdobju, ko je temperatura vode tudi do 3 °C višja kot nekoč. Razlog za to je poleg višje temperature zraka tudi manjša količina razpoložljive vode, ki se hitreje in enostavneje odziva na spremembe (predvsem naraščanje) temperature zraka. Najmanjši porast temperature je v septembru in oktobru (slika 11).

Za ostale dotoke na Cerkniško polje (Martinjščico, Grahovščico, Žerovnišico in Lipsenjščico) so podatki na voljo le za različna časovna obdobja med letoma 1955 in 1985. Vsi vodotoki so imeli v tem obdobju podobno letno dinamiko v pretokih kot Cerkniščica, in sicer so bile največje pretočne vrednosti pozno jeseni in spomladi (november–december, marec–april), najmanjše pa poleti (avgust) (slika 12).



Slika 12: Srednji vodostaji dotokov na Cerkniško polje po posamičnih mesecih v različnih obdobjih med letoma 1955 in 1990.

Največje srednje pretočne vrednosti med vsemi dotoki je imela Lipsenjščica z okoli 1,4 m³/s, kar je nekoliko več od Cerknjščice (1,1 m³/s). Vrednosti pri ostalih so znatno manjše in sicer okoli 0,3 m³/s na Žerovniščici, 0,15 m³/s na Martinjščici ter 0,04 m³/s na Grahovščici (preglednica 1).

Preglednica 1: Srednjih, največji in najmanjši pretoki po mesecih za Cerknjščico in ostale dotoke na Cerknškem polju v različnih obdobjih med letoma 1955 in 1990.

	Cerknjščica 1961–1990			Martinjščica 1962–1975			Grahovščica 1958–1975			Žerovniščica 1955–1985			Lipsenjščica 1954–1967		
	Povp.	Max.	Min.	Povp.	Max.	Min.	Povp.	Max.	Min.	Povp.	Max.	Min.	Povp.	Max.	Min.
Januar	1,18	4,83	0,44	0,16	0,76	0,05	0,04	0,16	0,02	0,32	1,40	0,12	1,25	5,53	0,36
Februar	1,12	4,22	0,34	0,13	0,58	0,04	0,05	0,18	0,01	0,34	1,19	0,12	1,25	4,52	0,33
Marec	1,42	6,53	0,41	0,24	1,20	0,03	0,04	0,23	0,02	0,37	1,55	0,12	1,81	5,98	0,41
April	1,52	5,00	0,52	0,19	0,79	0,06	0,05	0,19	0,02	0,41	1,52	0,13	1,99	5,96	0,53
Maj	1,00	4,91	0,35	0,15	0,87	0,03	0,04	0,18	0,02	0,28	1,36	0,10	1,40	5,05	0,36
Junij	1,04	5,19	0,32	0,14	0,77	0,02	0,04	0,24	0,02	0,26	1,21	0,09	1,14	4,81	0,28
Julij	0,74	4,07	0,24	0,10	0,78	0,02	0,03	0,17	0,01	0,19	0,91	0,08	0,93	4,77	0,21
Avgust	0,60	4,36	0,16	0,05	0,36	0,01	0,02	0,08	0,01	0,17	0,80	0,09	0,55	2,97	0,18
September	0,79	5,94	0,18	0,12	0,76	0,01	0,05	0,29	0,01	0,24	1,42	0,09	0,89	4,58	0,16
Oktober	0,94	4,88	0,23	0,10	0,58	0,02	0,05	0,28	0,01	0,30	1,52	0,09	1,40	4,76	0,23
November	1,34	6,18	0,35	0,21	1,03	0,02	0,07	0,36	0,02	0,39	1,67	0,09	2,13	7,76	0,39
December	1,34	5,83	0,45	0,14	0,66	0,03	0,06	0,27	0,02	0,38	1,91	0,11	1,97	7,32	0,48
POVPREČJE	1,09	5,16	0,33	0,15	0,76	0,03	0,04	0,22	0,02	0,30	1,37	0,10	1,39	5,33	0,33

Preglednica 2 prikazuje srednje in najvišje izmerjene vodostaje po mesecih v celotnem obdobju opazovanja, izračunano poplavno površino in količino uskladiščene vode v jezeru. Izračunane vrednosti potrjujejo najvišje srednje vodostaje pozno jeseni in spomladi ter razkrivajo, da so

pri izračunanih površinah jezera in prostorninah uskladiščene vode zelo velike razlike. Takšne razlike so posledica oblike dna polja, kjer se največji delež polja nahaja med 548,7 in 549 m nadmorske višine. Ko voda doseže višino 548,7 m, prestopi bregove in začne se ojezeritev. Z nadaljnjim naraščanjem vodostajev se površina in prostornina hitro povečujeta. Nad višino 549 m se nakloni ponovno povečajo, kar pomeni, da od te višine dalje površina jezera narašča počasi, prostornina pa še vedno izrazito narašča.

Preglednica 2: Srednji in najvišji mesečni vodostaji na vodomerni postaji Dolenje jezero v obdobju 1954–2022 ter pripadajoče površine in prostornine uskladiščene vode. Dolžina obarvanih pasov v celicah je sorazmerna z vrednostmi parametrov po stolpcih preglednice, pri čemer se modra barva nanaša na vodostaj, zelena na površino in rdeča na prostornino uskladiščene vode.

MESEC	POVPREČNI VODOSTAJ (m n.v.)	POVPREČNA POPLAVLJENA POVRŠINA (m ²)	POVPREČNA PROSTORNINA VODE (m ³)	NAJVIŠJI VODOSTAJ (m n.v.)	NAJVEČJA POPLAVLJENA POVRŠINA (m ²)	NAJVEČJA PROSTORNINA VODE (m ³)	LETO Z NAJVIŠJIM VODOSTAJEM
JANUAR	548.5	238908	25621	550.8	23446600	40056600	1982
FEBRUAR	548.3	14238	6030	551.8	25760100	64477300	2014
MAREC	548.4	54000	8817	551.7	25495500	61145000	2014
APRIL	548.8	9786865	820012	551.2	24346200	48423600	1970
MAJ	548.6	329391	46448	551.6	25248400	58100000	1972
JUNIJ	548.1	7237	4418	551	23922600	44320400	1972
JULIJ	547.6	2855	1731	549.8	19819900	16725800	1972
AVGUST	546.9	1066	541	549.7	19237100	14382100	1977
SEPTEMBER	547.2	1718	1052	550.3	21903800	28248500	1965, 2010
OKTOBER	547.9	5040	3190	551.2	24395500	48911100	1974
NOVEMBER	548.6	432347	63859	552.1	26248000	71240300	2000
DECEMBER	548.8	10641175	1020641	552.1	26192700	70453500	2000

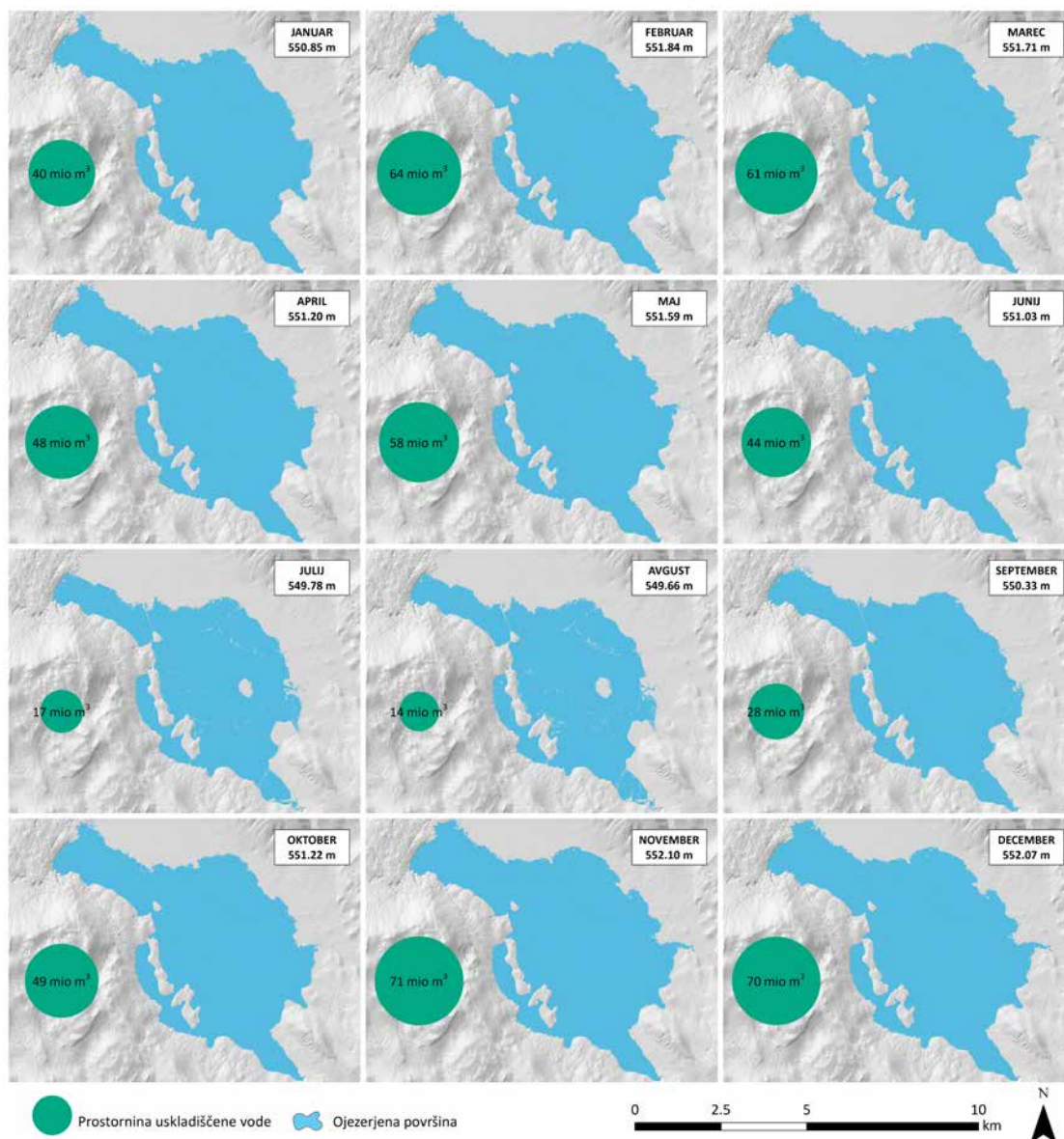
Najvišji vodostaji za posamezne mesece imajo podobno porazdelitev kot srednji. Ti so bili izmerjeni pozno jeseni (november, december) in spomladi (od februarja do maja) (slika 13). Jeseni, pozimi in spomladi so bili najvišji vodostaji večinoma zabeleženi po letu 2000, kar kaže na to, da so tovrstni ekstremi v zadnjem času pogostejši. Pri poletnih mesecih so bili najvišji vodostaji večinoma izmerjeni v 70-ih letih 20. stoletja, kar je posledica poskusa trajne ojezeritve jezera, ki je poplavne dogodke podaljšal tudi v poletna obdobja.

Lokalna odstopanja v vodostajih

Zaradi velike površine Cerkniškega polja, številnih izvirov in dolge poti po kateri se voda pretaka od izvirov do ponornih območij, prihaja do časovnih zamikov v naraščanju in upadanju vodostajev. Do odstopanj prihaja tudi zaradi specifične reliefne oblikovanosti (prostorske izoliranosti) nekaterih območij ter lokalnega napajanja oziroma odvajanja vode prek estavel. Spremenljivo razliko v vodostaju kažejo že dolgoročne meritve na vodomernih postajah Dolenje in Gorenje Jezero, ki sta si med seboj oddaljeni 5,5 km zračne razdalje, za boljši vpogled v lokalna odstopanja v vodostajih pa smo v letu 2020 dodatne meritve vzpostavili še v estaveli Velika Bobnarica v Zadnjem kraju ter ponornem območju Narti.

Meritve so potrdila pričakovanja, da so vodostaji v ponornem območju Narti ves čas nižji kot na gorvodno ležeči vodomerni postaji Dolenje Jezero, je pa višinska razlika skozi čas različna. V času visokih vod (na primer začetek aprila 2022 na sliki 14) je vodostaj na obeh lokacijah zelo podoben, kar kaže na skoraj povsem ravno gladino Cerkniškega jezera. Z upadanjem vodostaja

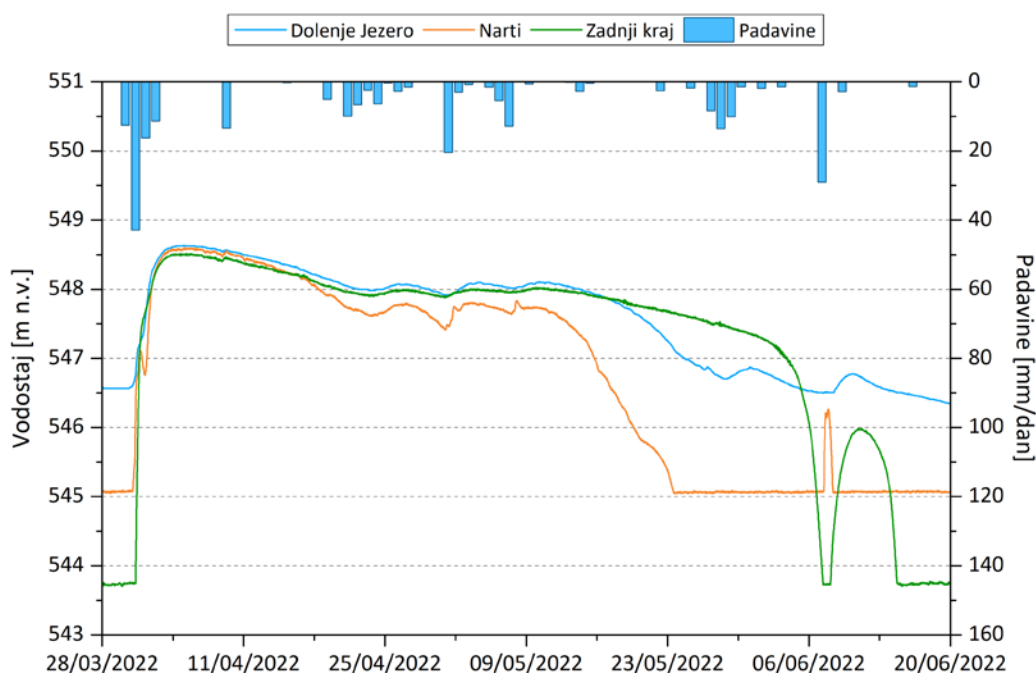
(konec aprila, maja in v začetku junija 2022 na sliki 14) se razlika v gladini vode vse bolj povečuje in v času najnižjih vod znaša tudi do 2,5 m. V tem obdobju jezero tudi presahne, tako da se voda vrne v strugo Stržena.



Slika 13: Prostorski prikaz poplavljenih površin (modre ploskve) in količina uskladiščene vode (zeleni krogi) ob najvišjih poplavih v posameznih mesecih glede na meritve na vodomerni postaji Dolenje Jezero v obdobju 1954–2022. Velikost zelenih krogov je sorazmerna s količino uskladiščene vode (vir podatkov ARSO, 2023e).

Drugečana dinamika vodostaja je značilna za nekoliko izolirano območje Zadnjega kraja, kjer ojezeritev traja bistveno dlje. Tu je v odvisnosti od hidrološke situacije gladina lahko višja ali nižja kot na območju vodomerne postaje Dolenje Jezero (slika 14). V obdobju najvišjih vodostajev je višina vode v Zadnjem kraju rahlo manjša, vsak padavinski dogodek v času ojezeritve (na primer dva dogodka ob koncu aprila in v začetku maja) pa povzroči nekoliko bolj blag dvig vodostaja od tistega pri vodomerni postaji Dolenje Jezero. Ob začetku upadanja vodostaja je razlika v gladini

vode stabilna, ko gladina vode na vodomerni postaji Dolenje Jezero upade pod višino 547,9 m (konec maja 2022 na sliki 14) pa se gladina vode na tem območju spušča bistveno hitreje kot v Zadnjem kraju, ki se očitno še vedno napaja z vodo iz Javornikov.



Slika 14: Vodostaji na Dolenjem Jezeru, v Nartih in v Zadnjem kraju v izbranih poplavnih dogodkih med koncem marca in koncem junija 2022.

V določenem trenutku je vodostaj v Zadnjem kraju tudi do 0,8 m višji, višinska razlika pa je najverjetneje posledica dokaj slabe povezanosti s preostankom Cerkniškega polja, saj obe območji ločujeta vmesni vzpetini Drvošec in Otok. Hitrost upadanja vodostaja v Zadnjem kraju se spremeni pod višino 547,3 m. Ko dotok z Javornikov postane kritično majhen, je upadanje zelo hitro - v približno 5 dneh gladina upade za 3,5 m (slika 14), tako da estavele povsem presahnejo. Spremembe v vodostajih je mogoče opaziti tudi ob opazovanju smeri pretakanja vode pod mostom med Drvoščem in Otokom. Smer toka vode je namreč odvisna od tega, ali je vodna gladina v Zadnjem kraju višja ali nižja.

Geokemične značilnosti vode

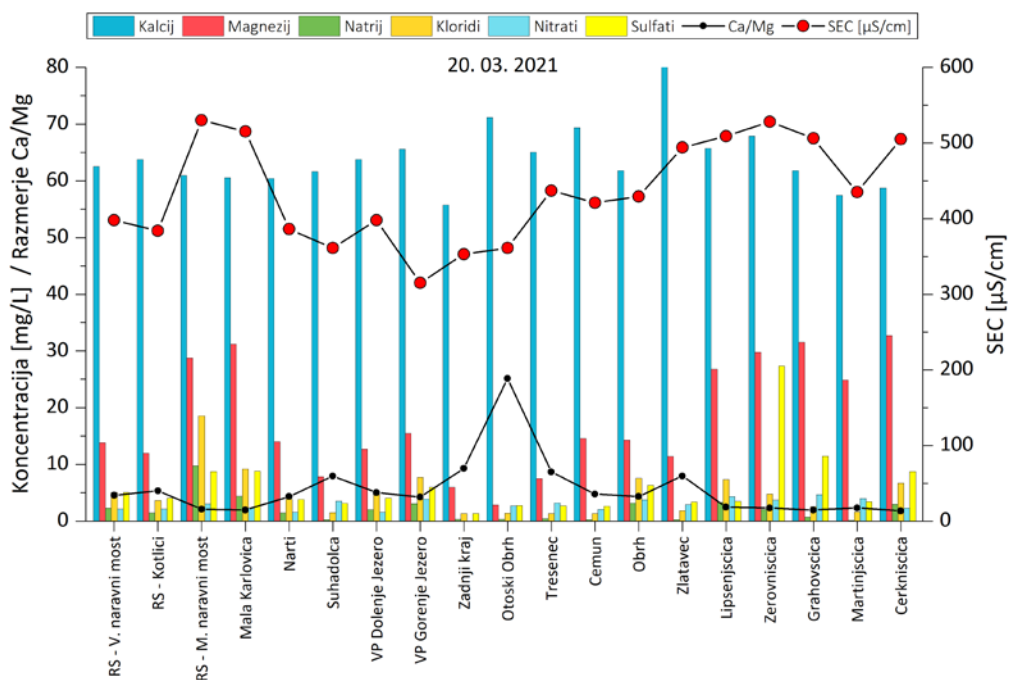
Časovna in prostorska dinamika vodostajev se zaradi različnega zaledja izvirov odraža tudi v spremenljivosti geokemične lastnosti vode. Največji vpliv nanjo ima različna geološka sestava zaledij izvirov (na vzhodnem delu hidrološkega zaledja je predvsem dolomitna, na preostalem območju pa apnenčasta), določen vpliv pa ima tudi človek s poselitvijo in rabo tal. Časovno in prostorsko spremenljivost lastnosti vode smo spremljali med letoma 2020 in 2022, ko smo tekom 13 terenskih obiskov opravili ročne meritve in vzorčenja na okoli 20 različnih lokacijah. Pri tem smo zajeli različne izvire na obrobju polja, lokacije z vodomernimi postajami in estavelami ter ponorno območje na severozahodnem obrobju polja. Za primerjavo smo spremljali lastnosti vode tudi na izvirih v Rakovem Škocjanu, kamor se steka voda iz Cerkniškega polja (slika 15).

Slika 15 prikazuje značilnost vode 20. 3. 2021, ki predstavlja precej reprezentativno stanje v primerjavi s celoletno dinamiko (slike 17–19). Vsebnosti kalcija so zaradi kraškega zaledja velike na celotnem območju (med 55 in 80 mg/l), pri čemer nekoliko odstopa Zlatavec in vsi dotoki z Javornikov na zahodni strani polja. Nekoliko manjše koncentracije imajo dotoki na vzhodnem robu polja, ki imajo dolomitno zaledje. Večje so razlike pri vsebnosti magnezija (med 5 in 30 mg/l), kjer so koncentracije bistveno večje pri dotokih na vzhodni strani polja z dolomitnim zaledjem. Večje koncentracije so tudi pri ponornem območju Mala Karlovica in izviru Raka pod Malim naravnim mostom v Rakovem Škocjanu, ki prejemajo večji delež vode iz Cerkniščice. Najmanjše koncentracije magnezija so pri dotokih na zahodnem obrobju polja, kot so Zadnji kraj, Otoški Obrh, Tresenec in Suhadolca (pod 10 mg/l), ki imajo povsem apnenčasto zaledje. Izračun razmerja med kalcijem in magnezijem kaže, da ima največje odstopanje v korist kalcija izvir Otoški obrh (15 : 1), zelo veliko razmerje pa imajo tudi ostali izviri na vzhodnem obrobju polja (Suhadolca, Tresenec, Zadnji kraj) in Zlatavec (okoli 5 : 1). Najnižje razmerje v korist kalcija imajo dotoki z vzhoda in ponorno območje pri Karlovcih (od 1,1 : 1 do 1,5 : 1).

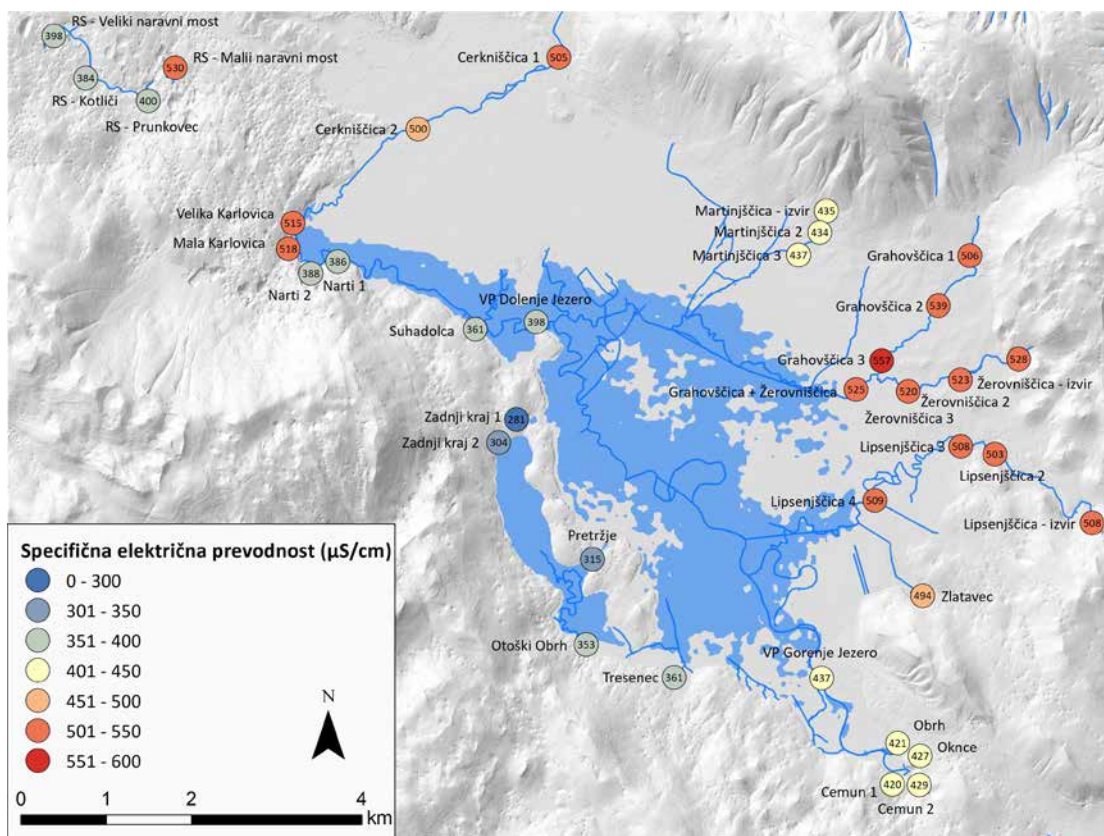
Natrij in kloridi imajo zelo podobno nihanje v koncentracijah na skoraj vseh obravnavanih mestih (Pearsonov koeficient korelacije med njima je 0,99). Koncentracije obeh so na vseh vzorčnih mestih relativno majhne (pod 5 mg/l za natrij in pod 10 mg/l za kloride), večje ali manjše relativne vrednosti pa niso povezane niti z geografsko lego niti z gostoto poselitve v zaledju. Največje koncentracije so na izviru Raka pod Malim naravnim mostom v Rakovem Škocjanu in ponorom Mala Karlovica, ki v veliki meri napaja Rak. Nekoliko večje koncentracije so tudi na Cerkniščici, Lipsenjščici in na vodomerni postaji Gorenje Jezero. Najmanjše koncentracije natrija in kloridov so bile zaznane v vodi, ki doteka iz Javornikov, in sicer v Suhadolci, Zadnjem kraju, Otoškem Obrhu, Tresencu, pa tudi pri Zlatavcu, ki na polje doteka z vzhoda (slika 15).

Neenakomerna geografska razporeditev je tudi pri koncentracijah nitratov in sulfatov. Nitratov je relativno malo (pod 5 mg/l), največje koncentracije pa so na tistih dotokih, ki prejemajo večji delež vode z Blok (Lipsenjščica, Žerovniščica, Grahovščica in Martinjščica) in na Strženu pri vodomerni postaji Gorenje Jezero. Najmanjše koncentracije so pri dotokih z Javornikov, se pa koncentracije na splošno manjšajo vzdolž toka vode od izvirov proti ponorom. Pri koncentracijah sulfatov so razlike med vzorčnimi mesti večje. Krepko največje koncentracije so na Žerovniščici (okoli 25 mg/l), na Grahovščici in Cerkniščici pa so koncentracije že bistveno manjše (okoli 10 mg/l). Dokaj velike koncentracije so bile zaznane tudi na ponoru Mala Karlovica in na izviru Raka pod Malim naravnim mostom v Rakovem Škocjanu, ki prejemajo večji delež vode iz Cerkniščice. Najmanjše koncentracije so na izvirih, ki se napajajo z Javornikov, in sicer na Suhadolci, v Zadnjem kraju ter na Tresencu in Otoškem Obrhu (slika 15).

Poveden parameter je tudi specifična električna prevodnost vode (SEC), ki sama po sebi pove, koliko je pozitivno nabitih ionov vodi. V grobem torej odraža, koliko je skupno raztopljenih snovi v vodi. V našem primeru so največje vrednosti pri dotokih na vzhodni strani polja, na obeh vodomernih postajah ter na severnem robu ponornega območja in izviru Raka v Rakovem Škocjanu (slika 15). Najmanjše koncentracije so na izvirih na vzhodnem obrobju. Dinamika je torej zelo podobna kot je pri koncentraciji magnezija (Pearsonov koeficient korelacije je 0,81). Slika 16 kaže prostorski prikaz specifične električne prevodnosti vode na obrobju Cerkniškega polja in Rakovega Škocjana iz vzorcev, pridobljenih 20. 3. 2021. Specifična električna prevodnost je poleg lokacij, ki so opisane in prikazane že na sliki 15, prikazana še za nekatere dodatne lokacije vzdolž vodotokov na vzhodnem obrobju polja (slika 16). Slika potrjuje, da so občutne razlike med dotoki na zahodnem in vzhodnem obrobju vidne tudi tu.

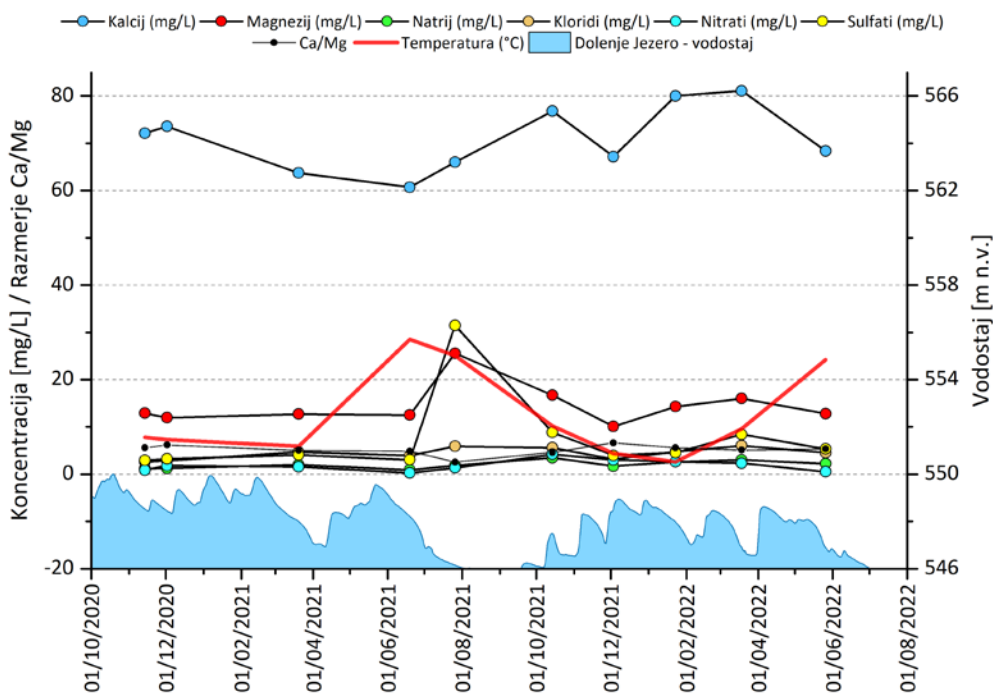


Slika 15: Lastnosti vode na obrobju Cerkniškega polja in Rakovega Škocjana dne 20. 3. 2021. SEC – specifična električna prevodnost.

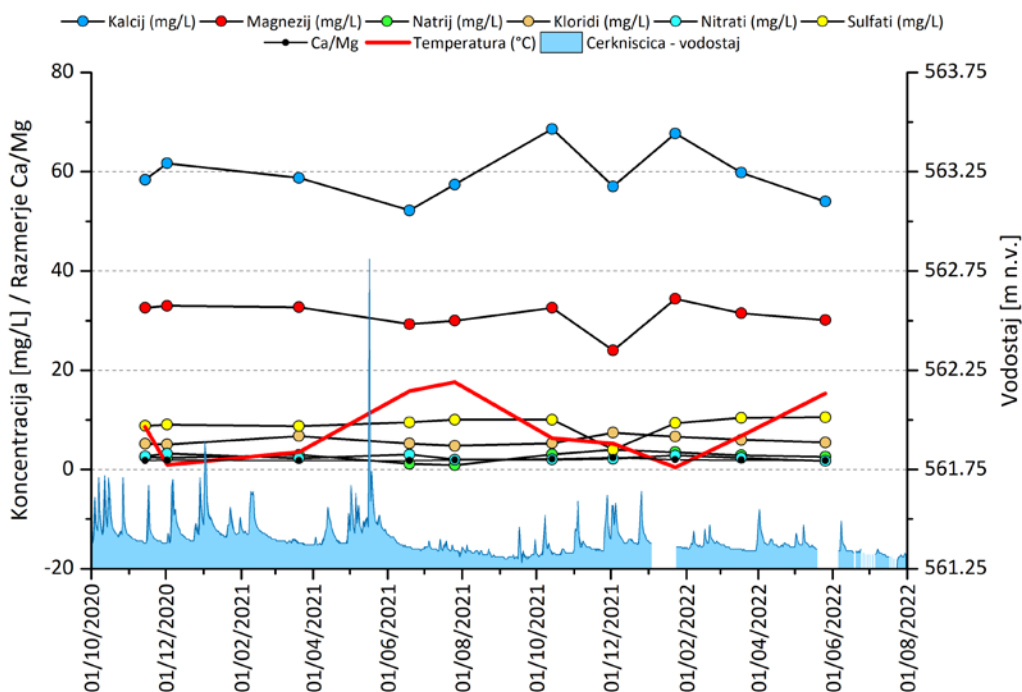


Slika 16: Ročne meritve električne prevodnosti na dotokih in ponornih območjih Cerkniškega polja in dolvodno ležečega Rakovega Škocjana na dan 20. 3. 2021.

Slike 17–19 prikazujejo sezonsko dinamiko v fizikalnih in kemijskih lastnostih vode na treh izbranih območjih, in sicer na Strženu pri vodomerni postaji Dolenje Jezero, na Cerkniščici in v Zadnjem kraju.



Slika 17: Sezonske spremembe izbranih lastnosti vode Stržena pri vodomerni postaji Dolenje Jezero.

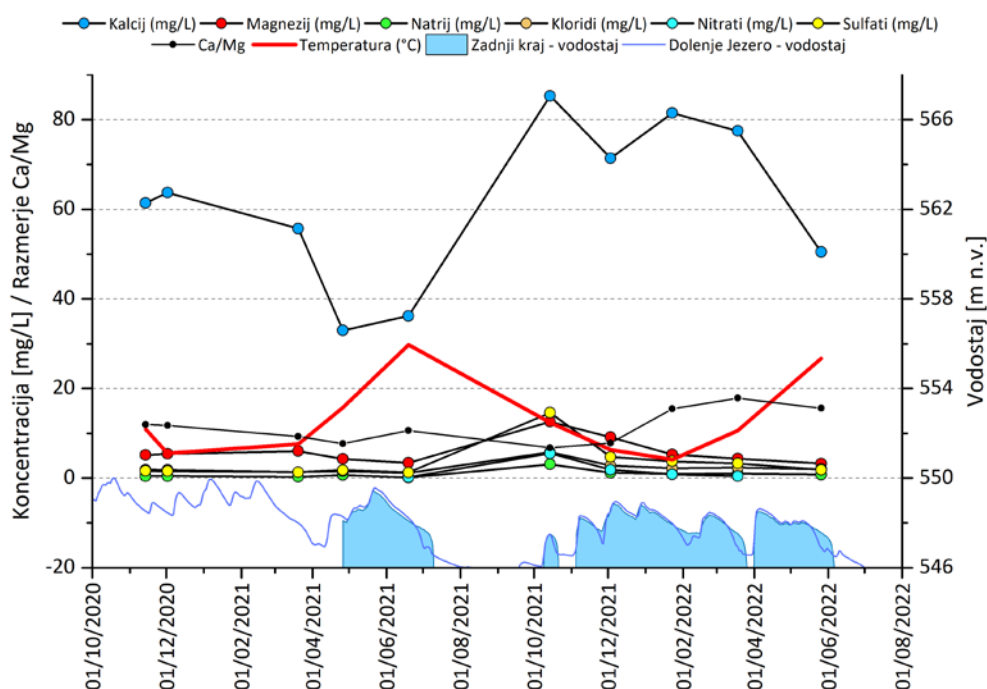


Slika 18: Sezonske spremembe izbranih lastnosti vode Cerkniščice.

Na Strženu pri vodomerni postaji Dolenje Jezero (slika 17) so relativno majhne razlike v sezonskem nihanju. Največje spremembe so vidne ob koncu poletja, ko so vodostaji najnižji. V tem obdobju najbolj izrazito naraste koncentracija magnezija in sulfatov. Koncentracija kalcija in ostalih elementov se ne spremeni bistveno. Do manjših sprememb je prišlo tudi 3. 12. 2021 v času naraščajočega vodostaja. V tem obdobju koncentracija vseh snovi rahlo upade zaradi redčenja. Ob ostalih vzorčenjih so koncentracije vseh snovi zelo stabilne. Razmerje med kalcijem in magnezijem se v času nekoliko spreminja in je v največji meri odvisno od vodostaja. Ob nižjih vodostajih je razmerje okoli 1,5 : 1, ob višjih pa do 4 : 1 v korist kalcija (slika 17). V vodi Cerknišči-ce (slika 18) so bila zabeležena zelo majhna sezonska nihanja v koncentracijah analiziranih snovi.

Edina večja sprememba je bila zaznana ob vzorčenju 3. 12. 2021 v času povišanega vodostaja. S povečano količino vode je upadla koncentracija kalcija, magnezija in sulfatov, povečala pa se je koncentracija kloridov. Tekom preostalih vzorčenj večjih sprememb ni bilo opaziti niti ob povišanih vodostajih spomladi, niti ob nizkih vodostajih poleti. Ker so nihanja v koncentracijah kalcija in magnezija zelo podobna, se njuno razmerje v času dokaj malo spreminja, v splošnem pa je zaradi velike količine magnezija razmerje majhno. Ob nižjih vodostajih je razmerje med kalcijem in magnezijem okoli 1,1 : 1, ob višjih pa 1,5 : 1.

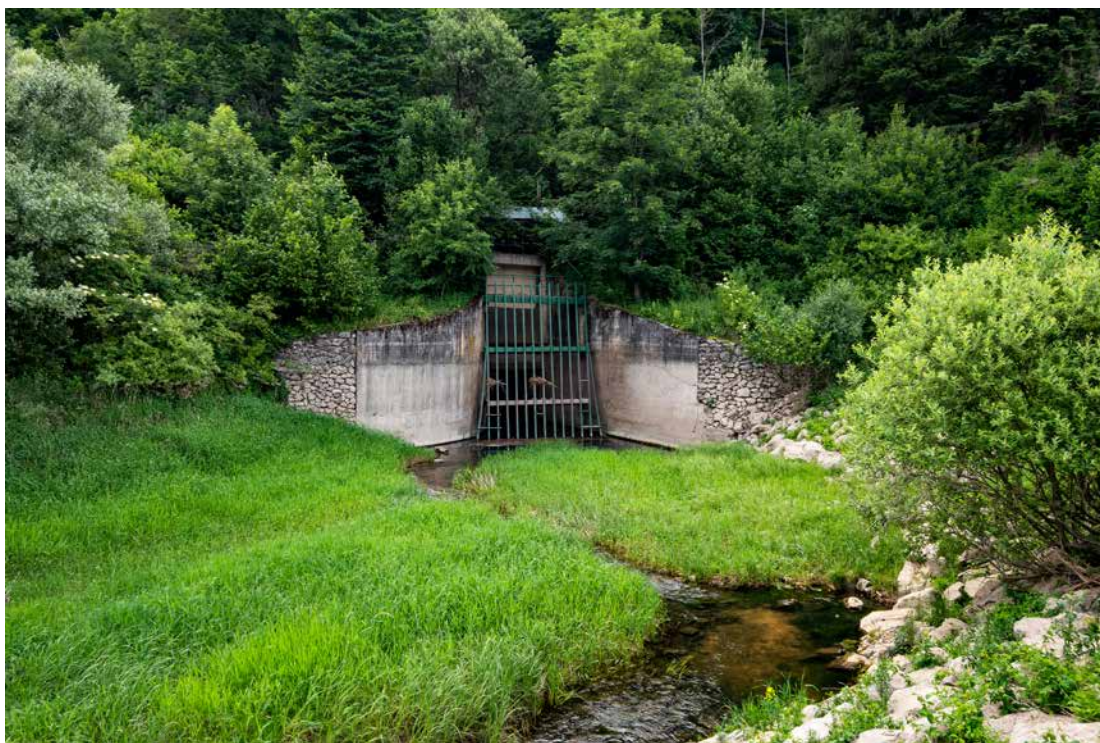
V Zadnjem kraju (slika 19) so najbolj opazna nihanja v koncentracijah kalcija. Najmanjše so bile zaznane pozno spomladi, največje (skoraj dvakratne) pa jeseni in pozimi. V obeh primerih so bili vodostaji relativno visoki, tako da višina vode tu ni imela neposrednega vpliva. V poletnem sušnem obdobju vzorčenje ni bilo mogoče zaradi odsotnosti vode. Dokaj podoben vzorec, a z manj izrazitimi nihanji, je viden pri koncentracijah ostalih snovi: magnezija, sulfatov, nitratov in natrija. Razmerje med kalcijem in magnezijem je bilo ves čas veliko in sicer od 4 : 1 do 11 : 1, ne kaže pa velike povezanosti z vodostajem.



Slika 19: Sezone spremembe izbranih lastnosti vode v Zadnjem kraju. Meritve vodostaja v Zadnjem kraju niso popolne, zato za boljši vpogled o splošnem hidrološkem stanju dodajamo meritve na vodomerni postaji Dolenje Jezero.

Učinek človekovih posegov

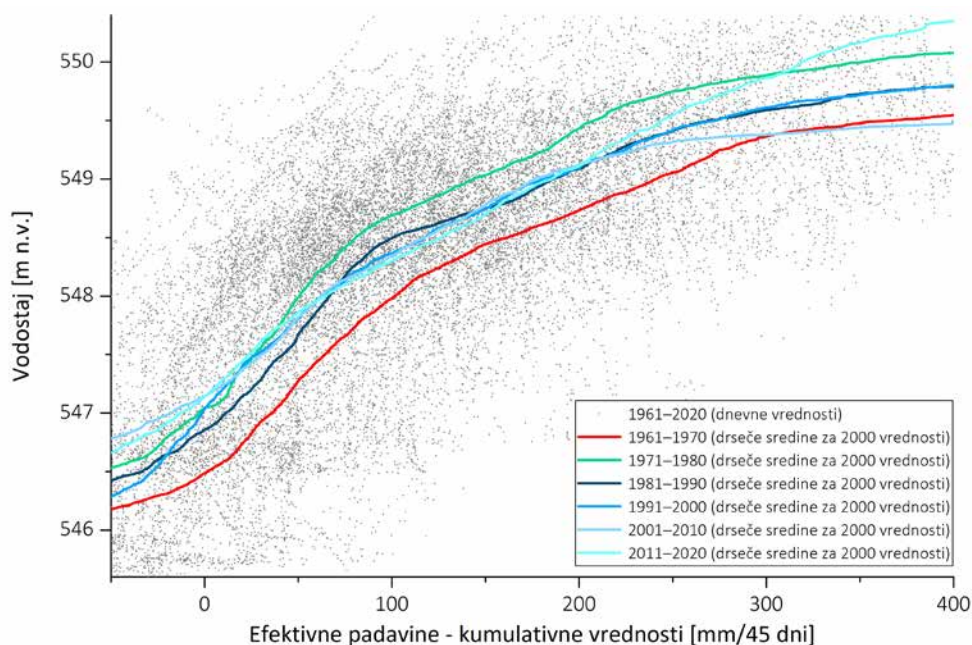
Habič (1974) je že v času poskusne ojezeritve Cerkniškega polja poskusil ovrednotiti človekove posege na polju, najbolj pa ga je zanimal učinek posegov opravljenih ob koncu 60-ih let 20. stoletja. Ocena je bila napravljena na podlagi večkratne izmere pretoka Raka v Rakovem Škocjanu, ki naj bi odražal odtočne kapacitete Cerkniškega polja v Jamskem zalivu pred in po opravljenih posegih za poskus trajne ojezeritve. Izmere pretokov so pokazale, da se je pred letom 1970 večina aktivnosti izvajala z namenom učinkovitega odtoka s polja. V tem obdobju je odtok iz Jamskega zaliva znašal do okoli 50 m³/s. V tem obdobju je bilo več faz mašenja odtokov s polja: prva je bila zajezitev vhodov v Veliko in Malo Karlovico ter izgradnja zapornice pri umetnem vhodu v Novo Karlovico (slika 20). Sprememba odtoka je bila očitna, učinek pa je bil odvisen od vodostaja na polju. Zajezitev Karlovic je predstavljala zmanjšanje odtoka za okoli 27 m³/s pri vodni gladini 549,8 m n.v. Nadaljnje mašenje ponornega območja Narti je zmanjšalo odtok za dodatna 2 m³/s. Izmere pretokov so torej pokazale, da so imeli človekovi posegi največji učinek ob zmernih poplavih (Habič, 1974).



Slika 20: Zapornica pred 26 m dolgim umetnim tunelom Nova Karlovica, ki površje Cerkniškega polja povezuje z podzemnimi rovi jame Velika Karlovica (foto: Matej Blatnik).

Vrednotenje sprememb odtoka s polja smo opravili tudi v dodatnih raziskavah (Blatnik in sod., 2024). Za ta namen smo primerjali vodostaje (dnevne vrednosti) in kumulativne efektivne padavine v predhodnih 45 dneh za časovna obdobja pred, med in po poskusu trajne ojezeritve polja ob koncu 60-ih let 20. stoletja. Celotno obdobje opazovanja smo razdeli na 6 obdobj, trajajočih 10 let: 1961–1970 (rdeča črta; obdobje pred poskusno zamašitvijo odtokov v Jamskem zalivu); 1971–1980 (zelena črta; med poskusno ojezeritvijo in nekaj let po njej) in nato 4 zaporedna desetletja od leta 1980 naprej (različni odtenki modrih črt, ki ponazarjajo postopno opustitev poskusa trajne ojezeritve, ko so bile v več korakih odstranjene nekatere pregrade na

ponornem območju) (slika 21). Velika razpršenost točk (sive točke na grafikonu na sliki 21) je posledica zapoznelega odziva vodostaja na predhodne padavine in suha obdobja, kar je precej značilno za kraška območja zaradi kraške retinence. Čeprav se vodostaj na Cerkniškem polju precej dobro ujema z efektivnimi padavinami v predhodnem 45 dnevnom obdobju, lahko pride do razmer, ko je odziv hitrejši ali bistveno počasnejši. Krivulje na sliki 21 predstavljajo drseča povprečja za 2000 zaporednih vrednosti in omogočajo jasnejši pogled na dinamiko vodostaja v izbranih desetletjih. Tu se kažejo pomembne razlike v odzivu vodostaja na enako količino kumulativnih efektivnih padavin v obdobju pred, med in po poskusni trajni ojezeritvi. Zamašitev ponorov ob poskusni trajni ojezeritvi (obdobje 1971–1980) je povzročila 0,7–0,8 m dvig gladine vode v primerjavi z desetletjem prej ob enaki predhodni količini efektivnih padavin (slika 21). Največji dvig je bil v primeru zmerne in velike količine efektivnih padavin, nekoliko manjši dvig vodostaja (okoli 0,3–0,5 m) pa je bil v primeru predhodnega sušnega obdobja. Kasnejša desetletja, ki sovpadajo z delnim umikom prej zgrajenih pregrad, imajo med seboj precej podobno dinamiko. Za ta obdobja je značilen ponoven upad vodostaja ob podobnih hidroloških razmerah (slika 21). V primeru zmerne ali velike količine efektivnih padavin je upad vodostaja okoli 0,3–0,4 m, v sušnem obdobju pa vodostaj ostaja podobno visok ali celo višji, najverjetneje zaradi še vedno prisotnega zadrževalnika pri Rešetu. Določena odstopanja so prisotna tudi v odzivu na najbolj intenzivne padavine, na kar bi lahko vplivalo neusklajeno odpiranje in zapiranje zapornice pri umetnem rovu Nova Karlovica.



Slika 21: Odziv vodostaja na Cerkniškem polju po različnih kumulativnih efektivnih padavinah, prikazan v šestih desetletjih z različnim obsegom človekovih posegov.

V vseh hidroloških razmerah so vodostaji po letu 1980 višji kot v podobnih razmerah pred letom 1970 (slika 21), na kar lahko vpliva 1) nepopolna odstranitev zgrajenih pregrad v ponornem območju polja ali 2) dejstvo, da so v obdobju pred 1970 potekali pretežno posegi za hitrejše odtokanje vode oziroma osuševanje polja z namenom izboljšanja razmer za kmetovanje.

Zgoraj opisani rezultati raziskave se osredinjajo samo na vpliv človekovih posegov, ki so bili narejeni tako za osuševanje kot daljše zadrževanje vode. Analiza torej izključuje vpliv podneb-

nih sprememb, ki so v primerjavi s človekovimi posegi vse bolj izraziti. Neusklajeno človekovo delovanje, ki je posledica različnih interesov deležnikov, učinke vremenskih ekstremov žal pogosto še poslabša.

Zaključki

Za Cerknjsko polje in njegovo zaledje je značilna pestra geološka sestava in relief s kraškimi planotami in vmesnimi polji, ki narekujejo precej zapleteno pretakanje površinske in podzemne vode. Cerknjsko polje je obkroženo z različnimi dotoki vode z najbolj izdatnimi izviri na jugu ter številnimi dotoki s pretežno dolomitnega zaledja na vzhodu in apnenčastega na zahodu. Odtok je večinoma skoncentriran na severozahodnem robu polja. Polje je bilo v preteklosti podvrženo raznolikim človekovim posegom, v zadnjem obdobju pa tudi podnebnim spremembam. Podrobnejša analiza hidroloških in delno tudi meteoroloških podatkov za preteklih 70 let je izpostavila spoznanja, ki jih je mogoče razporediti v tri skupine.

Za dolgoletno hidrološko dinamiko na Cerknjskem polju je značilno:

- Hitro naraščanje srednjega vodostaja na vodomerni postaji Dolenje Jezero do leta 1970, kateremu sledi postopno zniževanje vodostaja.
- Naraščajoča intenzivnost in pogostost ekstremnih dogodkov, ki se kažejo v daljšem trajanju in večjem obsegu poplav ter daljšem trajanju sušnih obdobj.
- Sezonska dinamika z najvišjimi vodostaji jeseni in spomladi ter najnižjimi poleti. Poplave v spomladanskem obdobju so nekoliko manj obsežne kot v preteklosti.
- Lokalna odstopanja v vodostajih, ki se ob visokih vodostajih odražajo z majhno višinsko razliko gladine vode, z nižanjem vodostaja pa se ta povečuje. Največja odstopanja so na območjih z lokalnim dotokom in odtokom, kot je Zadnji kraj s številnimi estavelami.
- Geokemične značilnosti vode se na obrobju jezera razlikujejo, v splošnem pa so največje razlike med dotoki z vzhoda, ki imajo prevladujoče dolomitno zaledje in dotoki z zahoda, ki imajo povsem apnenčasto zaledje. Sezonska nihanja so relativno majhna in so povezana z vodostajem.

Odnos med hidrološkimi in meteorološkimi značilnostmi kažejo spoznanja:

- Hidrološka dinamika na polju v največji meri sovpada s količino efektivnih padavin v predhodnih 45 dneh.
- Korelacija med hidrološkimi in klimatološkimi podatki ima pozitiven trend, ki kaže, da se vpliv klimatoloških razmer na hidrološko dinamiko na polju skozi čas povečuje.
- Zniževanje vodostaja po letu 1970 sovpada z manjšanjem količine efektivnih padavin. Sezonska dinamika prav tako kaže podobnost v vodostaju in efektivnih padavinah, kjer so značilne velike vrednosti jeseni, majhne vrednosti poleti in postopno nižanje vodostaja in efektivnih padavin spomladi.

Za človekove aktivnosti na Cerknjskem polju je značilno:

- Pred letom 1970 so prevladujoče aktivnosti za bolj učinkovito odtekanje vode s polja. V 70-ih letih 20. stoletja je glavni cilj postal dolgotrajnejše zadrževanje vode z namenom poskusne stalne ojezeritve polja. Po 70-ih letih 20. stoletja je značilno postopno opuščanje poskusa z odstranitvijo nekaterih zgrajenih pregrad. V preteklosti so pogosto istočasno potekale dejavnosti, ki so si med seboj nasprotujejo.

- Korelacija med hidrološkimi in klimatološkimi podatki je pokazala zmanjšanje vpliva človekovih aktivnosti, kar se ujema s postopno odstranitvijo zgrajenih pregrad.
- Kvantitativna opredelitev posledic človekovih aktivnosti je pokazala, da so posegi v 70-ih letih 20. stoletja povzročili dvig gladine za 0,5–1,0 m ob primerljivih hidroloških razmerah kot so bile pred letom 1970. Postopna odstranitev pregrad po 70-ih letih 20. stoletja je pri primerljivih hidroloških razmerah povzročila padec vodne gladine za približno 0,3 m.

Pri nadaljnjih aktivnostih na Cerkniškem polju bi bil potreben konsenz med naravovarstveniki in drugimi deležniki, na primer kmeti, ribiči, prebivalci poplavno ogroženih območij pri upravljanju hidrološkega stanja, da se bodo prihodnje dejavnosti na polju izvajale bolj usklajeno in nadzorovano. Za številna območja v Sloveniji in drugod po svetu se je renaturacija izkazala za najbolj učinkovito, na Cerkniškem polju pa to ne bo enostavno doseči, saj je bilo v več stoletjih izvedenih zelo veliko aktivnosti in za marsikatera območja prvotno stanje ni več ugotovljivo.

Summary

Hydrological characteristics of the Cerknica Polje – seasonal and long-term dynamics in the quantity and quality of water and the impact of human interventions

The Cerknica Polje has very diverse hydrological characteristics, as it receives water from very different areas. The main karst springs are Cemun and Obrh on the south-eastern edge, and a very important inflow is represented by the springs of Lipsenjščica, Žerovniščica, Grahovščica, Martinjščica rivers and alluvial inflow Cerkniščica on the eastern border of the polje. Quite important amount of the water also comes from the Javorniki mountains through several karst springs on the western border and springs at Zadnji kraj, Rešeto and Vodonos. The outflow zone represented by a number of spacious caves and smaller fractures is located in the northwestern border of the polje, where the largest amount of water drains through Velika and Mala Karlovica caves. The floods occur when the inflow to the polje exceeds the outflow capacity. The polje is regularly flooded for around 3–4 months per year, with some areas such as Zadnji kraj flooded up to about 8 months per year. The flooded area is regularly up to 26 km² large, where up to 70 million m³ of water is stored in a lake.

Local people always tried to adapt to the flooding dynamics of the Cerknica Polje with different activities. In the 19th and 20th century also, human interventions were more intensive. Some of them were done for more efficient drainage of the water, some also for longer retention during summer droughts. As a result, different infrastructures are present on the polje, some functioning contradictory to each other. Recent climate change with more frequent meteorological events is presenting additional challenges for local people.

The Slovenian Environment Agency has been monitoring the water level, discharge and temperature of water in the Cerknica Polje for almost 70 years. Hydrological measurements are established in Cerkniščica River and in two places on Stržen River (Dolenje Jezero and Gorenje Jezero hydrological stations). Additional two simple hydrological stations were established by the ZRC SAZU Karst Research Institute in 2020 for monitoring of the hydrological dynamics in Zadnji kraj and Narti areas. From 2020 to 2022 ZRC SAZU Karst Research Institute also made numerous samplings of water at different places on the polje for observation of spatial and temporal dynamics in water geochemistry. Detailed study of obtained data has revealed new insights about long term hydrological and meteorological dynamics, their interrelationship and

also the impact of different human hydraulic interventions within the polje that were carried out at different times during that period.

Long-term hydrological dynamics on the Cerknica Polje are characterized by:

- Fast increases in the mean water level between 1950s and 1970s and then a gradual decrease from 1970s on, which matches similar discharge dynamics of the Cerkniščica River.
- Increasing intensity and frequency of extreme hydrological events, represented by longer duration and higher extent of flood periods and longer duration of dry periods.
- Seasonal dynamics with the highest water levels in autumns and springs and the lowest in summers. The floods in springs seem to be smaller in extent now than in the past.
- Local deviations in water levels, which are reflected by a low height difference at high water levels and are increasing when the water level is decreasing. The greatest deviations are in areas with local inflow and outflow, such as the Zadnji kraj area with a high number of estavelles.
- The geochemical characteristics of the water differ spatially and temporally. In general, the greatest differences are between the inflows from the east with predominantly dolomite bedrock and the inflows from the west with limestone bedrock. Seasonal fluctuations are relatively low and are mostly dependent on the water level.

The relationship between hydrological and meteorological characteristics show:

- Hydrological dynamics of the polje can be optimally correlated with the cumulative antecedent effective precipitation over the past 45 days.
- Correlation between hydrological and climatological data with a positive trend, indicating that the impact of climatological conditions on the hydrological dynamics on the polje is increasing over time.
- General drop of the water level after the 1970s which follows the decrease in annual effective precipitation. Seasonal dynamics also show the same variation for the water level and effective precipitation, characterized by high values levels in autumn, low in summer and gradually lower values of both water level and effective precipitation in spring.

Human activities on the Cerknica Polje are characterized by:

- Hydraulic infrastructure constructed for more efficient drainage before the 1970s. Then, in the 1970s the main goal was prolonged retention of water (the experimental creation of a permanent lake). The period after the 1970s was characterized by gradual abandonment of the experiment (removal of some infrastructure). Across the same periods different activities were undertaken which often seemed to be contradictory to each other.
- Correlation between hydrological and climatological data indicates a decreasing impact of such human infrastructure over time, which matches with the gradual removal of some structures.
- The quantification of human activities indicated that interventions in the 1970s caused the increase of the water level for 0.5–1.0 m under comparable hydrological conditions in comparison to the period 1961–1970. Gradual removal of the infrastructure after the 1970s resulted in an approximate 0.3 m drop of the water level.

For the further management of the polje, a consensus is needed among the nature conservationists (wanting to promote high biodiversity) and other different stakeholders (for example farmers, fishermen, inhabitants of areas that are under risk of floods) as to what hydrological state

is most desired (dry or more flooded), so that any future activities on the polje will be carried out with an agreed goal and so better controlled. For many areas in Slovenia and elsewhere in the world, renaturation has proven to be the most optimal, but unfortunately in the case of the Cerknica Polje this might not be easy to attain, as the series of human interventions that have been carried out over several centuries which have impacted on the natural hydrology of the polje and for many areas the original status is no longer known.

Zahvala

Predstavljena vsebina je del raziskave opravljene v sklopu projekta »Opredelitev ekohidrološke dinamike Cerkniskega jezera z interdisciplinarnim pristopom raziskave« (Z6-2667) in programa »Raziskovanje krasa« (P6-0119), ki ju finančno podpira Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, ter projektov »LIFE-TRŠČA« (LIFE22-NAT-SI-LIFE TRSCA - 101114184) in »eLTER – European Long-Term Ecosystem and socio-ecological Research Infrastructure«, ki ju delno financira Evropska Komisija. Uporabljena oprema je bila podprta s projekti »Razvoj raziskovalne infrastrukture za mednarodno konkurenčnost slovenskega RRI prostora – RI-SI-EPOS in RI-SI-LifeWatch«.

Viri

Andjelov, M., Mikulič, Z., Tetzlaff, B., Uhan, J., Wendland, F. 2016. Groundwater recharge in Slovenia: results of a bilateral German-Slovenian research project. *Schr. Des. Forsch. Jülich, Reihe Energ. Umw. Energy Environ.* 138.

ARSO 2023a. Hidrološki arhiv. URL: <http://vode.arso.gov.si/hidarhiv/> (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023b. Meteorološki arhiv. URL: <http://meteo.arso.gov.si/met/sl/archive/> (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023c. Referenčna evapotranspiracija in padavine samodejnih postaj (dnevni podatki v mm od leta 2017). URL: https://meteo.arso.gov.si/met/sl/agromet/data/arhiv_etp/ (citirano 8. 12. 2023)

ARSO 2023d. Rezultati vodnobilančnega modela mGROWA-SI. ARSO.

ARSO 2023e. Lidarski sloj podatkov. URL: <http://gis.arso.gov.si/> (citirano 8. 12. 2023)

Bidovec, M. 2007. Pretekli posegi na Cerkniskem jezeru. *Novice Notranjskega regijskega parka*, 1 (2), 2–7.

Blatnik, M., Gabrovšek, F., Ravbar, N., Frantar, P., Gill, L. 2022. Ocena vpliva podnebnih sprememb in človekovih dejavnosti na poplavno dinamiko Cerkniskega polja. V M. Kuhar in sod. (ur.), *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2022 : zbornik del.* (str. 35–46). Ljubljana, Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko.

Blatnik, M., Gabrovšek, F., Ravbar, N., Frantar, P., Gill, L. 2024. Assessment of climatic and anthropogenic effects on flood dynamics in the Cerknica Polje (SW Slovenia) based on a 70-year observation dataset. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 51, 101609. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101609>

Breznik, M. 1961. Akumulacija na Cerkniskem in Planinskem polju. *Geologija*, 7, 119–149.

Breznik, J., Oštir, K., Iačič, M., Rak, G. 2023. Water Dynamics Analysis in Karst Flood Areas Using Sentinel-1 Time Series. *Remote Sensing*, 15, 3861. <https://doi.org/10.3390/rs15153861>

Kataster jam 2023. Kataster jam inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU in Jamarske zveze Slovenije. Postojna, Ljubljana.

Frantar, P., Herrmann, F., Andjelov, M., Draksler, A., Wendland, F. 2018. Vodnobilančni model mGROWA-SI. 29. Mišičev vodarski dan – zbornik referatov, 199–205.

- Gabrovšek, F., Kogovšek, J., Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N., Turk, J. 2010. Recent results of tracer tests in the catchment of the Unica River (SW Slovenia). *Acta Carsologica*, 39 (1), 27–37. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i1.110>
- Gams, I. 1970. Maximisation of the karstic underground water flow in example of the area among the Karst poljes of Cerknica and Planina. *Acta Carsologica*, 5, 171–187.
- Gospodarič, R., Habič, P. (ur.) 1976. Underground water tracing: Investigations in Slovenia 1972–1975. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, str. 312, Postojna.
- Gruber, T. 1781. Briefe Hydrographischen und physikalischen Inhalts aus krain, Wien, 159.
- Habič, P. 1974. Tesnenje požiralnikov in presihanje Cerkniškega jezera. *Acta Carsologica*, 6, 37–55.
- Hacquet, B. 1778–1789. *Oryctographia Carniolica, oder Physikalische Erdbeschreibung des Herzogthums Krain*. Breitkopf, 4 vols, Leipzig.
- Jenko, F. 1959. Hidrogeologija in vodno gospodarstvo krasa. Državna založba Slovenije, str. 237, Ljubljana.
- Kovačič, G. 2010. An attempt towards an assessment of the Cerknica polje water balance. *Acta Carsologica*, 39 (1), 39–50. <https://doi.org/10.3986/ac.v39i1.111>
- Kovačič, G., Petrič, M., Ravbar, N. 2020. Evaluation and quantification of the effects of climate and vegetation cover change on karst water sources: Case studies of two springs in south-western Slovenia. *Water*, 12 (11), 3087. <https://doi.org/10.3390/w12113087>
- Kranjc, A. 1986. Cerkniško jezero in njegove poplave, *Geografski zbornik*, 25, 71–123.
- Kranjc, A. 1987. Cerkniško jezero, primer človekovega vpliva na kraško hidrografijo. *Notranjska, Zbornik 14. zborovanja slovenskih geografov*, 155–166.
- Kranjc, A. 2002a. Hidrološke značilnosti. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 27–38). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Kranjc, A. 2002b. Geologija in geomorfologija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 19–25). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Kranjc, A. 2002c. Speleologija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 39–43). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Mayaud, C., Gabrovšek, F., Blatnik, M., Kogovšek, B., Petrič, M., Ravbar, N. 2019. Understanding flooding in poljes: a modelling perspective. *Journal of Hydrology*, 575, 874–889. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.04.092>
- Miklič, S., Trobec, T. 2023. Sezonske spremembe gladine Cerkniškega jezera v obdobju 1961–2020. *Dela*, 59, 91–120. <https://doi.org/10.4312/dela.59.91-150>
- Nagel, J. A. 1748. Beschreibung deren auf aller: höchsten Befehl ihre Röm: kayl: und königl: Maytt: Francisci I., untersuchten, in dem Herzogtum Crain befindlichen Seltenheiten der Natur. Österreichische National Bibliothek, str. 97, Wien.
- Putick, V. 1889. Die hydrologischen Geheimnisse des Karstes und seine unterirdischen Wasserläufe : auf Grundlage der neuesten hydrotechnischen Forschungen. Himmel und Erde, str. 13, Berlin.
- Ravbar, N., Mayaud, C., Blatnik, M., Petrič, M. 2021. Determination of inundation areas within karst poljes and intermittent lakes for the purposes of ephemeral flood mapping. *Hydrogeology Journal*, 29 (1), 213–228. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02268-x>
- Shaw, T., Čuk, A. 2015. Slovene karst and caves in the past. Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU, str. 464, Postojna.

Smrekar, A. 2000. Cerkniško polje kot primer poseljenega kraškega ranljivega območja. *Geographica Slovenica* 33(1), 117–156.

Steinberg, F. A. 1758. Gründliche Nachricht von dem Innen-Crain gelegenen Czirknitzer See ... Lechner, str. 235, Gratz.

Valvasor, J. W. 1689. Die Ehre dess Hertzogthums Crain ... W. M. Endter, 4. Vols, Laybach & Nürnberg.

Wernher, G. 1551. De admirandis Hungariae aqvis hypomnematation. Aquila, str. 20, Wien.

Žibrik, K., Lewicki, F., Pičinin, A. 1976. Hydrologic investigations. Investigations in Ljubljana river basin, Investigations before the tracing test 1972–1975. V R. Gospodarič, P. Habič (ur.), Underground water tracing: Investigations in Slovenia 1972–1975 (str. 43–56). Postojna, Inštitut za raziskovanje krasko ZRC SAZU.

Ekosistem, ki mu vladajo motnje

Alenka Gaberščik in Igor Zelnik

Uvod

Koncept ekosistema je prvi predlagal Sir Artur G. Tansley (Tansley, 1935). Ekosistem je opredelil kot celoto življenjskega prostora z določenimi fizičnimi značilnostmi in tam živeče življenjske združbe. Podobna je opredelitev ekologa Eugena P. Oduma, ki pravi, da ekosistem tvorita življenjska združba in neživo okolje, ki sta neločljivo povezana (Odum, 1971). Elemente ekosistema med seboj povezuje pretok energije in kroženje snovi. Energija skozi ekosistem prehaja preko spletov različnih trofičnih ravni organizmov, obenem pa po isti poti krožijo tudi snovi. Učinkovitost rabe virov in energije v ekosistemu je odvisna od okoljskih razmer, vrstne sestave in prilagoditev organizmov, ki optimizirajo delovanje ekosistema (Odum in Barrett, 2005). Ekosistem je tako območje krajine (npr. gozd, mokrišče ali travnik), ki deluje kot celota glede na pretok energije, biogeokemična kroženja, vrstno sestavo in okoljske razmere, oziroma, lahko tudi rečemo, da je ekosistem funkcionalna enota krajine.

Zgradba ekosistema se postopno spreminja in v ugodnih razmerah postaja vse bolj celostna. Ekosistem oblikujejo zunanji (osnovni) dejavniki, kot so klima, matična kamnina, relief, združba, ki je prisotna na območju in notranji dejavniki, ki vplivajo na ekosistemske procese. Med notranje dejavnike sodijo viri, motnje, organizmi ter kemijski in nekateri fizikalni dejavniki, ki vplivajo na organizme, vendar jih organizmi ne izrabljajo (npr. T, pH, redoks potencial tal,...). Poglavitni lastnosti ekosistema sta vitalnost, ki jo ocenjujemo glede na stopnjo presnove oziroma produktivnosti in stabilnost. Stabilnost je sposobnost sistema, da premaga motnje brez večjih sprememb v zgradbi, kar pomeni, da ni velikih nihanj v populacijah. Teoretično je stabilnost opredeljena s številom povezav med organizmi oziroma biotsko raznovrstnostjo (Schaefer, 1994). Stabilnost je lahko posledica (1) stalnosti, ki pomeni, da sistem ni moten in se ne spreminja, (2) krožnosti, ki pomeni, da se sistem spreminja, ampak se vrača v prejšnje stanje, kot na primer na območjih sezonskih ritmov (padavine, temperature), (3) odpornosti, ki pomeni, da je sistem moten, vendar se funkcija ne spreminja ter (4) prožnosti, ki pomeni, da se sistem spreminja z motnjami, vendar se po motnjah vrača v prvotno stanje (npr. presihajoča jezera) (Chapin in sod., 2012). Biotska raznovrstnost lahko ugodno vpliva na ekosistemsko produktivnost in ekosistemske storitve, ki so odvisne od produktivnosti, saj povečuje odpornost na skrajne dogodke (Isbell in sod., 2015). Ekosistemi so bolj ali manj odprti in povezani z drugimi ekosistemi v krajini. Izmenjava med ekosistemi in širšim okoljem je abiotska (izmenjava energije, plinov, vode, hranil) in biotska (prenos s pomočjo organizmov).

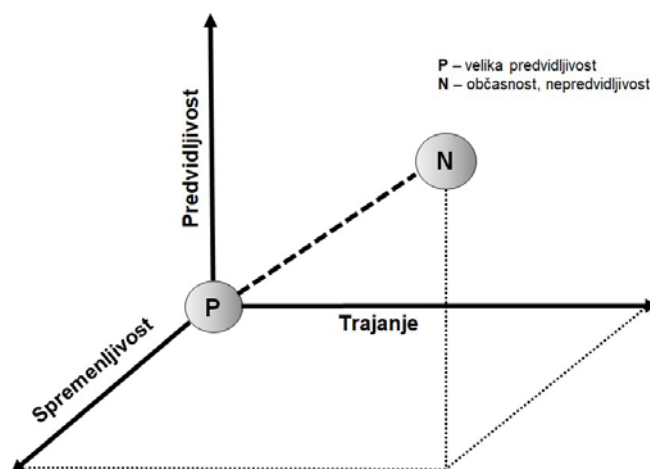
V številnih ekosistemih imajo pomembno vlogo motnje. To so fizikalni in biotski dejavniki (kot so na primer paša, ogenj in spremembe vodostaja), ki povzročajo poškodovanost ali smrt organizmov, obenem pa vplivajo na kakovost habitatov ter na razpoložljivost organskih snovi in hranil. Posledica motenj so lahko hitre spremembe zgradbe in delovanja ekosistema. Učinek motenj je odvisen od vrste, jakosti, časa pojavljanja in obsega motnje ter občutljivosti ekosistema (Odum in Barrett, 2005). Ekosistemi, ki so izpostavljeni pogostim motnjam, so navadno robustnejši, saj so tamkajšnji organizmi na motnje dobro prilagojeni. Bolj ali manj redne, vendar nenadne fizične motnje vzdržujejo ekosistem na določeni stopnji sukcesijskega razvoja (Odum, 1971). To velja tudi za ekosisteme, ki so podvrženi velikim spremembam vodostaja, kamor sodi tudi

in skozi bruhalnike in estavele, odteka skozi ponikve, ponorne jame in estavele ter nadaljuje pot po podzemnih poteh.



Slika 2: Pogled na Cerknica polje z reko Stržen, ki meandira preko polja in na Slivnico v ozadju (foto: Matej Blatnik).

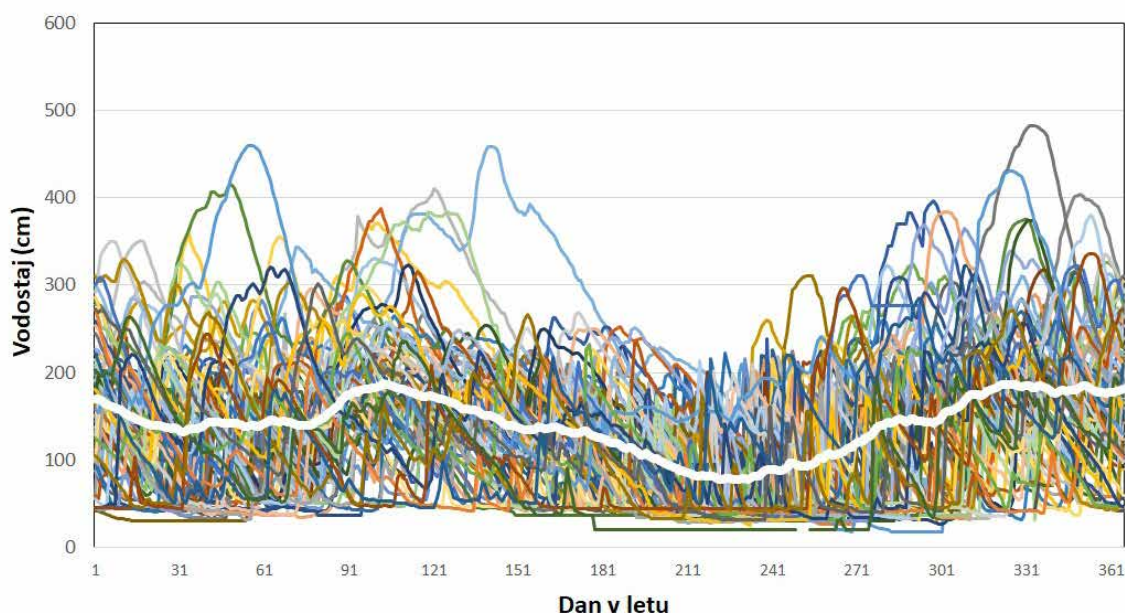
Presihajoče Cerknica jezero uvrščamo med kraška mokrišča (Pipan in sod., 2022). Izraz mokrišče uporabljamo za območja, kjer so tla stalno ali občasno nasičena z vodo ali poplavljenjena, s tekočo ali stoječo vodo, slano vodo, somornico ali sladko vodo in kjer poplavljanje vpliva na življenjsko združbo in ekološke procese (Boulton in Brock, 1999). Mokrišča so lahko naravni ali pa umetno nastali ekosistemi. Lahko so ekotoni (prehodni sistemi med vodo in kopnim) ali samostojni ekosistemi. Samostojni ekosistemi so ugrezninska mokrišča, kjer se pojavljajo velike razlike v lokalni hidrologiji ali pa ciklična (krožna) mokrišča, kjer je cikličnost posledica sprememb vegetacije in hidroloških sprememb (Mitsch in Gosselink, 2015). Med slednje sodi tudi presihajoče Cerknica jezero. Zgradba mokrišč je pogojena s klimo, s krajinskimi značilnostmi in z vodnim režimom. Pomembni vidiki vodnega režima mokrišča so časovno pojavljanje (stalna, sezonska, občasna mokrišča), pogostost pojavljanja vode (frekvenca izsuševanja in poplavljanja), trajanje poplav, obseg in globina vode (raznolikost hidrološkega režima v prostoru), variabilnost (spremembe v času) ter predvidljivost (stalnost sprememb) (slika 3).



Slika 3: Odnos med spremenljivostjo, predvidljivostjo in trajanjem prisotnosti poplav oblikuje specifičen tip mokrišča (povzeto po Boulton in Brock, 1999).

Kateri so glavni pogoji, ki omogočajo obstoj in ohranjanje presihajočega Cerkniškega jezera? Prvi pogoj je velika količina vode, ki se v kratkem času zbere na območju Cerkniškega polja in v zaledju. Obilica vode je posledica velike količine padavin (1700–1800 mm) (Zupančič, 2002a), lege jezera v kotlini, obdani z vzpetinami, kraškega značaja območja in zato obsežnega povodja (475 km²). Kar 80 % vode je kraškega izvora in pride na polje po podzemnih poteh. Ko se na dnu kraškega polja zbere več vode kot jo lahko odteče po podzemnih poteh, nastane jezero. Ob normalnih poplavah je poplavljen 53 % površine polja (Kranjc, 2002a). Drugi pogoj je učinkovit odtok in velika evapotranspiracija. Geološko podlago polja tvorita dolomit in apnenec, ki omogočata nastanek ponornih jam, ponikev in estavel. Te so povezane z obsežnim jamskim sistemom, ki ga tvorijo 3 skupine jam, pri čemer sta 2 od teh ključni za vodni režim jezera (Kranjc, 2002b). Spremembe vodne gladine so odvisne od količine padavin in njihove časovne razporeditve, vendar je korelacija med obema dejavnikoma šibka zaradi postopnega dotoka vode iz oddaljenih območij, kot so Bloška planota in Loška dolina.

Za Cerkniško jezero so značilne spomladanske in jesenske poplave, ki sovpadajo z največjo povprečno mesečno količino padavin (Zupančič, 2002a) ter poletne suše, ko voda ostaja le v strugi Stržena in pritokih jezera. V povprečju je območje poplavljenokrog 9 mesecev na leto, medtem ko sušno obdobje traja okrog 3 mesece na leto. Jezero nastane v nekaj dneh, voda pa odteka počasneje, odvisno od okoljskih razmer, kot so temperature in količina padavin (navadno v 3-4 tednih) na območju polja in v zaledju (Kranjc, 2002a). Meritve kažejo, da je časovno pojavljanje skrajnih vodostajev na Cerkniškem jezeru zelo nepredvidljivo, večji obseg poplav pa se je v obdobju 1954 do 2022 pojavil le nekajkrat (slika 4). Povprečje vodostajev kaže rahel višek v spomladanskem času (v aprilu) in nižek v poletnem času (v avgustu) in ponovno višek pozno jeseni in pozimi. Iz slike 4 so razvidne tudi pogoste kratkotrajne spremembe vodostaja, ki imajo velik vpliv na življenjsko združbo (Dolinar in sod., 2016; Ojdanič in sod., 2023).



Slika 4: Spremembe vodostaja na postaji Stržen (Dolenje Jezero) na Cerkniškem jezeru. Posamezne barvne črte predstavljajo posamezna leta od leta 1954 do 2022. Bela črta je povprečje vseh let (vir podatkov ARSO).

Stabilnost ekosistema Cerkniškega jezera pogojuje velika prožnost življenjske združbe, ki omogoča, da se sistem zaradi sprememb vodostaja spreminja, vendar se nenehno vrača v prvotno stanje. Za vitalno združbo je ključnega pomena usklajenost življenjskih krogov organizmov (npr. rastlin, žuželk, rib, dvoživk, ptic) s periodičnostjo poplav in suš (Odum, 1971). Čim bolj nenadne in nepredvidljive so spremembe, tem večji so negativni vplivi na življenjsko združbo. Vplivi sprememb na različne skupine organizmov z različnimi življenjskimi strategijami so različni. Uspeh organizmov v nenehno spreminjajočem se okolju omogočajo kozmopolitizem (npr. navadni trst), kratek življenjski cikel (npr. alge parožnice), učinkovito nadomeščanje poškodovanih tkiv pri rastlinah, velika fenotipska plastičnost ter amfibijski značaj organizmov ter obstojni stadiji organizmov (npr. zooplankton). Amfibijskega značaja nimajo le živali, temveč tudi nekatere rastlinske vrste, ki jim velika fenotipska plastičnost omogoča življenje v vodi in na kopnem (Gaberšček, 1993; Germ, 2000; Šraj Kržič in Gaberšček, 2005) (slika 5).



Slika 5: Cerkniško jezero je raj za različne predstavnike iz razreda dvoživk (Amphibia), kamor sodi tudi pisana žaba (*Rana lessonae*, Camerano, 1882) kot tudi za predstavnice taksonomsko raznolike skupine rastlin z amfibijskim značajem, kamor sodi tudi lasastolistna vodna zlatica (*Ranunculus trichophyllus* Chaix ex Vill.) (foto: Matej Blatnik).

Zonacija in mozaičnost

Keddy (2010) je opredelil mokrišča glede na tip vegetacije. To so (1) mokrišča z lesnato vegetacijo (npr. v Sloveniji poplavni in močvirni gozdovi), ki uspevajo na občasno poplavljenih ali z vodo nasičenih tleh (vendar ne v šoti), (2) mokrišča, porasla z zelnato vegetacijo (sestoji močvirskih rastlin – navadni trst, rogoz,...), prav tako zakoreninjena v z vodo nasičenih tleh (vendar ne v šoti), (3) visoka barja s prevladujočimi šotnimi mahovi, ostričevkami in vresovkami, z debelo plastjo šote, (4) nizka barja, kjer prevladujejo šaši in trave (s plitvo organsko plastjo), (5) mokrotni travniki, kjer prevladujejo zelne rastline, ki so ukoreninjene v občasno poplavljenih tleh in so v sušnem obdobju pogosto pokošeni, ter (6) območja plitve vode, kjer uspevajo prave vodne rastline.

Na območju Cerkniškega jezera najdemo različne tipe vegetacije (slika 6). Fizični dejavniki in biološke interakcije pogojujejo nastanek različnih habitatov, kot so vodni habitati (pritoki, glavni tok reke Stržen), občasno vodni oziroma presihajoči habitati (celotno območje normalnih poplav), redko poplavljeni habitati, v katerih so tla trajno ali občasno nasičena z vodo (prehodno barje pri Dujicah, nizka barja, mokrotni travniki) ter kopenski habitati, ki navadno niso poplavljeni (travniki) (Martinčič in Leskovar, 2002).



Slika 6: Raznolikost vegetacije Cerkniškega polja je posledica razgibanosti površine, antropogenih dejavnikov (npr. košnje) in hidroloških razmer (foto: Matej Blatnik).

Rastline teh habitatov so raznolikih rastnih oblik od (1) pravih vodnih rastlin, med katere sodijo: potopljene rastline (npr. bleščeči dristavec – *Potamogeton lucens* L., klasasti rmanec – *Myriophyllum spicatum* L., vretenčasti rmanec – *M. verticillatum* L. in najbolj razširjene alge parožnice – rod *Chara* L.), plavajoče pritrjene rastline (rumeni blatnik – *Nuphar luteum* (L.) Sibth. & Sm., beli lokvanj – *Nymphaea alba* L.), vrste z amfibijskim značajem (vodna dresen – *Polygonum amphibium* L., prava potočarka – *Rorippa amphibia* (L.) Besser, velika zlatica – *Ranunculus lingua* L., lasastolistna vodna zlatica – *Ranunculus trichophyllus* Chaix, navadna smrečica – *Hippuris vulgaris* L., širokolistna koščica – *Sium latifolium* L., kobulasta vodoljuba – *Butomus umbellatus* L., trpotčasti porečnik – *Alisma plantago-aquatica* L., navadna streluša – *Sagittaria sagittifolia* L., vodna meta – *Mentha aquatica* L., močvirska spominčica – *Myosotis scorpioides* L. agg., do (2) močvirskih rastlin (navadni trst – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., jezerski biček – *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla, pisana čužka – *Phalaris arundinacea* L., močvirski grint – *Senecio paludosus* L. ter šaši, kot so togi šaš – *Carex elata* All., obrežni šaš – *C. riparia* Curtis, (3) rastlin nizkih barij (črnikasti sitavec – *Schoenus nigricans* L. in rjasti sitavec – *S. ferrugineus* L., bela kljunka – *Rhynchospora alba* (L.) Vahl, srednja rosika – *Drosera intermedia* Hayne, ozkolistni munec – *Eriophorum angustifolium* Honck, alpski mavček – *Trichophorum alpinum* (L.) Pers. ter (4) rastlin mokrotnih travnikov (visoki trpotec – *Plantago altissima* L., modra stožka – *Molinia caerulea* (L.) Moench, rušnata masnica – *Deschampsia cespitosa* (L.) P.Beauv., zdravilna strašnica – *Sanguisorba officinalis* L., močvirski svišč – *Gentiana pneumonanthe* L., močvirski ušivec – *Pedicularis palustris* L., bleščeči mleček – *Euphorbia lucida* Waldst. & Kit.) (Martinčič in Leskovar, 2002). Kljub jasnim vzorcem pa so razlike v zastopanosti rastlinskih vrst na območjih večjih sprememb vodostaja lahko precejšnje, kar so pokazale raziskave v vodnih okoljih Cerkniškega jezera (Urbanc-Berčič in sod., 2005). Razlike v zastopanosti rastlinskih vrst so odvisne od časovnega pojavljanja in obsega poplav. Na primer, leto 2008 je bilo zaznamovano z neprekinjenimi

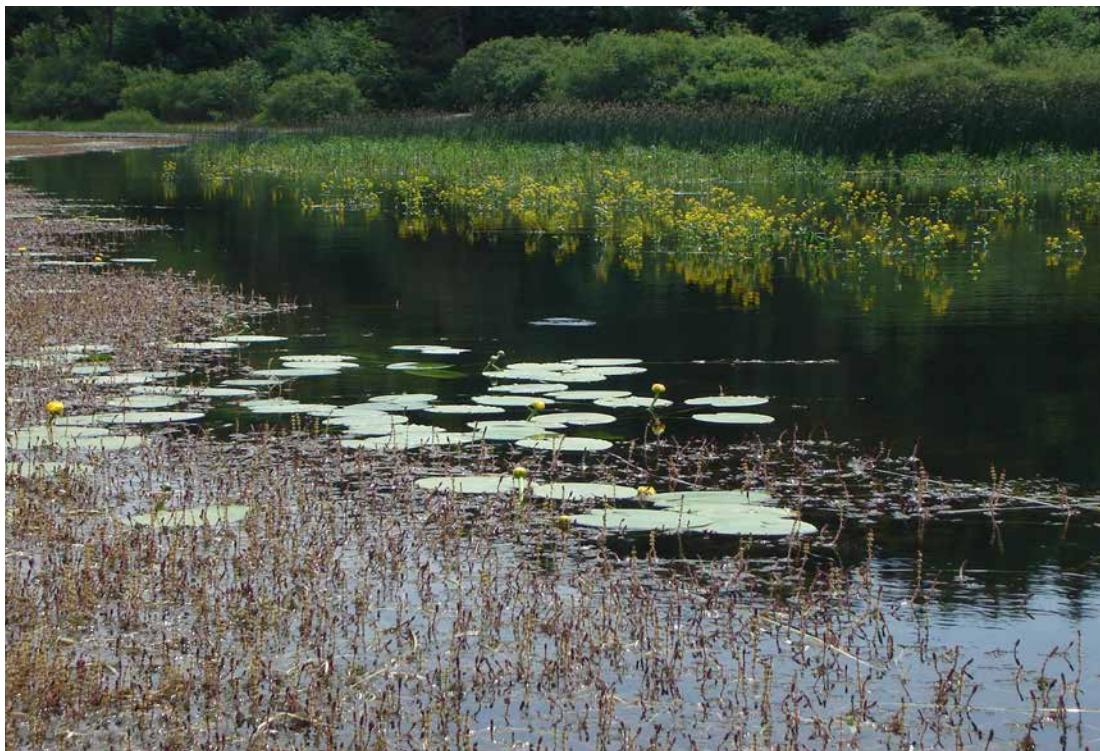
poplavi skozi celotno vegetacijsko sezono, kar se je odražalo tudi v pojavljanju posameznih rastlinskih vrst znotraj posameznih habitatov. Vodni habitatni so bili vrstno pestri in tudi pokrovnost vrst je bila velika. Preproge parožnic v globljih predelih jezera so bile debele tudi več kot 0,5 m. Prave vodne rastline, kot je klasasti rmanec in rastline s plavajočimi listi kot sta vodna dresen in dresen in rumeni blatnik, so se množično pojavljale (slika 7) (Poročilo kartiranje habitatnih tipov na območju Cerkniškega jezera, 2009).



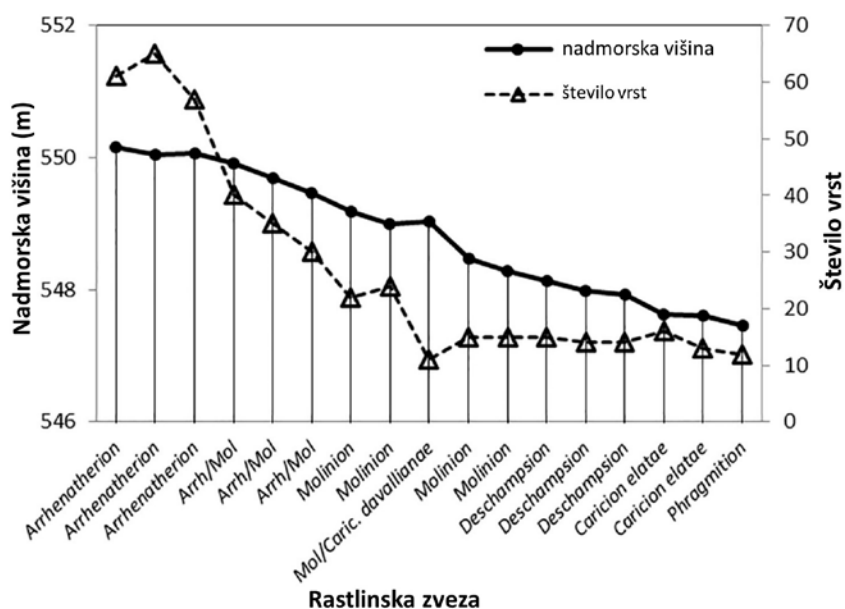
Slika 7: Dolgotrajne obsežne poplave v letu 2008 so omogočile bujen razvoj vodne vegetacije. Množično pojavljanje in cvetenje klasastega rmanca izven struge Stržena je na Cerkniškem jezeru redek pojav (foto: Alenka Gaberščik).

Zaradi neživih dejavnikov kot so vodostaj, oblikovanost površine, vrsta in količina usedlin, kamninska podlaga, biotske interakcije (npr. kompeticija) ter delovanje človeka (košnja in paša), se pojavljata tudi zonacija in mozaičnost razporeditve vegetacijskih tipov, rastlinskih združb in vrst (slika 8). Na redko poplavljenih, najbolj dvignjenih ploskvah, je prevladovala vegetacija zmerno vlažnih travnikov, ki je proti jezeru prehajala v vlagoljubno vegetacijo mokrotnih travnikov iz zvez *Molinion* in *Deschampsion*. Nižje ležeče habitate, kjer so tla navadno namočena do julija, so naseljevale močvirske združbe, medtem ko so bile združbe emerznih makrofitov na najnižje ležečem delu preiskovanega transekt (slika 9). Na ploskvah je bilo zabeleženih več kot 100 vrst vaskularnih rastlin. Bogastvo vrst se je zmanjševalo z naraščanjem vlage v tleh in povečevalo z nadmorsko višino (slika 9). Najpestrejši del gradienta predstavlja travnik, kjer se množično pojavlja zdravilna strašnica (*Sanguisorba officinalis*) (slika 10). Poplave nižje ležečih predelov je povzročila jezerska voda, bogata s kalcijem (Ca), medtem ko so bili dvignjeni habitatni večinoma odvisni od padavin, revnih s Ca. Med zanimivejše dele gradienta sodijo mokrotni travniki z mod-

ro stožko in s črnkastim sitovcem, kjer se spomladi množično pojavlja ilirski meček (*Gladiolus iliricus* W.D.J. Koch) (slika 11). Mokrotni travniki pa so tudi habitati različnih orhidej (slika 12).



Slika 8: Zonacija rastlinskih vrst na Cerknškem jezeru pri Gorici na gradientu kopno/voda, od lesnatih na kopnem, preko močvirskih in vrst z amfibijskim značajem, do ukoreninjenih vrst s plavajočimi listi in potopljenih vrst vodnih rastlin, ki pa večinoma cvetijo nad vodo (foto: Alenka Gaberščik).



Slika 9: Rastlinske zveze in število rastlinskih vrst na 17 ploskvah glede na padajočo nadmorsko višino in s tem glede na daljše trajanje poplavalne vode (povzeto po Gaberščik in sod., 2018).



Slika 10: Na zgornjem delu gradienta se množično pojavlja zdravilna strašnica (*Sanguisorba officinalis*), ki je pogosta prebivalka vlažnih in mokrotnih travnikov (foto: Alenka Gaberščik).



Slika 11: Med slikovitejše dele gradienta sodijo mokrotni travniki z modro stožko in s črnkastim sitovcem, kjer spomladi zacveti ilirski meček (*Gladiolus iliricus* W.D.J. Koch) (foto: Mateja Grašič).



Slika 12: Na mokrotnih travnikih so pogoste tudi orhideje, kot sta močvirska kukavica (*Orchis palustris* Jacq.) (levo) in navadna močvirnica (*Epipactis palustris* (L.) Crantz.) (desno) (foto: Alenka Gaberščik).

Spremembe vodostajev imajo za posledico tudi spreminjanje kakovosti vode (Boulton in Brock, 1999), saj bogata mokriščna vegetacija, vključno z občasnim pojavljanjem fitoplanktona, sproti porablja hranila, ki so na razpolago. Zato lahko prehodno pride do pomanjkanja hranil v vodi (oligotrofosti), kar izkoristijo mesojede vodne rastline, kot sta srednja in južna mešinka (*Utricularia intermedia* Hayne in *U. australis* R.Br.). Predstavnice iz rodu mešink (*Utricularia*) sodijo med posebnije med mesojedimi rastlinami, saj imajo liste preobražene v majhne mehurjaste pasti (mešičke) za lovljenje plena, predvsem zooplanktona, ki služi kot vir hranil (Sirová in sod., 2003). Zapiranje pasti, ki posega plen, je med najhitrejšimi gibanji v rastlinskem kraljestvu in traja le pol milisekunde (Poppinga in sod., 2016). Hranilno revnejše okolje pa najdemo tudi na prehodnem barju Dujice, kjer se pojavlja srednja rosika (*Drosera intermedia* Hayne).

V zaledju jezera uspevajo obsežni dinarski gozdovi bukve, jelke in spomladanske torilnice (*Omphalodo-Fagetum*), ki segajo prav do jezera (slika 13). Združba v neprekinjenih sestojih prekriva severna in severovzhodna pobočja Javornika do višine 700 m. Dolinske lege naseljuje submontanski bukov gozd (*Haquetio-Fagetum*), topla jugozahodna pobočja pa termofilni bukov gozd (*Ostryo-Fagetum*). Na strmih suhih toplih rastiščih uspeva združba trirobe košeničice in rdečega bora (*Genisto januensis-Pinetum silvestris*) (Zupančič, 2002b).



Slika 13: Na pobočju Javornika uspevajo obsežni gozdovi bukve, jelke in spomladanske torilnice (*Omphalodo-Fagetum*), ki segajo prav do jezera. Pogled gozdove nad Jamskim zalivom, kjer so številne ponorne jame (Velika in Mala Karlovica ter Svinjska jama) na obodu jezera (foto: Matej Blatnik).

Razvoj ekosistema

Razvoj večine ekosistemov je neposredno povezan z razvojem življenjske združbe, ki s svojo prisotnostjo spreminja okolje, kar omogoča povečevanje celovitosti združbe (Odum in Barrett, 2005).

Zaradi različnih vzrokov je lahko proces sukcesije (spreminjanje združbe organizmov) spremenjen, večinoma pospešen, kot na primer opazimo v številnih jezerih, kjer zaradi vnosa hranil prihaja do procesa eutrofikacije (npr. v Blejskem jezeru). Kaj pa se dogaja na Cerkniškem jezeru? Na Cerkniškem jezeru imajo ključno vlogo pri razvoju ekosistema motnje, ki nastanejo zaradi sprememb vodostaja. Raziskave kažejo, da ponavljajoče se nenadne motnje vedno znova resetirajo sistem in ga vrnejo na določeno točko razvoja in na ta način upočasnjujejo sukcesijo. Po Odumu tudi sistemi pod vplivom motenj dosežejo višek razvoja (klimaksno stanje) (Odum, 1971). Na Cerkniškem jezeru je višek pogojen s spremembami vodostaja, zato ga imenujemo »pulzirajoči« višek (angl. *pulse, water fluctuation climax*).

Spremembe vodostaja (obseg, čas in frekvenca) so gonilna sila in omejujoč dejavnik procesov v ekosistemu. Povzročajo odlaganje in erozijo sedimentov (slednja trenutno na Cerkniškem jezeru prevladuje) in s tem vplivajo na oblikovanje jezerskega dna (Kranjc, 2002a). Vplivajo na pestrost habitatov v času in prostoru ter delujejo kot fizična sila, ki poškoduje organizme in premešča organske snovi (npr. opad navadnega trsta). Vplivi sprememb vodostaja na življenjsko združbo so tudi posredni preko vpliva na dostopnost hranil, prisotnost ali odsotnost kisika, razgradnjo opada in kakovost vode. Učinek motenj je večji na območju normalnih poplav, medtem ko se nad to mejo učinek manjša, saj je poplavljenost tam kratkotrajna. Manjši vpliv motenj se odraža

v zaraščanju območij nizkih barij na obrobju jezera. Na primer na območju Dujic je sukcesija hitrejša, zato se območje zarašča z lesnato vegetacijo (Bordjan in Bordjan, 2014). Ogroženi so tudi mokrotni travniki, ki so jih ohranjale poplave v spomladanskem času. Zaradi spremenjenosti hidroloških razmer je za njihovo ohranjanje ključnega pomena košnja, saj se ob odsotnosti košnje tudi mokrotni travniki zaraščajo z lesnatimi vrstami (Podrobnejši načrt upravljanja za projektno območje presihajoče Cerkniško jezero, 2009).

Vpliv sprememb vodostaja na zgradbo in delovanje ekosistema

Spremembe vodostaja vplivajo tako na zgradbo kot tudi na delovanje ekosistema. Vplivi na vrste so manjši v primeru usklajenosti njihovih življenjskih ciklov s periodičnostjo poplav in suš. Raziskave so pokazale močan vpliv na zastopanost in razvitost rastlinskih vrst v posameznem obdobju vegetacijske sezone (Urbanc-Berčič in sod., 2005), na primarno proizvodnjo vrst vključno s prevladujočim navadnim trstom, na razgradnjo opada in kolonizacijo rastlinskih korenin z glivami (Dolinar in sod., 2016; Grašič in sod., 2022; Ojdanič in sod., 2023). Ugotovljeni so bili tudi vplivi na višje trofične ravni, na primer na populacije ptic, kot so kosce (*Crex crex* (Linnaeus, 1758)) (Trontelj, 1993), veliki škurh (*Numenius arquata* (Linnaeus, 1758)) in rdečenogi martinec (*Tringa totanus* (Linnaeus, 1758)) (Podrobnejši načrt upravljanja za projektno območje presihajoče Cerkniško jezero, 2009). Pospešeno odtekanje vode s Cerkniškega polja ogroža tudi razmnoževanje oziroma mrestenje dvoživk, kot so zelena žaba (*Rana kl. esculenta* Linnaeus, 1758), zelena rega (*Hyla arborea* (Linnaeus, 1758)), veliki pupek (*Triturus carnifex* Laurenti) in navadni pupek (*Triturus vulgaris* (Laurenti, 1768)), ter drstenje rib, kot sta ščuka (*Esox lucius* Linnaeus, 1758) in linj (*Tinca tinca* (Linnaeus, 1758)) (Podrobnejši Načrt upravljanja za projektno območje presihajoče Cerkniško jezero, 2009; Povž, 2002). Odtekanje vode pa lahko preseneti tudi ličinke nekaterih žuželk, ki živijo v vodi (slika 14).

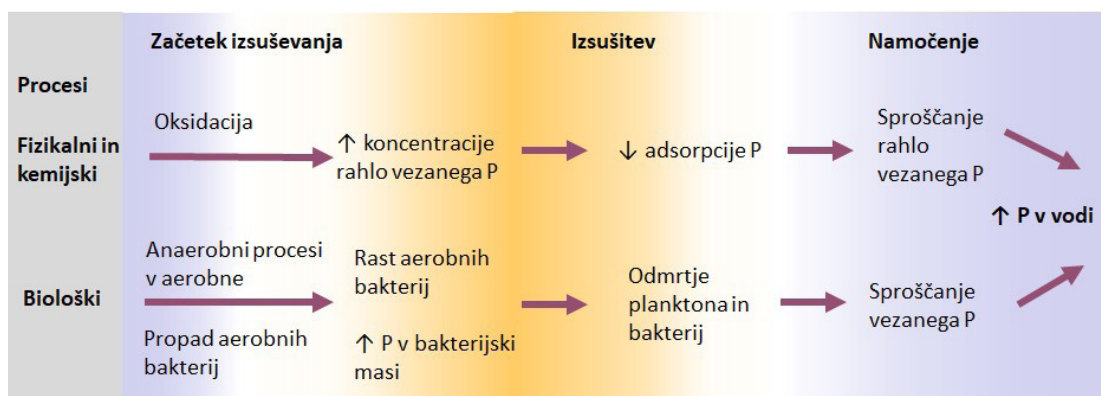


Slika 14: Žrtve odtekanja vode so tudi ličinke mladoletnic (*Trichoptera* Kirby, 1813) (levo) in ribe (desno). Ličinke mladoletnic živijo v vodi in so znane po hišicah, ki jih gradijo iz različnega materiala, od kamenčkov do delcev lesa in vodnih rastlin (foto: Alenka Gaberščik).

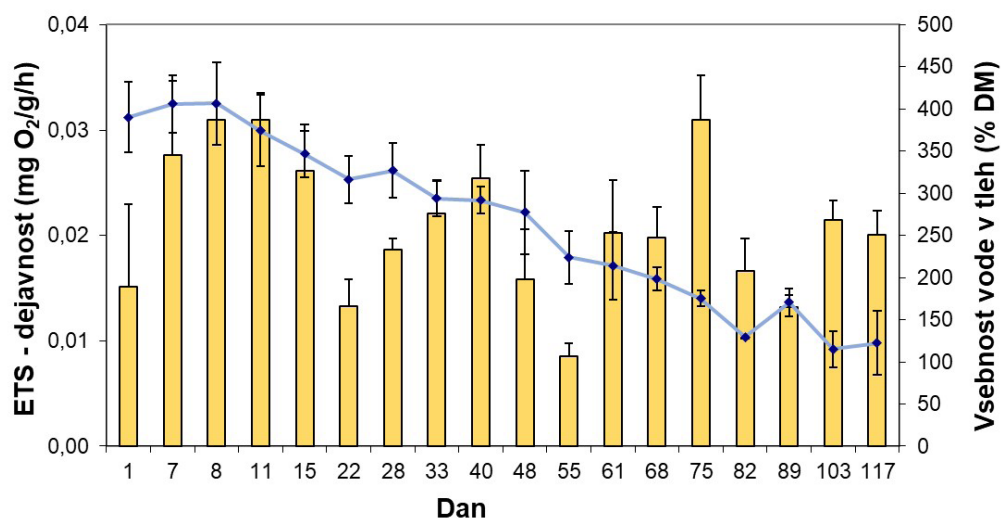
Vodostaj vpliva tudi na elementno sestavo rastlin, na primer na vsebnost silicija (Si) (Grašič in sod., 2022; Klančnik in sod., 2014) ter na fizikalne, kemijske in biološke procese v tleh. Upadanje vodne gladine in osuševanje tal omogoča oksidativne procese v tleh, ki vplivajo na kemizem rizosfere rastlin (območja, ki obdaja rastlinske korenine, kjer poteka interakcija med koreninami in talnimi mikroorganizmi) in dostopnost hranil. Raziskave so pokazale, da je med sušo koncen-

tracija rastlinam dostopnega fosforja (P) v tleh majhna, deževje oziroma poplavljanje pa povzroči sproščanje hranil predvsem raztopljenega P (Urbanc-Berčič in Gaberščik, 2003; McComb in Qiu, 1998) (slika 15). Učinek je odvisen od vsebnosti hranil in organskih snovi v sedimentih, načina izsuševanja (zaradi pronicanja vode v tla – gravitacijsko in zaradi izhlapevanja vode – evaporativno) ter od obsega izsuševanja. K učinku pomembno prispevata tudi način močenja tal, pri čemer je pomemben tudi vir vode (padavine, poplave vodotokov, podzemna voda), okoljske razmere (temperatura, relativna vlaga, padavine) in življenjska združba.

Izsuševanje in ponovno nasičenje tal z vodo vpliva tudi na dejavnost mikrobnih združb v tleh. Vrednosti dejavnosti terminalnega elektronskega transportnega sistema (ETS) tal, ki je odraz dejavnosti mikrobnih združb, kažejo nekakšno dušeno nihanje v času izsuševanja, kar je verjetno posledica propadanja starih in vzpostavljanja novih mikrobnih združb (slika 16) (Urbanc-Berčič, 2003).



Slika 15: Model dostopnosti P med izsuševanjem in ponovnim namočenjem (povzeto po McComb in Qiu, 1998).



Slika 16: Dejavnost terminalnega elektronskega transportnega sistema (ETS) vzorcev tal iz globine 30 cm z velikim deležem organske snovi (cca. 60 %) (rumeni stolpci) v času izsuševanja. Modra črta predstavlja % vode v tleh glede na vsebnost suhe snovi (povzeto po Urbanc-Berčič, 2003).

Zaključek

Presihajoče Cerkniško jezero je del kraške krajine in ga uvrščamo med kraška mokrišča. Pojavlja se na območju z velikimi razlikami v lokalni hidrologiji, spremembe vodostaja pa so bolj ali manj ciklične. Spremembe vodostaja za ekosistem predstavljajo motnje, ki vplivajo na življenjsko združbo in ekosistemske storitve. Ekosistemi, ki so izpostavljeni pogostim motnjam, so navadno robustnejši, saj so tamkajšnji organizmi na motnje dobro prilagojeni, čemur smo priča tudi na Cerkniškem jezeru. Za vitalno združbo je ključnega pomena usklajenost življenjskih krogov organizmov s periodičnostjo poplav in suš. Čim bolj nenadne in nepredvidljive so spremembe, tem večji so negativni vplivi na organizme. Ponavljajoče se motnje vedno znova resetirajo sistem na določeno stopnjo razvoja in na ta način upočasnjujejo sukcesijo. Tudi moteni sistemi dosežejo višek razvoja, ki je na Cerkniškem jezeru pogojen s spremembami vodostaja (angl. *water fluctuation climax*). Raziskave so pokazale močan vpliv sprememb vodostaja na zastopanost rastlinskih vrst, na primarno proizvodnjo vrst, na razgradnjo opada in na kolonizacijo korenin z glivami. Ugotovljeni so bili tudi vplivi na višje trofične ravni. Manj obsežne spremembe vodostaja na obrobju jezera se odražajo v hitrejši sukcesiji in posledično zaraščanju nekaterih območij z lesnato vegetacijo. Zaradi sprememb vodostaja, oblikovanosti površine, različne kakovosti in količine usedlin, kamninske podlage, biotskih interakcij (npr. kompeticija) ter delovanja človeka (košnja in paša) se pojavljata tudi zonacija in mozaičnost razporeditve vegetacijskih tipov, rastlinskih združb in vrst. Vodostaj vpliva tudi na elementno sestavo rastlin ter na fizikalne, kemijske in biološke procese v tleh. Upadanje vodne gladine in osuševanje tal omogoča oksidativne procese v tleh, ki vplivajo na kemizem rizosfere rastlin, na dejavnost mikrobnih združb in dostopnost hranil.

Summary

An ecosystem, governed by disturbances

Ecosystem is a biological system in which organisms are intimately related to their environment. Along with environmental factors, disturbances play an important role in many ecosystems. Among others, disturbances include water level fluctuations, which are characteristic of Lake Cerknica and affect all ecosystem levels. Today, frequency and unpredictability of disturbances on our planet as well as the extreme hydrological events (floods and droughts) are increasing. Therefore, the intermittent Lake Cerknica represents a model system that may serve to improve the understanding of the consequences of extreme water level fluctuations that also occur in other water bodies.

Intermittent Lake Cerknica is a karst wetland, where changes in hydrology in time and in space shape the ecosystem. The lake is located at the bottom of the karst polje at the transition area between the Dinaric and Alpine regions. Phytogeographically, it belongs to the Dinaric region, while hydrologically to the Ljubljana river basin. The bedrock consists of limestone and dolomite. The bedrock is covered by young Pleistocene and Holocene alluvial sediments. Water that flows into the karst polje from the catchment and from streams and springs, drains predominantly under the surface, through underground pathways *via* sinkholes and estavelles.

Factors that contribute the most to the formation of the intermittent Lake Cerknica are (1) the large amount of water that accumulates in a short period of time at the Cerknica polje as a

result of the high precipitation rate (1700–1800 mm), (2) the location of the lake in a basin surrounded by hills, (3) the karst character of the area and therefore a large catchment area (about 475 km²), and (4) efficient drainage and high evapotranspiration rate. Bedrock of different resistance to chemical weathering enabled the formation of gorges, sinkholes and estavelles, which are connected to an extensive cave system. As much as 80% of the water in the lake is of karst origin and reaches the polje through underground pathways. When the accumulation of the water at the bottom of a karst polje is sufficient and inflow exceeds its drainage underground and evapotranspiration rate, respectively, a lake is formed. During usual flooding, the water covers 53% of the field. Changes in water level depend on the amount and timing of rainfall, but the correlation between these two factors is weak due to the gradual inflow of water from distant areas. Lake Cerknica is characterized by spring and autumn floods, which coincide with peak monthly rainfall and summer droughts, when water remains only in the Stržen riverbed and in the tributaries of the lake. On average, the area is flooded for about 9 months per year, while the dry season lasts about 3 months per year. The lake is usually formed in only a few days, while water drains gradually, depending on the environmental conditions (usually in 3–4 weeks). Measurements of water level show that the timing of extreme water levels in Lake Cerknica is very unpredictable, with short-term moderate changes in water levels being very frequent. The average water level shows a peak in spring (April) and a depression in summer (August), and peaks again in late autumn and winter.

Various physical factors and biological interactions support the formation of different habitats, namely aquatic habitats (tributaries, the main course of the Stržen River), temporarily aquatic or intermittent habitats (which comprise the whole area of normal flooding), rarely flooded habitats with permanently or temporarily water-saturated soils (the transitional mire at Dujice, low marshes, wet meadows), and terrestrial habitats that are usually not flooded (mesic and dry meadows). Physical factors (landforms, sediment quality and quantity, water regime), biological interactions (e.g., competition), and human activity (mowing and grazing) result in the zonation and mosaic distribution of these vegetation types, and also of the plant communities and species.

The development of most ecosystems is directly related to the development of the biotic community, whose presence alters the environment in such way that it enables the community complexity to increase. The succession process can be altered due to a variety of reasons. In Lake Cerknica, repeating disturbances are resetting the system and are thus slowing down succession. Ecosystem community that is predominantly regulated by disturbances reaches a developmental peak (climax state), which is due to changes in water level and thus defined as pulse or water fluctuation climax.

Water level fluctuations (magnitude, timing, and frequency) are both a driving force and a limiting factor of ecosystem processes. They act directly, namely they cause sediment deposition and erosion and thus affect the formation of the lake bottom. They affect the diversity of habitats in time and space, and act as a physical force that damages organisms and transfers organic matter (litter). The effect of water level fluctuations on biotic community is also indirect through their impact on nutrient availability, the presence or absence of oxygen, litter decomposition, and water quality. The impact of disturbances is greater in the central part of the lake than in its margin, where succession process is more effective. This is also indicated by the overgrowing of mires at the margin of the lake, e.g., in the Dujice area, where succession is more rapid, as the areas become overgrown with woody vegetation. Overgrowing is also altering wet meadows, which depend on spring floods that are irregular. Thus, mowing is

crucial for their conservation since in the absence of mowing, wet meadows quickly become overgrown with woody species.

Water level fluctuations affect species properties, production, species presence and abundance, and interactions among species. Impacts on species are less pronounced if their life cycles are aligned with the alternation of floods and droughts. Studies have shown strong effects on the presence and development of plant species during growing season, on their primary production, on the decomposition of plant litter, and on the colonisation of plant roots by fungi. Different effects on species of higher trophic levels have also been identified. Hydrological conditions may also alter element composition of plants (e.g., silicon (Si) content), and physical, chemical, and biological processes in the soil. Draining and drying of the soil facilitate oxidative processes in the soil, which positively affect the chemistry of the plant rhizosphere and the availability of nutrients. During drought, concentration of plant-available phosphorus (P) in the soil is low, while flooding causes nutrient release, mainly of dissolved P. Drainage also affects the activity of the soil microbial communities, as it causes the collapse of old microbial communities and the establishment of new ones.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 in projekta eLTER – European Long-Term Ecosystem and socio-ecological Research Infrastructure, ki ga delno financira Evropska komisija.

Viri

- Arnell, N. W., Gosling, S. N. 2016. The impacts of climate change on river flood risk at the global scale. *Climatic Change*, 134(3), 387–401. <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1084-5>
- Bordjan, D., Bordjan, A. 2014. Effects of overgrowing at Cerknica Polje (southern Slovenia) on breeding farmland birds = Vpliv zaraščanja Cerkniškega polja (južna Slovenija) na gnezdilke kmetijske krajine. *Acrocephalus*, 35(162–163), 153–163. <https://doi.org/10.1515/acro-2014-0009>
- Boulton, A. J., Brock, M. A. 1999. Australian freshwater ecology. Processes and management. Canberra, Australia. Gleneagles Publishing, Glen Osmond SA 5064. 297 str.
- Braun-Blanquet, J. 1964. Pflanzensoziologie, grundzüge der vegetationskunde (3rd edition). Vienna. Springer Vienna. 631 str. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>
- Chapin, F. S., Matson, P. A., Vitousek, P. M. 2012. Principles of terrestrial ecosystem ecology (2nd edition). Springer Science+Business Media. 529 str.
- Dolar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>
- Dolar, N., Rudolf, M., Šraj, N., Gaberščik, A. 2010. Environmental changes affect ecosystem services of the intermittent Lake Cerknica. *Ecological Complexity*, 7(3), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.09.004>
- Gaberščik, A. 1993. Measurements of apparent CO₂ flux in amphibious plant *Polygonum amphibium* L. growing over environmental gradient. *Photosyntetica*, 29(3), 159–168.
- Gaberščik, A., Krek, J. L., Zelnik, I. 2018. Habitat diversity along a hydrological gradient in a complex wet-

- land result in high plant species diversity. *Ecological Engineering*, 118, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.017>
- Gaberščik, A., Urbanc-Berčič, O., Kržič, N., Kosi, G., Brancelj, A. 2003. The intermittent Lake Cerknica: Various faces of the same ecosystem. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 8(3–4), 159–168. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2003.00228.x>
- Gams, I. 1994. Types of the poljes in Slovenia, their inundations and land use. *Acta Carsologica*, 23, 285–302.
- Gams, I. 2004. *Kras v Sloveniji v prostoru in času = Karst in Slovenia in space and time* (2nd edition). Ljubljana. Založba ZRC. 515 str.
- Germ, M. 2000. Vpliv spremembe medija in povečanega UV-B sevanja na vrsti *Myosotis palustris* (L.) Hill in *Batrachium trichophyllum* (Chaix) Van den Bosch = The influence of medium change and enhanced UV-B radiation on *Myosotis palustris* (L.) Hill and *Batrachium trichophyllum* (Chaix) Van den Bosch [Doctoral dissertation]. Univerza v Ljubljani.
- Gospodarič, R., Habič, P. 1978. Kraški pojavi Cerkniškega polja = Karst phenomena of Cerkniško polje. *Acta Carsologica*, 8, 11–162.
- Grašič, M., Likar, M., Vogel-Mikuš, K., Samardžić, T., Gaberščik, A. 2022. Decomposition rate of common reed leaves depends on litter origin and exposure location characteristics. *Aquatic Botany*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103513>
- Isbell, F., Craven, D., Connolly, J., Loreau, M., Schmid, B., Beierkuhnlein, C., Bezemer, T. M., Bonin, C., Bruehlheide, H., de Luca, E., Ebeling, A., Griffin, J. N., Guo, Q., Hautier, Y., Hector, A., Jentsch, A., Kreyling, J., Lanta, V., Manning, P., ... Eisenhauer, N. 2015. Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature*, 526(7574), 574–577. <https://doi.org/10.1038/nature15374>
- Keddy, P. A. 2010. *Wetland Ecology Principles and Conservation* (2nd edition). Cambridge University Press. 514 str.
- Klančnik, K., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A. 2014. Silicified structures affect leaf optical properties in grasses and sedge. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 130, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.10.011>
- Kranjc, A. 2002a. Geologija in geomorfologija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 18–26). Ljubljana, Društvo Ekologov Slovenije.
- Kranjc, A. 2002b. Hidrološke značilnosti. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 27–37). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.
- Martinčič, A., Leskover, I. 2002. Vegetacija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 81–96). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- McComb, A., Qiu, S. 1998. The effects of drying and reflooding on nutrient release from wetland sediments. V W. D. Williams (ur.), *Wetlands in a dry land: understanding for management* (str. 147–159). Environment Australia.
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G. 2015. *Wetlands* (5th edition). New York. Wiley. 747 str.
- Odum, E. P. 1971. *Fundamentals of ecology* (3rd edition). Philadelphia. W.B. Saunders Co. 574 str.
- Odum, E. P., Barrett, G. W. 2005. *Fundamentals of ecology* (5th edition). Belmont, CA. Thomson Brooks/Cole. 598 str.
- Ojdanič, N., Holcar, M., Golob, A., Gaberščik, A. 2023. Environmental extremes affect productivity and habitus of common reed in intermittent wetland. *Ecological Engineering*, 189, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106911>
- Pipan, T., Petrič, M., Gaberščik, A., Culver, D. C. 2022. Wetlands in karst. V *Encyclopedia of Inland Waters* (2nd edition, str. 128–140). Oxford. Elsevier.

- Podrobnejši načrt upravljanja za projektno območje presihajoče Cerkniško jezero. LIFE-Narava: LIFE06 NAT/SLO/000069 »Presihajoče Cerkniško jezero«. 2009. Cerknica. Notranjski regijski park. 257 str.
- Poppinga, S., Weisskopf, C., Westermeyer, A. S., Masselter, T., Speck, T. 2016. Fastest predators in the plant kingdom: functional morphology and biomechanics of suction traps found in the largest genus of carnivorous plants. *AoB PLANTS*, 8. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plv140>
- Poročilo projekta LIFE06NAT/SLO/000069 »Presihajoče Cerkniško jezero«. Kartiranje habitatnih tipov na območju Cerkniškega jezera. 2009. Ljubljana. Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo. 29 str.
- Povž, M. 2002. Ribe in ribištvo. V A. Gaberščik (ur.), Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru (str. 200–207). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Schaefer, V. H. 1994. Urban biodiversity. V L. Harding, E. McCullum (ur.), Biodiversity in B.C. (str. 307–318). EnvironmentCanada, Canadian Wildlife Service.
- Sirová, D., Adamec, L., Vrba, J. 2003. Enzymatic activities in traps of four aquatic species of the carnivorous genus *Utricularia*. *New Phytologist*, 159(3), 669–675. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2003.00834.x>
- Stepišnik, U. 2020. Kraška polja v Sloveniji, *Dela*, 53, 23–43.
- Šraj Kržič, N., Gaberščik, A. 2005. Photochemical efficiency of amphibious plants in an intermittent lake. *Aquatic Botany*, 83(4), 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.05.012>
- Tansley, A. G. 1935. The use and abuse of vegetational concepts and terms. *Ecology*, 16(3), 284–307. <https://doi.org/10.2307/1930070>
- Trontelj, P. 1993. O naraovarstvenem konceptu Cerkniškega jezera s poudarkom na varstvu ptic. *Acrocephalus*, 14(56/57), 63–80.
- Urbanc-Berčič, O. 2003. Razpoložljivost nutrientov v rizosferi trstnih sestojev (*Phragmites australis*) v odvisnosti od vodnega režima na presihajočem Cerkniškem jezeru : doktorska disertacija = The availability of nutrients in the rhizosphere of the reed stands (*Phragmites australis*) in relation to the water regime in the intermittent lake Cerknica [Doctoral dissertation]. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. 100 str.
- Urbanc-Berčič, O., Gaberščik, A. 2003. Microbial activity in the rhizosphere of common reed (*Phragmites australis*) in the intermittent lake Cerkniško jezero. V J. Vymazal (ur.), Wetlands nutrients, metals and mass cycling (str. 179–190). Backhuys Publishers.
- Urbanc-Berčič, O., Kržič, N., Gaberščik, A., Germ, M. 2005. The effect of water level fluctuations on macrophyte occurrence and abundance in the intermittent Lake Cerknica. V J. Vymazal (ur.), Natural and constructed wetlands: nutrients, metals and management (str. 312–320). Backhuys Publishers.
- Zupančič, B. 2002. Klima. V A. Gaberščik (ur.), Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru (str. 4–16). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Zupančič, M. 2002. Gozdna vegetacija okolice Cerkniškega jezera. V A. Gaberščik (ur.), Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru (str. 96–105). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.

Amfibijske rastline – najuspešnejša rastlinska skupina Cerkniškega jezera

Mateja Germ, Nina Šraj, Mateja Grašič, Matej Holcar, Alenka Gaberščik

Uvod

Spremembe vodostaja ustvarjajo mozaičnost in zonacijo habitatov, kar omogoča naselitev različnim rastlinskim vrstam in oblikam. Rastline vodnih okolij ali vodni makrofiti imajo različne rastne oblike glede na njihov položaj v vodnem stolpcu ter glede na pritrjenost v substrat. Te oblike so (1) emerzni makrofiti ali helofiti (rastline, ki imajo korenine tleh, ki so stalno ali občasno poplavljeni, z zračnimi listi, npr. navadni trst – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., pisana čužka – *Phalaris arundinacea* L.), (2) ukoreninjeni natantni makrofiti (rastline, ukoreninjene v sediment, z listi, ki plavajo na površini vode, npr. beli lokvanj – *Nymphaea alba* L., rumeni blatnik – *Nuphar luteum* (L.) Sibth. & Sm.), (3) potopljene ali submerzni makrofiti (rastline, ki rastejo popolnoma potopljene pod vodo, s koreninami (ali rizoidi) zasidranimi v tla, npr. prerasolistni dristavec – *Potamogeton perfoliatus* L., klasasti rmanec – *Myriophyllum spicatum* L.) in (4) prosto plavajoči makrofiti (rastline, ki običajno plavajo na vodni površini ali pod njo, ne da bi bile trajno ukoreninjene v sedimentu, npr. mala vodna leča – *Lemna minor* L., navadni rogolist – *Ceratophyllum demersum* L.) (Chambers in sod., 2008; Fox, 1992; Hutchinson, 1975). Različne rastne oblike vodnih makrofitov imajo različne morfološke lastnosti. Listi, ki so v celoti izpostavljeni zraku, imajo zgradbo podobno mezofitom oz. higrofitom (rastlinam zmerno vlažnih in vlažnih rastišč), z listnimi režami večinoma na spodnji strani lista, včasih pa na obeh straneh. Listi, ki plavajo po vodni gladini, so običajno debeli, svetleči, z debelo kutikulo z režami na zgornji strani lista (Klančnik in sod., 2012). Potopljene rastline pa imajo tanke, dolge, trakaste ali drobno razcepljene liste, z veliko specifično listno površino, tanko kutikulo, in so večinoma brez listnih rež (Hutchinson, 1975; Rascio in sod., 1999; Germ in Gaberščik, 2003). Prave potopljene vrste so zato močno občutljive na izsuševanje in se na Cerkniškem jezeru bolj številčno pojavljajo le, kadar je vodostaj v času vegetacijske sezone dlje časa visok.

Lastnosti rastlin, ki so značilne za posamezno rastno obliko, so ključnega pomena za preživetje v določenem okolju, saj se vodno in kopensko okolje močno razlikujeta glede okoljskih razmer. Difuzija plinov v vodi je približno $10^4\times$ počasnejša kot v zraku (Maberly in Madsen, 2002), kar potopljenim rastlinam otežuje izvajanje fotosinteze in vzdrževanje aerobnega dihanja (Voeseinek in sod., 2006). Izmenjavo plinov olajšajo tanki ali razcepljeni listi, ki imajo veliko razmerje med površino in prostornino. Potopljene rastline imajo sistem prezračevalnih tkiv (aerenhim), ki poteka vzdolž rastline (od listov do korenin). Po aerenhimu prehaja kisik do korenin, v obratni smeri pa potuje ogljikov dioksid, kar predstavlja dodaten vir kisika za dihanje in vir ogljikovega dioksida za fotosintezo. Delež aerenhima pri rastlinah je odvisen od vrste in se z globino vode v habitatu veča (Boeger in Poulson, 2003). Vodne rastline z zračnimi in plavajočimi listi imajo v primerjavi s popolnoma potopljenimi rastlinami prednost pri ohranjanju optimalnih razmer za fotosintezo in dihanje. Njihovi listi so neposredno izpostavljeni zraku, kjer je dostop do ogljikovega dioksida boljši. Plavajoči listi imajo tudi nekoliko bolj razvita oporna tkiva, so debelejši in okrogle, ovalne ali srčaste oblike (Cronk in Fennessy, 2001). Plavajoči listi se od potopljenih razlikujejo tudi po debeli voskasti kutikuli, ki preprečuje zastajanje vode na listni površini in ščiti pred herbivori, obenem pa poveča odboj prekomernega sevanja z listne površine (Riederer in Müller, 2006).

Skrajni vodostaji pomenijo spremembe okoljskih razmer. V spremenljivih razmerah so zelo uspešne vrste, ki imajo amfibijski značaj oz. tako imenovane amfibijske rastline. Te lahko pripadajo različnim ekološkim in taksonomskim skupinam vodnih rastlin. Sposobne so razviti različne rastne oblike (forme) ali/in različne tipe listov (heterofilnost), ki jim omogočajo, da so lahko dejavne tako v vodi kot tudi na kopnem (Klančnik in sod., 2012; van Veen in Sasidharan, 2021). Heterofilija, ki je odraz velike fenotipske plastičnosti vrste, se je v času razvoja rastlin v vodnem okolju pojavljala večkrat in je primer konvergentne evolucije (Li in sod., 2019). Amfibijske rastline ob spremembah vodostaja niso izpostavljene le poplavljanju in pomanjkanju plinov, temveč tudi znižanju vodne gladine in izpostavljenosti zračnemu okolju, kjer so okoljski dejavniki, kot so sevanje, vlažnost in koncentracija plinov, drugačni kot v vodi, obenem pa rastlina ostane brez fizične podpore, ki jo zagotavlja voda (Braendle in Crawford, 1999). Pri teh rastlinah oskrba s plini med potopitvijo poteka tudi preko aerenhima, ki je vir kisika (O_2) za dihanje rastlinskih organov in prezračevanje rizosfere (območja, ki obdaja rastlinske korenine, kjer poteka interakcija med koreninami in talnimi mikroorganizmi) ter po drugi strani vir ogljikovega dioksida (CO_2) za fotosintezo (Rascio, 2002; Voesenek in sod., 2006). O_2 je stranski proizvod fotosinteze, CO_2 pa se sprošča pri dihanju in fotorespiraciji. Nekatere amfibijske vrste lahko kot vir ogljika za fotosintezo uporabljajo v vodi raztopljen bikarbonatni ion (HCO_3^-). Pri pH vode med 7 in 10 je razpoložljivost ogljikovega dioksida omejena in HCO_3^- je prevladujoča oblika raztopljenega neorganskega ogljika. To je težava za potopljene rastline, saj HCO_3^- za razliko od CO_2 težko prehaja skozi lipidne membrane, zato imajo številne vodne rastline posebne mehanizme za privzem HCO_3^- (Yin in sod., 2017). Tak primer je vrsta *Hygrophila difformis* Blume, ki v kopenskih razmerah razvije nazobčane liste, v vodi pa drobno razcepljene liste. Tako izvorno potopljeni kot tudi potopljeni kopenski listi so porabniki bikarbonata (Horiguchi in sod., 2019). Do zračnega CO_2 in O_2 pa lahko pridejo vrste, ki nad vodo razvijejo zračne liste (ali plavajoče na vodi) oziroma zračne poganjke, kot na primer rumeni blatnik (*Nuphar luteum*) ali navadna smrečica (*Hippuris vulgaris* L.).

Amfibijske rastline v večini vodnih teles naseljujejo ozka območja na prehodu voda-kopno. V takih okoljih navadno manj pogosto prihaja do izražanja različnih rastnih oblik in heterofilije, ki jih sproži presihanje. Cerkniško jezero je presihajoči ekosistem s skrajnimi spremembami vodostaja, zato se fenotipska plastičnost amfibijskih rastlin lahko v celoti izrazi. Iz prisotnosti vrst in njihovih rastnih oblik na določenem območju lahko sklepamo na hidrološke spremembe v okolju; tako so amfibijske rastline (značilnosti njihovih listov) pričevalci preteklih razmer v okolju. Izražanje amfibijskega značaja pri posameznih vrstah pa ni odvisno samo od okoljskih razmer, temveč tudi od genskih danosti in filogenetskega razvoja vrste (Germ in Gaberščik, 2003). Zaradi teh lastnosti lahko služijo kot model za raziskave prilagojenosti na vodno in kopensko okolje pri rastlinah z istim genomom, obenem pa je poznavanje njihovih lastnosti zelo pomembno z vidika globalnih sprememb in velikih sprememb vodostajev v različnih vodnih telesih, saj imajo amfibijske rastline velik potencial za naselitev v hidrološko skrajno motenih habitatih (Šraj-Kržič in sod., 2009).

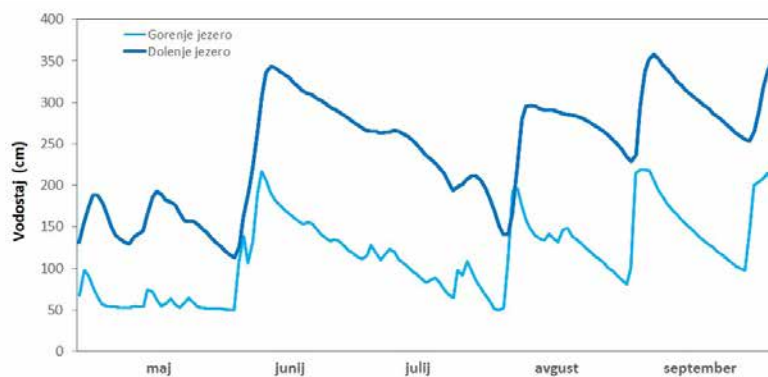
Razširjenost amfibijskih rastlin

Na Cerkniškem jezeru se amfibijske rastline navadno pojavljajo v habitatih, ki so ob visokih vodostajih pregloboki za uspevanje navadnega trsta (npr. na pobočjih ponorov), na obrobni delih sestojev trsta ter pritokih jezera in Strženu – vodotoku, ki meandrira po Cerkniškem polju. Vegetacijska sezona amfibijskih rastlin je odvisna od vodostaja. Višek navadno dosežejo, ko voda odteče, saj njihova fenotipska plastičnost omogoča hiter odziv na spremenjene okoljske razmere in tako predstavlja tekmovalno prednost pred drugimi vrstami (slika 1).



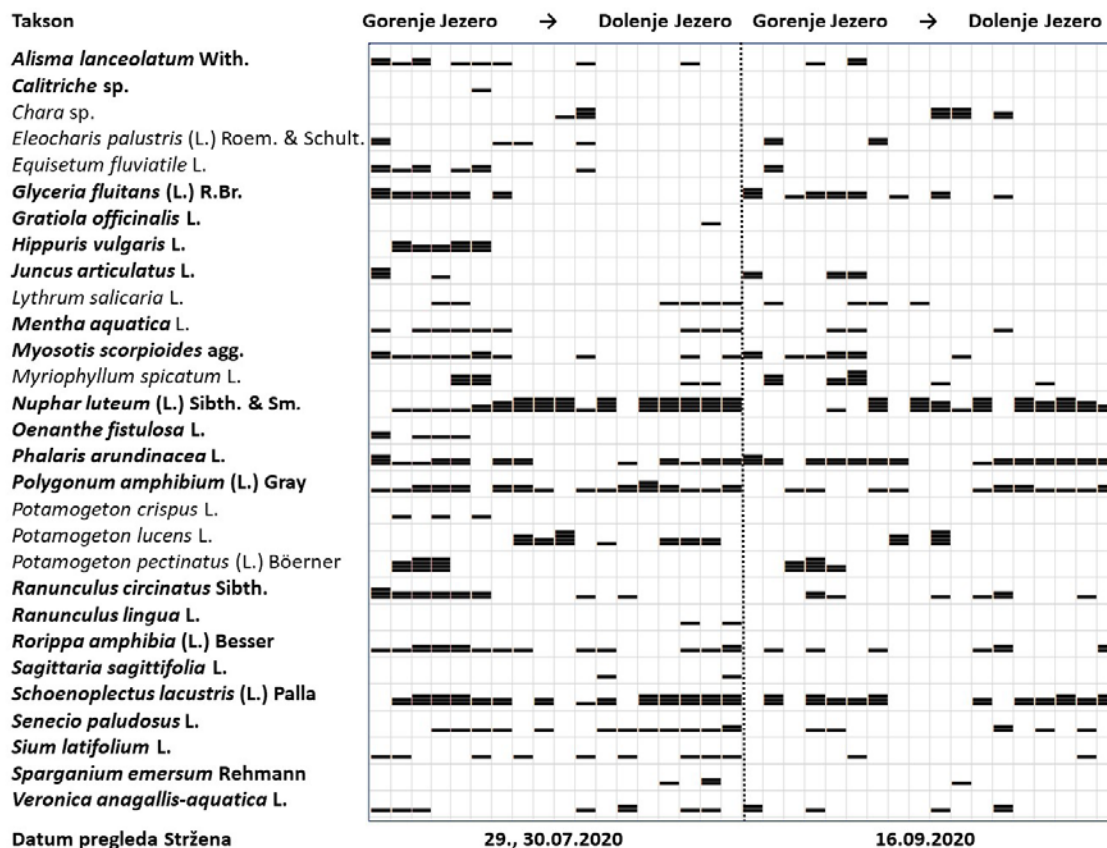
Slika 1: Ko voda odteče, se na pobočjih ponikev začnejo pojavljati različne rastlinske vrste z amfibijskim značajem, ki postopoma popolnoma prerastejo razgaljeno površino (foto: Alenka Gaberščik).

Večina amfibijskih rastlin je trajnic. Številne se razmnožujejo tudi vegetativno (Braendle in Crawford, 1999; Cronk in Fennessy, 2001). Globina vode v strugi Stržena se močno spreminja, kar predstavlja tekmovalno prednost za amfibijske rastline v primerjavi s pravimi vodnimi rastlinami. Raziskave na treh lokacijah (v depresiji pri Zadnjem kraju in v strugi Stržena pri Dolenjem in Gorenjem Jezeru) v obdobju 2001–2006 so pokazale prisotnost velikega deleža rastlin z amfibijskih značajem (58–76 %). Tudi raziskave celotne struge Stržena od Gorenjega do Dolenjega Jezera sredi (konec julija) in na koncu poletja 2020 so pokazale številčno in masno prevlado amfibijskih vrst, kar je verjetno posledica precejšnjih sprememb vodostaja (slika 2).



Slika 2: Spremembe vodostaja, izmerjenega na vodomernih postajah Dolenje in Gorenje Jezero v vegetacijski sezoni 2020 (vir: ARSO).

Vodostaj je bil na začetku sezone nizek in je v prvi polovici junija močno narasel, nato pa je do konca julija, ko je bilo prvo vzorčenje, upadal. Do naslednjega vzorčenja 16. septembra je 2-krat narasel in upadel. Rezultat je precej različna vegetacijska slika obeh vzorčenj (slika 3). V obeh primerih je bila relativna zastopanost amfibijskih rastlin velika, okrog 80 %.



Slika 3: Razporeditev makrofytov v strugi Stržena od Gorenjega do Dolenjega Jezera sredi (konec julija) in na koncu poletja 2020. Vrste z amfibijskim značajem so napisane odebeljeno. Višina stolpca predstavlja pogostost taksona od 1 do 5. Najnižji stolpec pomeni, da se takson pojavlja s pogostostjo 1 (posamezni primerki) in najvišji, da se pojavlja s pogostostjo 5 (prevladujoča vrsta).

Heterofilija in rastne oblike amfibijskih rastlin

Heterofilija je izraz, ki pomeni prisotnost različnih tipov listov na isti rastlini, ki so posledica okoljskih razmer, v katerih se list razvija. Pri nekaterih visokoraslih vrstah, kot so širokolistna koščica (*Sium latifolium*), vodna dresen (*Polygonum amphibium*), prava potočarka (*Rorippa amphibia*), velika zlatica (*Ranunculus lingua*), trpotčasti porečnik (*Alisma plantago-aquatica* L.) in navadna strelišča (*Sagittaria sagittifolia*), se heterofilija lahko izrazi kot niz morfološko, anatomsko in biokemijsko različnih listov, pri drugih, večinoma nizkoraslih, kot so vodna meta (*Mentha aquatica*), močvirska spominčica (*Myosotis scorpioides* L. agg.), navadna božja milost (*Gratiola officinalis*) in česnov vrednik (*Teucrium scordium* L.), pa ostaja izgled podoben, spremenjene pa so lahko njihove anatomske, biokemijske in fiziološke lastnosti (Kržič in sod., 2004). Obstaja pa še tretja skupina rastlin, kot so razkrečanolistna vodna zlatica (*Ranunculus circinatus*) (slika 4), navadna smrečica (*Hippuris vulgaris*) in rumeni blatnik (*Nuphar luteum*) (slika 5), kjer se v spremenjenih

razmerah lahko razvije celo drugačna rastna oblika (forma), npr. f. *terrestris* (kopenska) in f. *aquatica* (vodna) (Hutchinson, 1975).

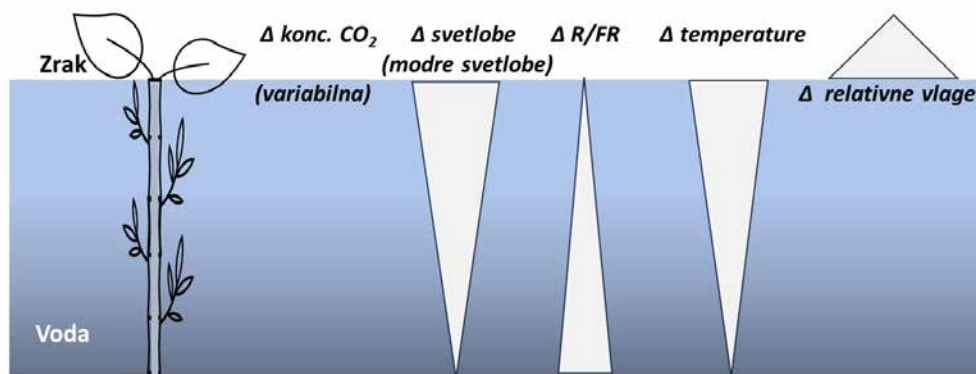


Slika 4: V sušnih razmerah razkrečenoлистna vodna zlatica (*Ranunculus circinatus*) razvije kopensko obliko, ki lahko uspeva na popolnoma izsušenih tleh. Na desni strani slike so tudi polegli kopenski poganjki vretenčastega rmanca (*Myriophyllum verticillatum* L.) (foto: Alenka Gaberščik).



Slika 5: Kopenska (levo) in vodna oblika s plavajočimi listi (desno) rumenega blatnika (*Nuphar luteum*). Rumeni blatnik razvije liste tudi v vodi. Potopljeni listi so večji in tanjši od plavajočih (foto: Alenka Gaberščik).

Pri amfibijskih rastlinah na pojavljanje heterofilije vplivajo okoljski dejavniki, ki se spreminjajo ob spremembah vodostaja. To so jakost in kakovost svetlobe, temperatura, koncentracija ogljikovega dioksida, dostopnost vode in posledično osmotski potencial ter mehanske sile (Li in sod., 2019). Zaznavanje sprememb kakovosti svetlobe je eden od ključnih dejavnikov, ki rastlini omogoča zaznavanje sprememb vodne gladine. Pomembno je predvsem razmerje med rdečo in daljno rdečo svetlobo (R/FR), ki ga rastline zaznavajo s fitohromom. Majhno razmerje R/FR kaže na bližino vodne površine ali zraka in sproži nastanek zračnih listov. Pomembna je tudi modra svetloba, ki lahko povzroči nastanek zračnih listov že pod vodno gladino, kar pa se ne zgodi v razmerah velikih vrednosti R/FR (Momokawa in sod., 2011). Nekatere raziskave so pokazale tudi vpliv fotoperiode (dolžina svetlega in temnega dela dneva) in temperature na razvoj različne oblike listov. Visoke temperature so na primer povzročile nastanek zračnih listov pri potopljenih poganjkih različnih vrst makrofitov. Pri več heterofilnih vodnih vrstah so ugotovili močan učinek spremembe osmotskega tlaka (zaradi spremembe vodostaja) na morfologijo listov (Li in sod., 2019) (slika 6).



Slika 6: Spremembe (Δ) okoljskih dejavnikov ob spremembi medija (voda-zrak), ki pri amfibijskih rastlinah iz- zovejo razvoj drugačnega tipa lista; R/FR – razmerje med rdečo in daljno rdečo svetlobo.

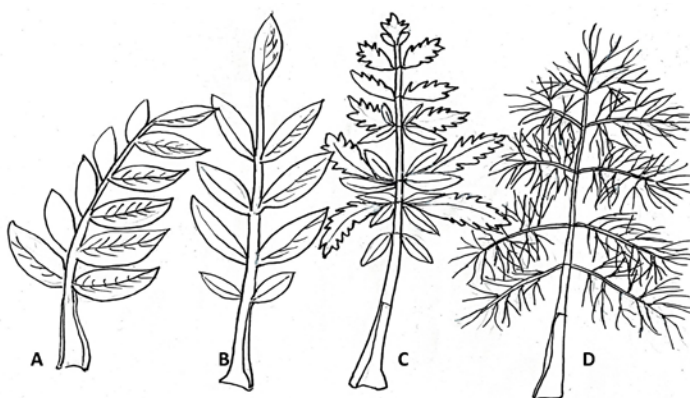
Pri koordinaciji odziva amfibijskih rastlin ob razvoju novega tipa listov igrajo pomembno vlogo hormoni, predvsem abscizinska kislina (ABA) (Wanke, 2011; Nakayama in sod., 2017), ki je poveza- na z razpoložljivostjo vode in osmotskim pritiskom. Zmanjšanje koncentracije etilena in ABA bot- ruje nastanku zračnega tipa lista pri potopljenih rastlinah navadnega žabjega lasa (*Callitriche pa- lustris*), nasprotno pa porast hormona giberelina sproži nastanek vodnega tipa listov pri rastlinah, gojenih na zraku (Kawa, 2021). Pri navadni smrečici (*Hippuris vulgaris*) ob upadanju vodne gladine dvig abscizinske kisline povzroči razvoj morfološko drugačnega lista (zračno oziroma kopensko obliko) (Goliber in Feldman, 1989). Pri rižu (*Oryza sativa*) v globoki vodi kopičenje etilena v tkivih med potopitvijo povzroči tudi podaljševanje poganjkov. Podaljševanje poganjkov (pri rižu lahko tudi do 25 cm na dan) in pecljev pod vplivom etilena in avksina stimulira zakisanje celične stene. V času hipoksije se pojavijo tudi ekspanzini, proteini celične stene, ki se sintetizirajo v interkalarnem meristemu in povzročijo podaljševanje poganjkov (Schulze in sod., 2002). Ob visokih vodostajih na Cerkniškem jezeru smo podaljševanje poganjkov opazili pri različnih vrstah, najbolj poudarjeno pa je bilo pri pravi potočarki (*Rorippa amphibia*) in veliki zlatici (*Ranunculus lingua*) (slika 7).

Številne amfibijske rastlinske vrste v vodi razvijejo liste, ki so daljši in ožji kot kopenski. Včasih so listi na koncu tudi koničasti ali suličasti, kot na primer pri navadni streluši (*Sagittaria sagittifo- lia*). Poleg tega imajo vodni listi večjo specifično listno površino, so tanjši, nimajo listnih rež ter imajo slabo razvito povrhnjico in tanko kutikulo (Nakayama in sod., 2017). Razvoj listnih rež pri amfibijskih rastlinah je povezan z močno svetlobo in majhno dostopnostjo ogljikovega dioksida (Casson in Hetherington, 2010).

Zelo poudarjeno heterofilijo najdemo pri širokolistni koščici (*Sium latifolium*), kobulnici s sestavljenimi listi, ki imajo v vodi drobno razcepljene lističe. Ob upadanju vodostaja se postopno razvijajo listi z močno nazobčanimi lističi. Lističi, ki se razvijejo ob nadaljnjem upadanju vode, so le še nekoliko podaljšani, na kopnem razviti listi pa imajo robove lističev le še rahlo nazobčane (slika 8).



Slika 7: Ko jezero presahne, velika zlatica (*Ranunculus lingua*) iz močno podaljšanih polegih stebel požene kopenske poganjke in zacveti (foto: Alenka Gaberščik).



Slika 8: Veliko fenotipsko plastičnost, ki se izrazi kot heterofilija, ima širokolistna koščica (*Sium latifolium*). Shematski prikaz primerov različnih oblik sestavljenega lista od kopenskega (A) do pravega vodnega (D) (risba: Alenka Gaberščik).

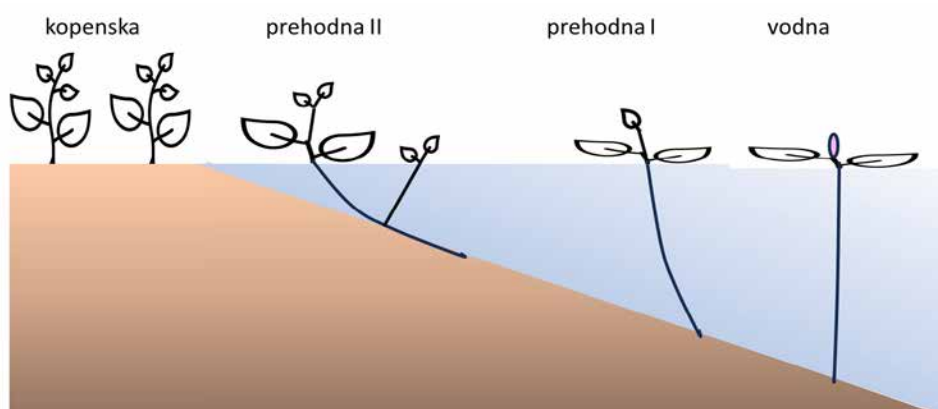
Poleg sprememb na ravni morfoloških lastnosti listov se navadno spremenijo tudi njihove biokemijske in funkcionalne lastnosti (Kržič in sod., 2004; Šraj Kržič in Gaberščik, 2005; Klančnik in sod., 2014).

Primer izjemne fenotipske plastičnosti je tudi vodna dresen (*Polygonum amphibium*) (slika 9). Pojavlja se na celotnem gradientu kopno-voda (slika 10). Oblika, ki se pojavi v danem okolju, je odvisna od okoljskih razmer. Na Cerknškem jezeru se običajno najprej pojavi vodna oblika s plavajočimi listi z listnimi režami na zgornji strani lista (hiperstomatični tip lista). Ko voda upada, se začnejo novo razvijajoči se listi dvigovati nad vodo, v plitvejši vodi pa iz nodijev poženejo stranski poganjki z zračnimi listi. Listi pri teh oblikah so amfistomatični, saj imajo listne reže na obeh straneh lista. Ko jezero presahne, poženejo prave kopenske oblike listov z listnimi režami na spodnji strani (hipostomatični tip lista). Habitus rastlin je popolnoma drugačen (sliki 9 in 10).



Slika 9: Primerki vodne dresni (*Polygonum amphibium*) na gradientu kopno-voda, a – kopenska oblika, b – prehodna oblika, c – vodna oblika s plavajočimi listi (foto: Primož Gnezda).

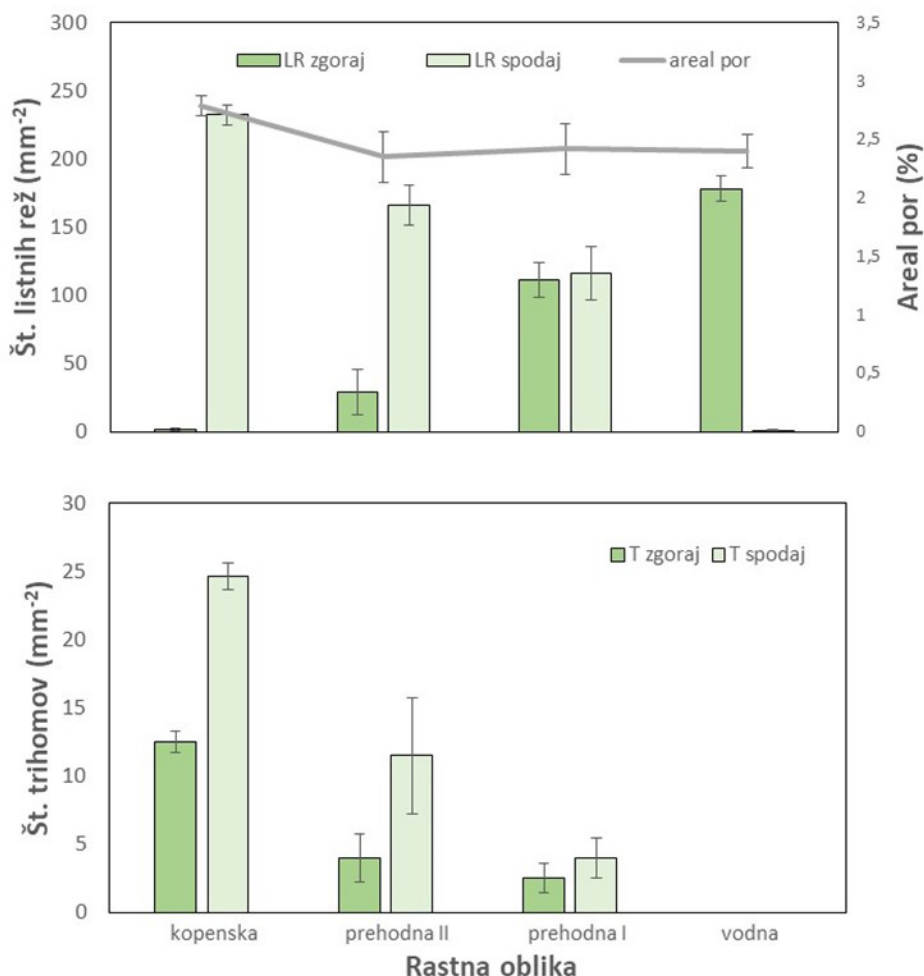
Anatomske raziskave listov so pokazale porast gostote listnih rež na zgornji in upadanje na spodnji površini lista ter upadanje stopnje odlačenosti listov (slika 11). Zanimivo je, da skupna površina odprtih listnih rež (areal por) ostaja podobna pri vseh primerkih. To se odraža tudi v vrednostih skupne difuzijske upornosti obeh strani listov, ki so prav tako podobne, kar pomeni, da so listi rastlin na različnih delih gradienta funkcionalno optimizirani glede na okoljske razmere (Gaberščik in Martinčič, 1992).



Slika 10: Shematski prikaz rastišča in oblik vodne dresni (*Polygonum amphibium*) na gradientu kopno-voda.

Germ in Gaberščik (2003) na podlagi raziskav ugotavljata, da imata amfibijski rastlinski vrsti močvirska spominčica (*Myosotis scorpioides* agg.) in lasastolistna vodna zlatica (*Ranunculus tri-chophyllus* Chaix) različni strategiji, ki jima omogočata uspevanje v okolju, kjer se vodna gladina pogosto spreminja. Močvirska spominčica ima bolj kopenski kot vodni značaj, na kar kažejo

visoka vsebnost snovi, ki absorbirajo UV-B sevanje, prisotnost rež ter mezofil, ki ima razvito stebričasto in gobasto tkivo tudi pri vodnih listih. Kopno okolje je za močvirsko spominčico bolj ugodno kot vodno, na kar kaže večja aktivnost dihalnega potenciala pri vodnih v primerjavi s kopenskimi rastlinami.



Slika 11: Število listnih rež (zgornji graf) in trihomov (spodnji graf) na zgornji in spodnji strani lista ter skupni areal por (zgornji graf) pri primerkih vodne dresni (*Polygonum amphibium*), rastočih na gradientu kopno-voda. Temno zeleno – zgornja stran, svetlo zeleno – spodnja stran, siva črta – areal por, LR – listne reže.

Eden od odzivov na stresne razmere je namreč povečana potreba po energiji. Večji dihalni potencial zagotavlja več energije, kar omogoča vzpostavitev zaščitnih in popravljivih mehanizmov in rastlina je na ta način manj občutljiva na neugodne, stresne razmere. Po drugi strani pa ima vodna oblika lasastolistne vodne zlatice lastnosti, ki so značilne za prave vodne rastline, kot so odsotnost rež, sposobnost rabe bikarbonatnega iona za proces fotosinteze ter majhna vsebnost snovi, ki absorbirajo UV-B sevanje. Slednje je lahko tudi posledica dejstva, da je lasastolistna vodna zlatica filogenetsko starejša v primerjavi z močvirsko spominčico. Meritve aktivnosti dihalnega potenciala, ki je bil v zračnih listih lasastolistne vodne zlatice večji kot v vodnih, nakazujejo, da je vodni medij za to vrsto ugodnejši kot kopenski.

Vpliv spremembe vodostaja na dejavnost amfibijskih rastlin

Kot smo že zapisali, sprememba vodostaja povzroči spremembo številnih okoljskih dejavnikov za rastline, predvsem spremembo dostopnosti plinov, sevanja in vode. Prisotnost stresa zaradi spremembe medija so pri različnih vrstah (plavajoča sladika – *Glyceria fluitans*, navaдна božja milost – *Gratiola officinalis*, velika zlatica – *Ranunculus lingua*, širokolistna koščica – *Sium latifolium*, enostavni ježek – *Sparganium emersum*, česnov vrednik – *Teucrium scordium*, vodni jetičnik – *Veronica anagallis-aquatica*) ovrednotili s pomočjo merjenja fotokemične učinkovitosti fotosistema II (FS II) oz. učinkovitosti rabe svetlobe. Presihanje ni povzročilo nepopravljivih poškodb, saj je potencialna fotokemična učinkovitost FS II večine vrst in oblik ostala blizu optimalne vrednosti 0,83. Po drugi strani pa se je dejanska fotokemična učinkovitost spreminjala, kar kaže na različne stopnje prehodnega stresa. Nenadna potopitev kopenskih oblik je povzročila le rahel upad delovanja FS II (Šraj-Kržič in sod., 2007). Raziskave so razkrile učinkovito aklimatizacijo amfibijskih rastlin, ki omogoča nemoteno preskrbo z energijo v spremenljivih okoljskih razmerah (Kržič in sod., 2004). Vsebnosti klorofilov so bile med vrstami zelo različne, vendar značilnih razlik med potopljenimi in zračnimi listi ni bilo. Vrednost razmerja med klorofiloma *a* in *b* je bila med 2 in 3 (Šraj-Kržič in sod., 2007). Takšno razmerje je praviloma značilno za liste senčnih habitatov (Larcher, 2003). V vodi so razmere nekoliko drugačne, saj se razmerje R/FR z globino nekoliko večja (Momokawa in sod., 2011), kar ni v skladu z gradientom R/FR v senčnih habitatih (Larcher, 2003). V vodnem okolju se z globino manjša količina modre svetlobe. Vsebnost karotenoidov in antocianinov v listih je bila pri zgoraj naštetih vrstah značilno večja pri potopljenih primerkih. Antocianini, ki imajo za rastline številne pozitivne učinke (Chalker-Scott, 1999), predvidoma nastajajo kot odziv na manj ugodne razmere. Po drugi strani pa je bila vsebnost skupnih UV absorbirajočih snovi, ki se kopičijo v povrhnjici listov in ščitijo listno sredico pred UV sevanjem, večja pri kopenskih primerkih večine vrst, kar je povezano z močnejšim UV sevanjem na kopnem (Šraj-Kržič in sod., 2009).

Pojav heterofilije je razviden tudi iz spremenjenih optičnih lastnosti listov (Klančnik in sod., 2012; 2014). Meritve spektrov odbojnosti plavajočih listov dveh heterofilnih vrst vodne dresni in rumenega blatnika so pokazale, da so si spektri plavajočih listov obeh vrst bolj podobni kot spektri različnih oblik listov, ki se razvijejo pri posamezni vrsti (Klančnik in sod., 2012).

Vplivi okoljskih razmer se odražajo tudi na interakciji amfibijskih rastlin z mikoriznimi glivami, ki so bile pri pregledu korenin rastlin s Cerkniškega jezera večinoma številčnejše pri kopenskih primerkih (Šraj-Kržič in sod., 2009).

Zaključek

Spremembe vodostaja povzročijo spremembo številnih okoljskih dejavnikov, predvsem spremembo dostopnosti plinov, sevanja in dostopnosti vode. V takih razmerah so zelo uspešne vrste, ki imajo amfibijski značaj oz. tako imenovane amfibijske rastline. Te rastline lahko razvijejo različne rastne oblike (forme) ali/in različne tipe listov (heterofilijo), ki jim omogočajo, da so dejavne tako v vodi kot tudi na kopnem. Na Cerkniškem jezeru amfibijske rastline prevladujejo v habitatih, ki so ob visokih vodostajih pregloboki za uspevanje navadnega trsta (npr. na pobočjih ponikev), na obrobni delih sestojev trsta ter v pritokih jezera in v Strženu – vodotoku, ki me-

andrira po Cerkniškem polju. Njihova vegetacijska sezona je odvisna od dinamike vodostajev. Višek navadno dosežejo, ko voda začne odtekati, saj njihova fenotipska plastičnost predstavlja tekmovalno prednost pred drugimi vrstami. Vrste z amfibijskim značajem, ki se na Cerkniškem jezeru najpogosteje pojavljajo, so rumeni blatnik, širokolistna koščica, navadni sovec, vodna dresen, prava potočarka, velika zlatica, trpotčasti porečnik, vodna meta, močvirska spominčica, navadna božja milost in česnov vrednik.

Summary

Amphibious plants – the most successful plant group of Lake Cerknica

Changes in water levels create mosaics and zonation of habitats that allow the colonisation of different plant species and growth forms. Extreme water level fluctuations pose a major problem and result in rapid changes in environmental conditions that may affect plants. Amphibious plants are the most successful plant group in such conditions. They can develop different growth forms or different types of leaves (heterophylly), enabling their activity both in water and on land. In Lake Cerknica, amphibious plants are usually found on slopes of sinks, in the peripheral parts of reed stands, in the tributaries of the lake and in the riverbed of the main stream Stržen. Surveys at three sites (in the depression at Zadnji kraj and in the locations in the Stržen riverbed) in 2001–2006 showed a predominance of amphibious plants (58-76%) in relation to all aquatic plants, while their proportion found in the 2020 Stržen riverbed survey was around 80%.

Heterophylly is the development of different leaf types on the same plant. In some tall-growing species, such as *Sium latifolium*, *Polygonum amphibium*, *Rorippa amphibia*, *Ranunculus lingua*, *Alisma plantago-aquatica*, and *Sagittaria sagittifolia*, heterophylly may be expressed as series of morphologically, anatomically, and biochemically distinct leaves, while in others, mostly low-growing species, such as *Mentha aquatica*, *Myosotis scorpioides* agg., *Gratiola officinalis*, and *Teucrium scordium*, leaves remain similar in appearance, but their anatomical and biochemical characteristics may be altered. A third group of plants, such as *Ranunculus trichophyllus*, *Hippuris vulgaris*, and *Nuphar luteum*, develops a different growth form under the altered conditions, such as f. *terrestris* and f. *aquatica*, respectively. The occurrence of heterophylly is induced by several environmental factors that change with changing water level. These include light intensity and quality, temperature, carbon dioxide and oxygen concentration, water availability, and, consequently, osmotic potential. Absciscic acid and ethylene play an important role in coordinating the response of amphibious plants when developing a new leaf type. A common response to rising water levels is shoot elongation, which is also frequently observed in plants at Lake Cerknica. Examples of species with outstanding phenotypic plasticity are *Polygonum amphibium* and *Sium latifolium*, which develop a set of completely different leaves. However, different species may exhibit more terrestrial or more aquatic character, such as *Myosotis scorpioides* agg. and *Ranunculus trichophyllus*. The ecophysiological responses of the two species differ in different environments, showing that for *Myosotis scorpioides* agg., terrestrial conditions are more optimal, whereas in the case of *Ranunculus trichophyllus*, aquatic conditions are more favourable.

The presence of stress due to the change of medium was found in different species (*Glyceria fluitans*, *Gratiola officinalis*, *Ranunculus lingua*, *Sium latifolium*, *Sparganium emersum*, *Teucrium*

scordium, *Veronica anagallis-aquatica*), based on measurements of photochemical efficiency of photosystem II (PS II). These measurements showed that intermittence did not cause irreversible damage since potential photochemical efficiency of PS II of most species and forms was close to the optimum value of 0.83. However, actual photochemical efficiency varied, indicating different levels of transient stress. The sudden submergence of terrestrial forms resulted in the presence of only slight stress.

The occurrence of heterophylly is also reflected in the varied optical properties of the leaves. Measurements of the reflectance spectra of floating leaves of two heterophyllous species, *Polygonum amphibium* and *Nuphar luteum*, showed that when comparing these spectra, they were more alike than those of different leaf types within each species. Changes in water levels also affected the interactions of amphibious plants with mycorrhizal fungi, which tended to be more abundant in terrestrial specimens.

Amphibious plants are a very challenging group because, on the one hand, they represent a model for the study of adaptation to aquatic and terrestrial environments in plants with identical genome, and on the other hand, the understanding of amphibious plants' ecology is very important in the light of global change and large-scale changes in water levels in different water bodies, as they show high potential to colonise these extremely disturbed habitats.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 in preko financiranja mladega raziskovalca 24506.

Viri

- Boeger, M. R. T., Poulson, M.E. 2003. Morphological adaptations and photosynthetic rates of amphibious *Veronica anagallis-aquatica* L. (Schropulariaceae) under different flow regimes. *Aquatic Botany*, 75, 123–135.
- Braendle, R., Crawford, R. M. M. 1999. Plants as amphibians. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2(1), 56–78. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00065>
- Casson, S. A., Hetherington, A. M. 2010. Environmental regulation of stomatal development. *Current Opinion in Plant Biology*, 13(1), 90–95. <https://doi.org/10.1016/j.pbi.2009.08.005>
- Chalker-Scott, L. 1999. Environmental significance of anthocyanins in plant stress responses. *Photochemistry and Photobiology*, 70(1), 1–9. <https://doi.org/10.1111/j.1751-1097.1999.tb01944.x>
- Chambers, P. A., Lacoul, P., Murphy, K. J., Thomaz, S. M. 2008. Global diversity of aquatic macrophytes in freshwater. *Hydrobiologia*, 595(1), 9–26. <https://doi.org/10.1007/s10750-007-9154-6>
- Cronk, J. K., Fennessy, M. S. 2001. *Wetland plants* (1st edition). Boca Raton. CRC Press. 482 str. <https://doi.org/10.1201/9781420032925>
- Fox, A. M. 1992. *Macrophytes*. V P. Calow, G. E. Petts (ur.), *The rivers handbook*. Hydrological and ecological principles: Vol. one (str. 216–233). Oxford. Blackwell Science.
- Gaberščik, A., Martinčič, A. 1992. Spreminjanje lastnosti listov vodne dresni (*Polygonum amphibium* L.) v gradientu kopno/voda. *Biološki Vestnik: Glasilo Slovenskih Biologov*, 40(1), 1–11.

- Germ, M., Gaberščik, A. 2003. Comparison of aerial and submerged leaves in two amphibious species, *Myosotis scorpioides* and *Ranunculus trichophyllus*. *Photosynthetica*, 41(1), 91–96. <https://doi.org/10.1023/A:1025816614572>
- Goliber, T. E., Feldman, L. J. 1989. Osmotic stress, endogenous abscisic acid and the control of leaf morphology in *Hippuris vulgaris* L. *Plant, Cell and Environment*, 12(2), 163–171. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1989.tb01929.x>
- Horiguchi, G., Nemoto, K., Yokoyama, T., Hirotsu, N. 2019. Photosynthetic acclimation of terrestrial and submerged leaves in the amphibious plant *Hygrophila difformis*. *AoB PLANTS*, 11(2). <https://doi.org/10.1093/aobpla/plz009>
- Hutchinson, G. E. 1975. *A Treatise on Limnology: Vol. 3*. New York. John Wiley & Sons. 660 str.
- Kawa, D. 2021. The shapeshifting legend of amphibious plants explained. *The Plant Cell*, 33(10), 3181–3182. <https://doi.org/10.1093/plcell/koab196>
- Klančnik, K., Mlinar, M., Gaberščik, A. 2012. Heterophylly results in a variety of “spectral signatures” in aquatic plant species. *Aquatic Botany*, 98(1), 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.12.004>
- Klančnik, K., Pančič, M., Gaberščik, A. 2014. Leaf optical properties in amphibious plant species are affected by multiple leaf traits. *Hydrobiologia*, 737(1), 121–130. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1646-y>
- Kržič, N., Gaberščik, A., Germ, M. 2004. The phenotypic plasticity of *Glyceria fluitans* growing over the water/land gradient. *Acta Biologica Slovenica*, 47(2), 65–73.
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th edition). Berlin. Springer. 514 str.
- Li, G., Hu, S., Hou, H., Kimura, S. 2019. Heterophylly: Phenotypic plasticity of leaf shape in aquatic and amphibious plants. *Plants*, 8(10), 420. <https://doi.org/10.3390/plants8100420>
- Maberly, S. C., Madsen, T. V. 2002. Freshwater angiosperm carbon concentrating mechanisms: processes and patterns. *Functional Plant Biology*, 29(3), 393. <https://doi.org/10.1071/PP01187>
- Momokawa, N., Kadono, Y., Kudoh, H. 2011. Effects of light quality on leaf morphogenesis of a heterophyllous amphibious plant, *Rotala hippuris*. *Annals of Botany*, 108(7), 1299–1306. <https://doi.org/10.1093/aob/mcr236>
- Nakayama, H., Sinha, N. R., Kimura, S. 2017. How do plants and phytohormones accomplish heterophylly, leaf phenotypic plasticity, in response to environmental cues. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01717>
- Rascio, N. 2002. The underwater life of secondarily aquatic plants: Some problems and solutions. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21(4), 401–427. <https://doi.org/10.1080/0735-260291044296>
- Rascio, N., Cuccato, F., Dalla Vecchia, F., La Rocca, N., Larcher, W. 1999. Structural and functional features of the leaves of *Ranunculus trichophyllus* Chaix., a freshwater submerged macrophyte. *Plant, Cell and Environment*, 22(2), 205–212. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.1999.00394.x>
- Riederer, M., Müller, C. 2006. *Biology of the plant cuticle*. Ames, Blackwell Publishing: 216-249.
- Schulze, E. D., Beck, E., Müller-Hohenstein, K. 2002. *Pflanzenökologie*. Heidelberg. Springer.
- Šraj Kržič, N., Gaberščik, A. 2005. Photochemical efficiency of amphibious plants in an intermittent lake. *Aquatic Botany*, 83(4), 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.05.012>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9230-4>

- Šraj-Kržič, N., Pongrac, P., Regvar, M., Gaberščik, A. 2009. Photon-harvesting efficiency and arbuscular mycorrhiza in amphibious plants. *Photosynthetica*, 47(1), 61–67. <https://doi.org/10.1007/s11099-009-0011-x>
- van Veen, H., Sasidharan, R. 2021. Shape shifting by amphibious plants in dynamic hydrological niches. *New Phytologist*, 229(1), 79–84. <https://doi.org/10.1111/nph.16347>
- Voesenek, L. A. C. J., Colmer, T. D., Pierik, R., Millenaar, F. F., Peeters, A. J. M. 2006. How plants cope with complete submergence. *New Phytologist*, 170(2), 213–226. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01692.x>
- Wanke, D. 2011. The ABA-mediated switch between submersed and emersed life-styles in aquatic macrophytes. *Journal of Plant Research*, 124(4), 467–475. <https://doi.org/10.1007/s10265-011-0434-x>
- Yin, L., Li, W., Madsen, T.V., Maberly, S.C., Bowes, G. 2017. Photosynthetic inorganic carbon acquisition in 30 freshwater macrophytes. *Aquatic Botany* 140, 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2016.05.002>

Navadni trst – prevladujoča rastlinska vrsta Cerkniškega jezera

Alenka Gaberščik in Nik Ojdanič

Uvod

Navadni trst (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) je kozmopolitska vrsta trave, ki je široko razširjena po svetu in je prevladujoča v različnih mokriščih. Avtohtone populacije navadnega trsta so razširjene v zmernem pasu na vseh celinah, razen na Antarktiki (Packer in sod., 2017). Naseljuje območja ekotonov na prehodu med kopenskimi in vodnimi okolji tako v celinskih kot tudi obmorskih predelih (Mauchamp in Méthy, 2004), kjer tvori obsežne enovrstne sestoje. Uspešno raste v precej globoki vodi, lahko pa kljubuje tudi spremembam vodostaja in daljšim sušnim obdobjem (Hudon in sod., 2005). V razmerah zmernega podnebja naseljuje habitate z globino vode do 2 m in ravnijo talne vode do 1 m, v toplejših območjih pa lahko uspeva tudi v večjih globinah. Navadni trst slabo prenaša močna gibanja vode (velike in hitre spremembe vodostaja, valove ali tokove), saj lahko pride do poškodb stebel (Haslam, 1972; Ojdanič in sod., 2023). Globoka voda lahko omejuje dovajanje kisika v podzemne dele rastline (White in Ganf, 2002). V takih razmerah ima trst višja stebela in manj listov, kar omogoča vzdrževanje pozitivne ogljikove bilance (Dinka in Szeglet, 1999). Navadni trst ima učinkovit prezračevalni sistem, ki omogoča prehajanje plinov po zračnem tkivu (aerenhimu), ki je prisotno po celotni rastlini. Kisik iz ozračja in kisik, ki nastaja v procesu fotosinteze, prehaja v korenine, ogljikov dioksid in metan iz korenin in rizosfere (območja, ki obdaja rastlinske korenine, kjer poteka interakcija med koreninami in talnimi mikroorganizmi) pa se sproščata v ozračje (Armstrong in sod., 1992). Zaradi vpliva presnovnih procesov se koncentracija plinov v zračnih prostorih dnevno-nočno spreminja (Faußer in sod., 2016). Kadar so listi potopljeni, je vir kisika lahko tudi zračni film na listih. Za prezračevanje korenin lahko služijo tudi posušena zlomljena stebela (Armstrong in sod., 1992), kar je pomembno predvsem izven rastne sezone. Kisik iz korenin se sprošča tudi v bližnjo rizosfero in oksidira različne strupene snovi, ki nastanejo v anoksičnih tleh in lahko škodijo koreninam trsta in biocenozi tal (Bart in Hartman, 2000). Korenine trsta v rizosfero izločajo 3,4,5-trihidroksibenzojsko kislino, ki zavira rast korenin drugih vrst rastlin (Rudrappa in sod., 2009).

Širjenje populacij poteka predvsem s klonsko rastjo vodoravnega sistema korenin in površinskih stolonov, nove populacije pa se lahko vzpostavijo iz korenin, delov stebela in semen. Navadni trst vsako leto požene tudi do 5 m visoke poganjke. Na koncu stebela se razvije socvetje, ki ga oprahuje veter. Ena rastlina lahko tvori od 500 do 2000 semen (Packer in sod., 2017). Navadni trst je genetsko in fenotipsko zelo raznolik (Vretare in sod., 2001), kar omogoča učinkovitejšo prilagajanje spreminjajočim se okoljskim razmeram v primerjavi z vrstami z majhno plastičnostjo. Linije in genotipi navadnega trsta so raznoliki zaradi hibridizacije, poliploidije, variabilnosti velikosti genoma in širjenja na velike razdalje (Eller in sod., 2017).

Navadni trst ima široko ekološko valenco, veliko primarno proizvodnjo ter obsežen in dobro prezračen koreninski sistem, ki ustvarja ugodne razmere za pretvorbo, privzem in zadrževanje hranil, zato trstične grede ali tako imenovana grajena močvirja uporabljamo za terciarno čiščenje odpadnih voda (Vymazal in Kröpfelová, 2005). Sestoji trsta zagotavljajo habitate za ranljive

vrste ptic. Stebla trsta so uporabna za strešno kritino, biomasa pa lahko služi kot vir energije (Čížková in sod., 2023). Zaradi široke razširjenosti navadni trst lahko uporabimo tudi kot modelno vrsto pri proučevanju učinkov globalnih sprememb (Eller in sod., 2017).

Navadni trst prevladuje tudi na presihajočem Cerkniškem jezeru, kjer je izpostavljen nepredvidljivim okoljskim spremembam, ki so posledica izrazitih naravnih motenj, povezanih s spremembami vodostaja (slika 1). V takšnih razmerah je velika fenotipska plastičnost navadnega trsta skupaj z velikim regeneracijskim potencialom fragmentov stebela zelo pomembna.

Na območju Cerkniškega jezera smo proučevali ekofiziološke odzive navadnega trsta in nekatere funkcionalne lastnosti, ki mu omogočajo preživetje v tem izjemnem okolju. Zanimale so nas tako lastnosti listov, kot so morfološke in biokemijske lastnosti ter elementna sestava, kot tudi značilnosti habitusa in vitalnost koreninskega sistema. Skupaj z madžarskimi kolegi smo raziskovali fotokemično učinkovitost fotosistema (FS) II in skupno vsebnost prostih aminokislin v bazalnih internodijih, ki sta pokazatelja stanja stresa (Dinka in sod., 2008).



Slika 1: Navadni trst (*Phragmites australis*) je kozmopolitska vrsta, ki prevladuje tudi na območju presihajočega Cerkniškega jezera. Na sliki je navadni trst ob strugi Stržena (foto: Mateja Grašič).

Fiziološki odziv na okoljske razmere

Dejavnost navadnega trsta se glede na okoljske dejavnike spreminja (Čížková in sod., 2023). Za rastline je ključnega pomena asimilacija ogljika, ki poteka v procesu fotosinteze in gospodarjenje z vodo. Vodni režim rastline in vključenost rastline v vodni krog ugotavljamo s spremljanjem transpiracije. Meritve transpiracije navadnega trsta na Cerkniškem jezeru so pokazale velike razlike glede na hidrološke razmere. Manjše vrednosti (okrog $7 \text{ mmol H}_2\text{O/m}^2/\text{s}$) so bile izmerjene v globlji vodi (0,6–1,6 m), medtem ko se je med zniževanjem vodostaja transpiracija močno povečala na $20 \text{ mmol H}_2\text{O/m}^2/\text{s}$ (Dolinar in sod., 2010). Dosežene vrednosti so glede na druge skupine rastlin zelo velike (Larcher, 2003). Veliko transpiracijo sestojev trsta, ki je presegala tudi 10 mm dan^{-1} , sta izmerila tudi Herbst in Kappen (1999). Raziskava je pokazala, da je letna evapotranspiracija znatno presegala letno izhlapevanje (evaporacijo) vode z odprte jezerske površine in večinoma tudi količino padavin na območju. Vse navedene meritve kažejo, da trstišča ugodno vplivajo na lokalno kroženje vode in imajo velik pomen za vodno bilanco jezer in mokrišč ter za lokalne klimatske razmere.

Tudi izmerjena fotosintezna dejavnost navadnega trsta je bila v primerjavi z drugimi vrstami velika, saj je znašala celo več kot $25 \text{ } \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ (Rudolf, 2008). Vrednosti so se spreminjale glede na razmere v okolju, predvsem glede na temperaturo in relativno vlago. Meritve potencialne fotokemične učinkovitosti FS II, ki je pokazatelj prisotnosti stresa v listih, so bile okrog 0,80, kar kaže na normalno delujoč fotosintezni aparat in odsotnost trajnega stresa. Manjše in bolj spremenljive vrednosti dejanske fotokemične učinkovitosti FS II so odražale prisotnost prehodnega stresa, ki je posledica vpliva dnevnih sprememb okoljskih razmer na pridobivanje energije. To potrjuje tudi skupna vsebnost prostih aminokislin v bazalnih internodijih stebel, ki je odražala začasno (ne trajno) stresno stanje pri rastlinah jezerskih sestojev (Dinka in sod., 2008), ki je bilo večinoma povzročeno s pomanjkanjem vode. Pri tem pa je potrebno poudariti, da je najbolj ključna posledica vpliva suše na rastlino zmanjšanje listne površine, ki je posledica sušenja in odpadanja listov (Larcher, 2003) in omogoči, da preostali listi ohranijo nemoteno funkcijo. Tudi v primeru navadnega trsta se skupni indeks listne površine (listna površina na m^2 tal; angl. *leaf area index* - LAI) med pomanjkanjem vode močno zmanjša, predvsem pri rastlinah jezerskega sestoja, kadar se rastišče popolnoma izsuši (Ojdanič in sod., 2023).

Morfološke in biokemijske značilnosti

Veliko dejavnost trsta v primerjavi z drugimi rastlinskimi vrstami omogočajo njegove morfološke značilnosti. Listi imajo ogromno število majhnih listnih rež (preglednica 1, slika 1), ki omogočajo natančen nadzor nad izmenjavo plinov, privzemom ogljikovega dioksida in oddajanjem vode. Število listnih rež je celo večje kot pri rastlinah sušnih rastišč (Larcher, 2003). Listi so razmeroma debeli, imajo majhno specifično listno površino in velik delež opornega tkiva. Obenem je površina listov močno okremenjena in prekrita s številnimi bodičkami (okremenjenimi trihomi), kar utrjuje list in preprečuje izgubo vode (slike 2, 3 in 4 ter preglednica 1). Posledica vseh teh prilagoditev je velika učinkovitost rabe vode (Rudolf, 2008). V mokriščih je trst izpostavljen veliki jakosti sončevega sevanja, vključno z UV-B sevanjem. Poleg okremenjene kutikule ga ščiti tudi velika vsebnost UV absorbirajočih snovi v povrhnjici listov. Gosti listni mezofil je bogat tudi s fotosinteznimi in zaščitnimi pigmenti, kot so antocianini (preglednica 1).

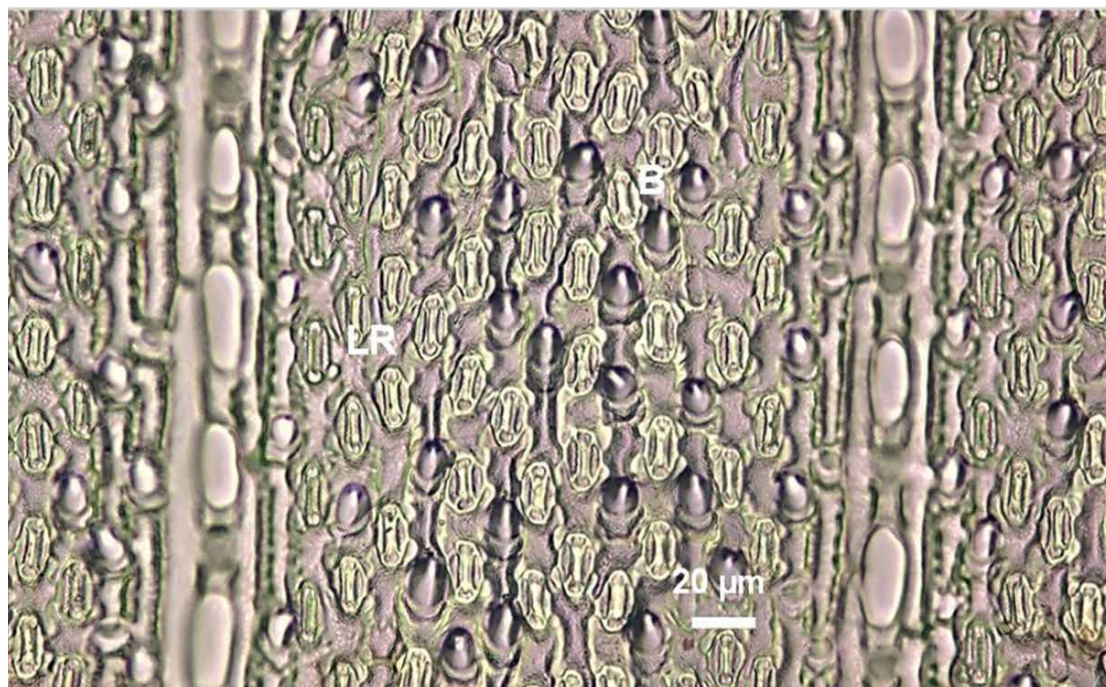
Preglednica 1: Morfološke in biokemijske lastnosti listov navadnega trsta.

Lastnost lista		Lastnost lista	Zgornja listna ploskev	Spodnja listna ploskev
Specifična listna površina (cm ² /g)	92,9 ± 4,8	Debelina kutikule (μm)	1,30 ± 0,04	1,35 ± 0,10
Debelina lista* (μm)	245 ± 7,5	Debelina povrhnjice (μm)	15,7 ± 0,53	15,5 ± 0,47
Debelina listne sredice (μm)	195 ± 7,2	Gostota bodičk (št./mm ²)	83 ± 15	284 ± 25
Klorofil a (g/m ²)	0,339 ± 0,007	Dolžina bodičk (μm)	16,0 ± 0,3	19,5 ± 0,6
Klorofil b (g/m ²)	0,150 ± 0,008	Gostota listnih rež (št./mm ²)	354 ± 14	509 ± 27
Karotenoidi (g/m ²)	0,083 ± 0,004	Dolžina listnih rež (μm)	20 ± 0,3	20 ± 0,2
Antocianini (REP**)	1,11 ± 0,79			
UV-B absorbirajoče snovi (REP**)	19,43 ± 0,85			
UV-A absorbirajoče snovi (REP**)	28,98 ± 1,39			

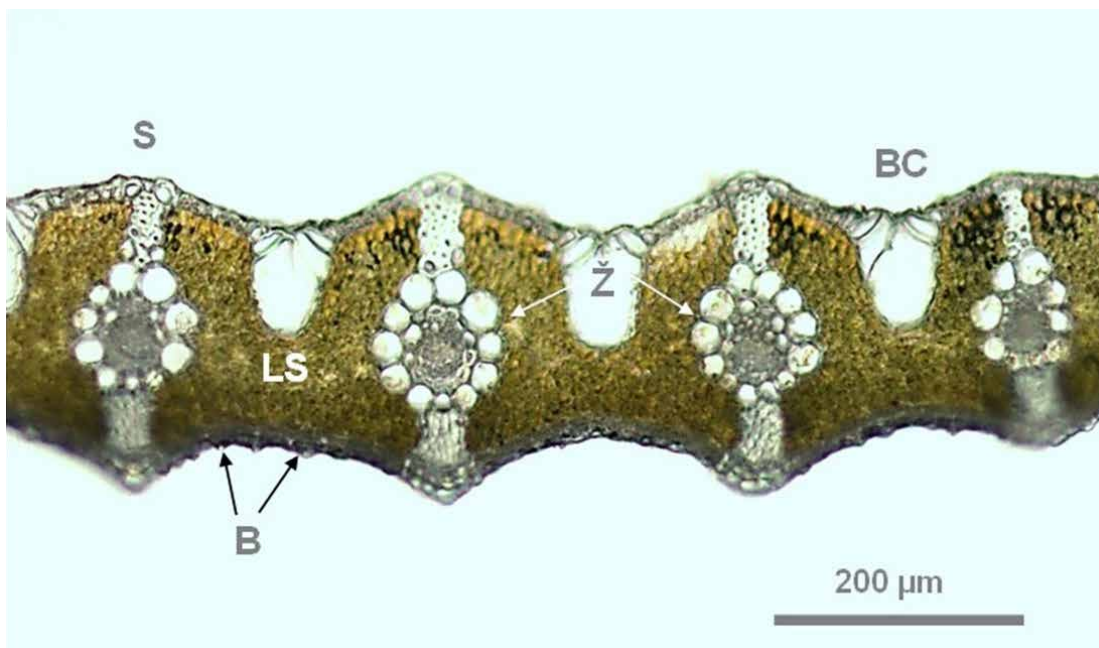
*merjeno na debelejšem delu lista

**REP – relativne enote na površino

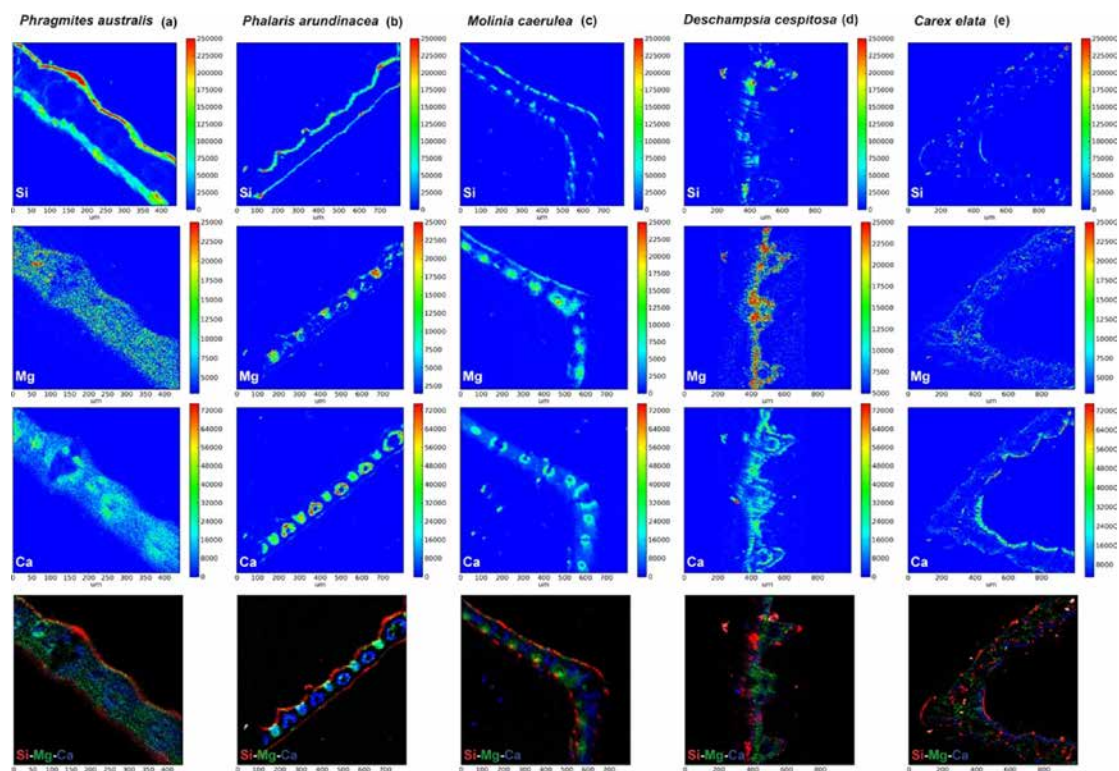
Slika 4 kaže primerjavo elementne sestave navadnega trsta z nekaterimi drugimi pogostimi vrstami trav in vrste šaša s Cerkniškega jezera. Slika razkriva močno okremenjeno (utrjeno s silicijem (Si)) povrhnjico pri navadnem trstu, nekoliko manj pa pri pisani čužki (*Phalaris arundinacea* L.) in modri stožki *Molinia caerulea* L.). Pri togem šašu (*Carex elata* All.) pa se v zgornji povrhnjici nahaja precej kalcija (Ca) (Klančnik in sod., 2014).



Slika 2: Odtis spodnje listne ploskve navadnega trsta. LR – listna reža, B – bodička (foto: Karmen Uranič).



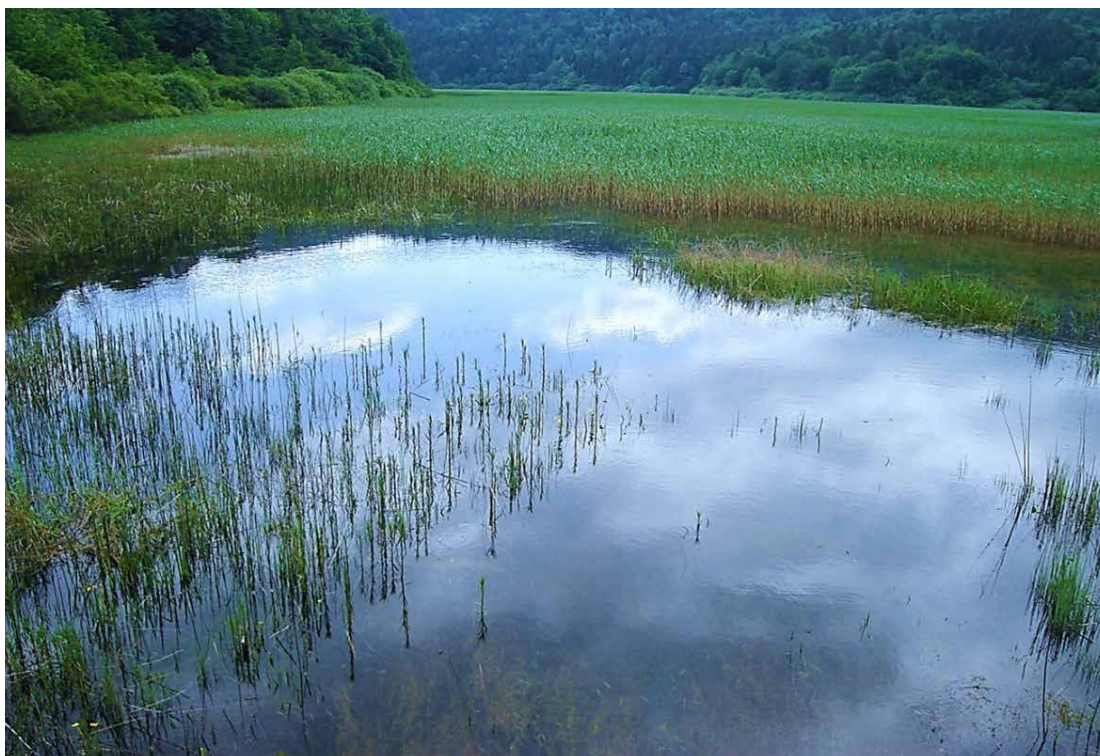
Slika 3: Prečni prerez lista navadnega trsta. BC – buliformne celice, B – bodička, S – sklerenhimatsko tkivo, Ž – žile, LS – listna sredica (foto: Karmen Uranič).



Slika 4: Porazdelitev in koncentracija Si, magnezija (Mg) in kalcija (Ca) na prečnem prerezu listov štirih trav in šaša. (a) navadni trst, (b) pisana čužka, (c) modra stožka, (d) rušnata masnica, (e) togi šaš, na podlagi spektroskopije LEXRF (desno: barvna lestvica; $\mu\text{g g}^{-1}$). Velikost slikovnih pik je $1,3 \times 1,3 \mu\text{m}$ (povzeto po Klančnik in sod., 2014).

Elementna sestava listov navadnega trsta se lahko razlikuje tudi glede na starost in lokacijo rasti (slika 5). Raziskave so pokazale, da so največje razlike v vsebnosti Si, ki je predstavljal od 2,8 % do 6,1 % suhe mase listov, manjše pa v deležu Ca (Grašič in sod., 2022). Glede na vsebnost Si sodi navadni trst med akumulatorje Si in lahko pomembno prispeva k njegovemu kroženju.

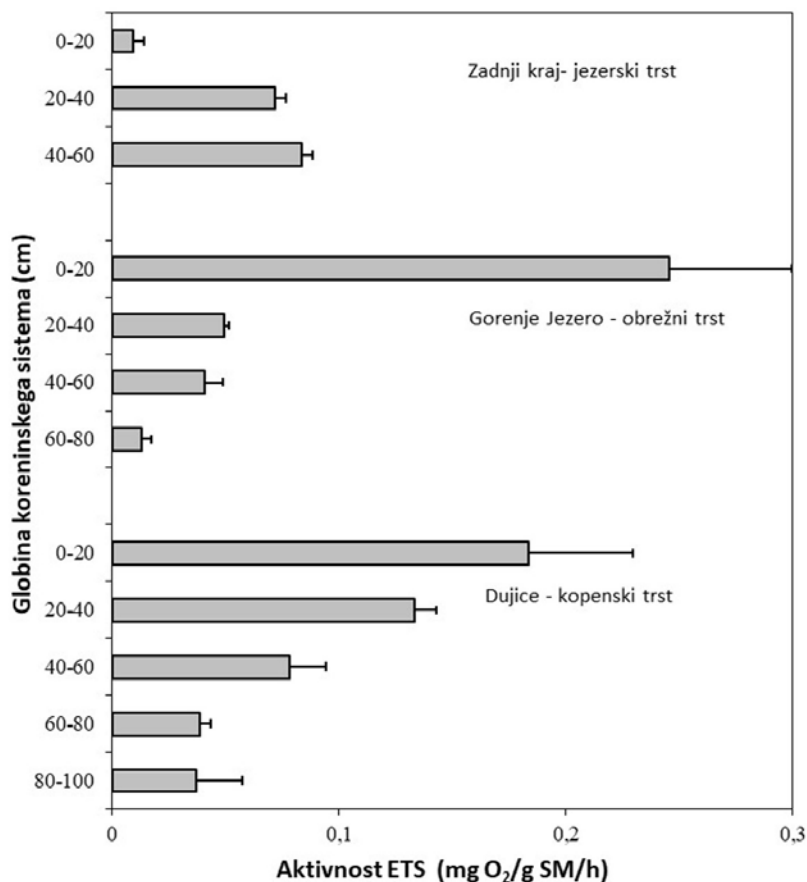
Velika vsebnost Si v listih ima številne pozitivne učinke, saj lahko poveča trdnost rastlin ter prepreči poleganje listov in senčenje listov. Raziskave so pokazale, da kopičenje Si ublaži posledice različnih stresnih razmer ter lahko veže kovinske ione (Klančnik in sod., 2014). Večji deleži Si so bili izmerjeni pri trstu na območju osrednjega dela jezera (Zadnjega kraja), kar je verjetno povezano z večjo transpiracijo in večjo količino Si v tleh (Grašič in sod., 2022)(slika 5). Transpiracijski proces omogoča pasivno gibanje Si kisline z vodo in polimerizacijo monomerov Si kisline in odlaganje kremenca na površini, ko voda izhlapeva (Bauer in sod., 2011).



Slika 5: Pogled na Zadnji kraj z obsežnimi trstišči (foto: Alenka Gaberščik).

Učinkovitost privzema vode (in hranil) v sušnih razmerah izboljšuje tudi kolonizacija korenin z mikoriznimi glivami (Dolinar in sod., 2010; Dolinar in sod., 2016). Te tvorijo razširjeno mrežo finih hif, ki se širijo na območja tal, ki jih korenine ne dosežejo (Birhane in sod., 2012). Tudi koreninski sistem navadnega trsta je zelo obsežen in učinkovit, sestavljen iz gostih, drobno razvejanih korenin in odpornih korenin z dobro razvitim zračnim tkivom, ki omogoča prežračevanje rizosfere (Moore in sod., 2012). To ugodno vpliva na mikorizne glive in omogoča razstrupljanje različnih strupenih snovi v usedlinah. Koreninski sistem je različno globok, kar je odvisno od zgradbe tal. Uspeva na različnih podlagah – peskih, mulju, organskih tleh – kjer je vsebnost organskih snovi od 1 % do 97 % (Packer in sod., 2017). V osrednjem delu jezer, kjer so tla plitvejša in bolj mineralna, koreninski sistem sega do nekaj 10 cm globoko, na obrobju jezera (npr. na območju Dujic) pa celo več kot 1 m globoko. Vitalnost korenin, ki

smo jo ugotavljali z meritvami dihalnega potenciala (aktivnosti terminalnega elektronskega transportnega sistema – ETS), se je spreminjala glede na raven talne vode in globino korenin (Urbanc-Berčič in Gaberščik, 2001) (slika 6).



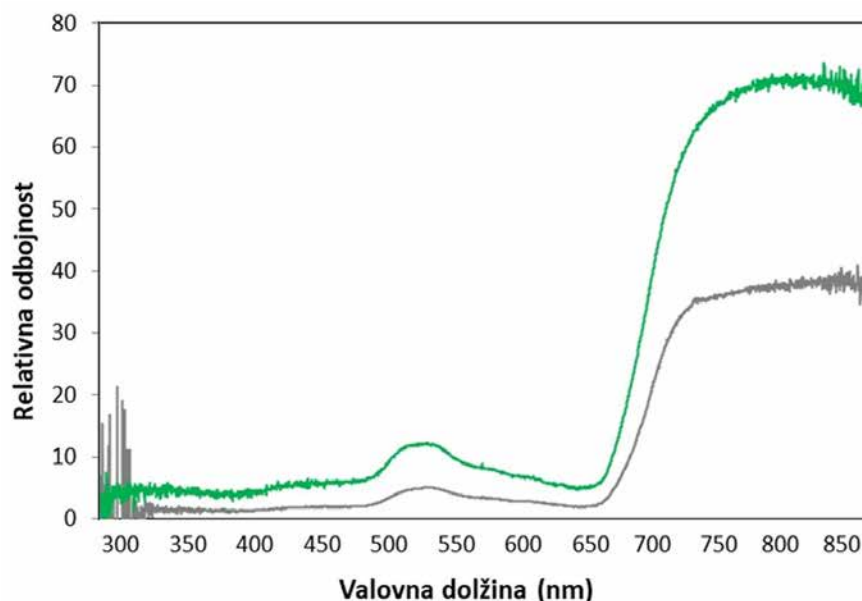
Slika 6: Aktivnost terminalnega elektronskega transportnega sistema (ETS) korenin trsta glede na globino tal v sestojih navadnega trsta na različnih lokacijah (povzeto po Urbanc-Berčič in Gaberščik, 2001).

Različni avtorji navajajo, da je globina korenin navadnega trsta omejena z globino vode in grobim substratom (Moore in sod., 2012; Vretare in sod., 2001).

Spektralni podpisi navadnega trsta

Splošno veljavno dejstvo je, da zgradba listne površine močno vpliva na površinski odboj svetlobe, medtem ko zgradba listne sredice (mezofila) vpliva na prehajanje svetlobe. Raziskave so pokazale, da pri navadnem trstu na odbojnost močno vplivajo bodičke in okremenjenost listne površine, manjši pa je vpliv biokemijske zgradbe (Klančnik in sod., 2014). Na ravni sestoja je odbojnost bistveno manjša, k čemur doprinese večja pestrost gradnikov sestoja in šum zaradi zaznane odbojnosti tal.

Razlike se pojavljajo predvsem v bližnjem infrardečem (NIR) delu spektra, kar pomeni, da list učinkoviteje uravnava energijsko bilanco kot sestoj v celoti. Obliki krivulj sta zelo podobni, z viškom v zelenem delu spektra (slika 7).



Slika 7: Odbojnost sevanja lista (zeleno) in sestoja (sivo) navadnega trsta v območju ultravijoličnega, vidnega in bližnjega IR spektra.

Zaključek

Navadni trst je kozmopolitska vrsta s široko ekološko valenco, veliko primarno proizvodnjo ter obsežnim in dobro prezračenim koreninskim sistemom. Je prevladujoča vrsta na presihajočem Cerkniškem jezeru, kjer je izpostavljena nepredvidljivim okoljskim spremembam, ki so posledica izrazitih naravnih motenj, povezanih s spremembami vodostaja. Ekofiziološke raziskave odražajo velik fotosintezni in transpiracijski potencial trsta, ter veliko učinkovitost rabe vode. Veliko dejavnost trsta v primerjavi z drugimi rastlinskimi vrstami omogočajo njegove morfološke značilnosti. Listi imajo zelo veliko število majhnih listnih rež, ki omogočajo natančen nadzor nad izmenjavo plinov, privzemom ogljikovega dioksida in oddajanjem vode. Trst sodi med akumulatorje silicija (Si), saj je vsebnost Si znašala od 2,8 % do 6,1 % suhe mase listov. Površina listov je močno okremenjena in prekrita s številnimi bodičkami, kar utrjuje list in preprečuje izgubo vode. Gosta listna sredica je bogata s fotosinteznimi in zaščitnimi barvili, kot so antocianini. Posledica zgradbe lista, predvsem pa okremenitve, so tudi njegove optične lastnosti. Navadni trst uspeva na odprtih rastiščih, zato je izpostavljen veliki jakosti sončevega sevanja, vključno z UV-B sevanjem. Poleg okremenjene kutikule, ga pred prekomerno količino svetlobe ščiti tudi velika vsebnost UV absorbirajočih snovi v povrhnjici. Okremenjeni listi imajo razmeroma veliko odbojnost v UV in vidnem delu spektra. Učinkovitost privzema vode in hranil izboljšuje tudi kolonizacija korenin z mikoriznimi glivami. Vitalnost korenin se spreminja glede na raven talne vode in globino koreninskega sistema.

Summary

Common reed – the dominant plant species of Lake Cerknica

Common reed (*Phragmites australis*) is a globally widespread grass and a dominant species in various wetlands. It inhabits ecotonal areas at the transition between terrestrial and aquatic environments in both inland and coastal areas. Common reed has an efficient ventilation system that allows gases to pass through the air tissues (aerenchyma) present throughout the plant. High genetic and phenotypic diversity of common reed allows it to adapt more effectively to changing environmental conditions. As a cosmopolitan species, it can serve as a model species when studying the effects of global change.

The species is also dominant in the intermittent Lake Cerknica, where it is exposed to extreme environmental changes resulting from pronounced natural disturbances due to changes in water levels. We investigated common reed ecophysiology and some of the functional traits that enable its survival in this outstanding environment. Leaf characteristics such as morphological and biochemical properties, element composition, as well as habitat characteristics and root system vigour were examined. We also investigated photochemical efficiency of photosystem (PS) II and total free amino acid content of basal internodes, which are indicators of stress conditions.

Common reed has high photosynthetic activity and transpiration rate compared to other species. Total leaf area index may be significantly reduced during water deficit, especially when the lake drains completely. Plant activity is supported by the specific morphological characteristics of the reed, which allow fine control of gas exchange, as carbon dioxide uptake and water release. The leaf stomata are of small size and very numerous. The leaves are relatively thick, have a low specific leaf area and a considerable amount of sclerenchyma. The leaf surface is heavily incrustated and covered with numerous prickly hairs that stiffen the leaf and prevent water loss. All these adaptations result in high water-use efficiency. Common reed is usually exposed to high intensities of solar radiation, including UV-B radiation. Leaf is not only protected by a thick incrustated cuticle, but also by high content of UV absorbing substances in the epidermis. The dense leaf mesophyll is not only rich in photosynthetic, but also in protective pigments, such as anthocyanins.

Element composition of the leaves of common reed may vary according to reed age and location of growth. Silicon (Si) content ranged from 2.8% to 6.1% of dry matter, which classifies reed as a Si accumulator and thus it contributes efficiently to Si cycling. The efficiency of water and nutrient uptake may be improved by the colonisation of roots by mycorrhizal fungi, which form an extended network of fine hyphae that spread to areas of the soil that roots cannot reach. The root system of common reed is also very extensive and efficient, consisting of dense, finely branched roots and rhizomes with well-developed aerenchyma that allows aeration of the rhizosphere. The root system varies in depth depending on water regime and soil structure. In the central part of the lake, where the soil is shallower and more mineral, it reaches up to some 10 cm deep, while in organic soil in the lake periphery, it reaches even more than 1 m.

Generally, leaf surface strongly influences the surface reflection of light, while the structure of mesophyll influences the transmission of light. In reeds, reflectance is strongly influenced by prickly hairs and leaf incrustation, and less by the biochemical structure. At the stand level, reflectance is significantly lower in comparison to the leaf level due to a greater diversity of the stand structure. Differences occur mainly in the near-infrared (NIR) part of the spectrum, which means that a leaf regulates energy balance more efficiently than a stand as a whole.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 in preko financiranja mladega raziskovalca 55856.

Viri

- Armstrong, J., Armstrong, W., Beckett, P. M. 1992. *Phragmites australis*: Venturi- and humidity-induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation. *New Phytologist*, 120(2), 197–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb05655.x>
- Bart, D., Hartman, J. M. 2000. Environmental determinants of *Phragmites australis* expansion in a New Jersey salt marsh: an experimental approach. *Oikos*, 89(1), 59–69. <https://doi.org/10.1034/j.1600-0706.2000.890107.x>
- Bauer, P., Elbaum, R., Weiss, I. M. 2011. Calcium and silicon mineralization in land plants: Transport, structure and function. *Plant Science*, 180(6), 746–756. <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2011.01.019>
- Birhane, E., Sterck, F. J., Fetene, M., Bongers, F., Kuyper, T. W. 2012. Arbuscular mycorrhizal fungi enhance photosynthesis, water use efficiency, and growth of frankincense seedlings under pulsed water availability conditions. *Oecologia*, 169(4), 895–904. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2258-3>
- Čížková, H., Kučera, T., Poulin, B., Květ, J. 2023. Ecological basis of ecosystem services and management of wetlands dominated by common reed (*Phragmites australis*): European Perspective. *Diversity*, 15(5), 629. <https://doi.org/10.3390/d15050629>
- Dinka, M., Ágoston-Szabó, E., Urbanc-Berčič, O., Germ, M., Šraj-Kržič, N., Gaberščik, A. 2008. Reed stand conditions at selected wetlands in Slovenia and Hungary. V *Wastewater treatment, plant dynamics and management in constructed and natural wetlands* (str. 1–12). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8235-1_1
- Dinka, M., Szeglet, P. 1999. Carbohydrate and nutrient content in rhizomes of *Phragmites australis* from different habitats of Lake Fertő/Neusiedlersee. *Limnologica*, 29(1), 47–59. [https://doi.org/10.1016/S0075-9511\(99\)80038-3](https://doi.org/10.1016/S0075-9511(99)80038-3)
- Dolinar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>
- Dolinar, N., Rudolf, M., Šraj, N., Gaberščik, A. 2010. Environmental changes affect ecosystem services of the intermittent Lake Cerknica. *Ecological Complexity*, 7(3), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.09.004>
- Dolinar, N., Šraj, N., Pongrac, P., Regvar, M., Gaberščik, A. 2010. The presence of mycorrhiza in different habitats of an intermittent aquatic ecosystem. V *Water and nutrient management in natural and constructed wetlands* (str. 299–308). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9585-5_22
- Eller, F., Skálová, H., Caplan, J. S., Bhattarai, G. P., Burger, M. K., Cronin, J. T., Guo, W.-Y., Guo, X., Hazelton, E. L. G., Kettenring, K. M., Lambertini, C., McCormick, M. K., Meyerson, L. A., Mozdzer, T. J., Pyšek, P., Sorrell, B. K., Whigham, D. F., Brix, H. 2017. Cosmopolitan species as models for ecophysiological responses to global change: The common reed *Phragmites australis*. *Frontiers in Plant Science*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01833>
- Faußer, A. C., Dušek, J., Čížková, H., Kazda, M. 2016. Diurnal dynamics of oxygen and carbon dioxide concentrations in shoots and rhizomes of a perennial in a constructed wetland indicate down-regulation of below ground oxygen consumption. *AoB PLANTS*, 8. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plw025>

- Grašič, M., Likar, M., Vogel-Mikuš, K., Samardžić, T., Gaberščik, A. 2022. Decomposition rate of common reed leaves depends on litter origin and exposure location characteristics. *Aquatic Botany*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103513>
- Haslam, S. M. 1972. *Phragmites communis* Trin. (*Arundo Phragmites* L.,? *Phragmites Australis* (Cav.) Trin. ex Steudel). *The Journal of Ecology*, 60(2), 585–610. <https://doi.org/10.2307/2258363>
- Herbst, M., Kappen, L. 1999. The ratio of transpiration versus evaporation in a reed belt as influenced by weather conditions. *Aquatic Botany*, 63(2), 113–125. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(98\)00112-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(98)00112-0)
- Hudon, C., Gagnon, P., Jean, M. 2005. Hydrological factors controlling the spread of common reed (*Phragmites australis*) in the St. Lawrence River (Québec, Canada). *Écoscience*, 12(3), 347–357. <https://doi.org/10.2980/i1195-6860-12-3-347.1>
- Klančnik, K., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A. 2014. Silicified structures affect leaf optical properties in grasses and sedge. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 130, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.10.011>
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th edition). Berlin. Springer. 514 str.
- Mauchamp, A., Méthy, M. 2004. Submergence-induced damage of photosynthetic apparatus in *Phragmites australis*. *Environmental and Experimental Botany*, 51(3), 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2003.11.002>
- Moore, G. E., Burdick, D. M., Peter, C. R., Keirstead, D. R. 2012. Belowground biomass of *Phragmites australis* in coastal marshes. *Northeastern Naturalist*, 19(4), 611–626. <https://doi.org/10.1656/045.019.0406>
- Ojdanič, N., Holcar, M., Golob, A., Gaberščik, A. 2023. Environmental extremes affect productivity and habitus of common reed in intermittent wetland. *Ecological Engineering*, 189, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106911>
- Ojdanič, N., Zelnik, I., Holcar, M., Gaberščik, A., Golob, A. 2023. Contrasting dynamics of littoral and riparian reed stands within a wetland complex of Lake Cerknica. *Plants*, 12(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/plants12051006>
- Packer, J. G., Meyerson, L. A., Skálová, H., Pyšek, P., Kueffer, C. 2017. Biological flora of the British Isles: *Phragmites australis*. *Journal of Ecology*, 105(4), 1123–1162. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12797>
- Rudolf, M. 2008. Vpliv presihanja na aktivnost in primarno produkcijo vrst *Phragmites australis* in *Carex elata* na Cerkniškem jezeru [Master of science thesis]. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta.
- Rudrappa, T., Choi, Y. S., Levia, D. F., Legates, D. R., Lee, K. H., Bais, H. P. 2009. *Phragmites australis* root secreted phytotoxin undergoes photo-degradation to execute severe phytotoxicity. *Plant Signaling & Behavior*, 4(6), 506–513. <https://doi.org/10.4161/psb.4.6.8698>
- Urbanc-Berčič, O., Gaberščik, A. 2001. The influence of water table fluctuations on nutrient dynamics in the rhizosphere of common reed (*Phragmites australis*). *Water Science and Technology*, 44(11–12), 245–250. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0836>
- Vretare, V., Weisner, S. E. B., Strand, J. A., Granéli, W. 2001. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, 69(2–4), 127–145. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00134-6)
- Vymazal, J., Kröpfelová, L. 2005. Growth of *Phragmites australis* and *Phalaris arundinacea* in constructed wetlands for wastewater treatment in the Czech Republic. *Ecological Engineering*, 25(5), 606–621. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2005.07.005>

White, S. D., Ganf, G. G. 2002. A comparison of the morphology, gas space anatomy and potential for internal aeration in *Phragmites australis* under variable and static water regimes. Aquatic Botany 73(2), 115-127. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00010-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00010-4)

Divje čebele Cerkniškega jezera

Blaž Koderman, Rok Šturm, Danijel Kablar, Andrej Gogala, Danilo Bevk

Uvod

Čebele (Hymenoptera: Anthophila) so med najpomembnejšimi opraševalci in tako nepogrešljive za delovanje kopenskih življenjskih združb kot jih poznamo. Ob omembi besede čebela se verjetno najprej spomnimo na medonosno čebelo (*Apis mellifera*), ki je v Sloveniji in svetu močno povezana s tradicijo čebelarjenja. A na svetu poznamo več kot 20 000 vrst čebel razvrščenih v 1200 rodov (Michez in sod., 2019), v Sloveniji pa je bilo poleg medonosne čebele najdenih že več kot 570 vrst divjih čebel (Gogala, 2014a). Raznolikost čebel ne kaže samo številčnost vrst, ampak se odraža tudi v širokem naboru oblik, barv, vedenj, interakcij z drugimi organizmi in izbiri habitatov. V tem poglavju vam bomo poskušali predstaviti prav to raznolikost divjih čebel na Cerkniškem jezeru.

Skupina čebel (Anthophila) velja za monofiletsko skupino znotraj kožekrilcev (Hymenoptera). Poseljujejo vsa kopenska življenjska okolja na planetu z izjemo polarnih puščav in območje trajno zmrznjenih tal (permafrosta) (Danforth in sod., 2013). Čebele sodijo med želate ose (Aculeata) za samice katerih je značilno želo, ki je pravzaprav preobražena leglica (ovipozitor), le-te pa med ozkopase ose (Apocrita), ki jih zaznamuje ozek »pas« med prvim in drugim členom zadka (Michez in sod., 2019). Čebele so tekom evolucijskega razvoja opustile plenjenje in začele z nabiranjem nektarja in peloda za prehrano sebe in svojega zaroda. Vedenjskim spremembam so sledile morfološke in tako so za potrebe nabiranja in transporta cvetnega prahu vsem čebelam skupne peresasto razvejane dlake, ki prekrivajo celotno telo in povečan bazitarzalni segment na zadnjih nogah. Prav tako je njihov jeziček (glosa) po navadi daljši kot pri osah grebačah. Čebele so se v geološki zgodovini najverjetneje pojavile sočasno s kritosemenkami v obdobju srednje krede (pred približno 100 milijoni let) (Grimaldi in Engel, 2005).

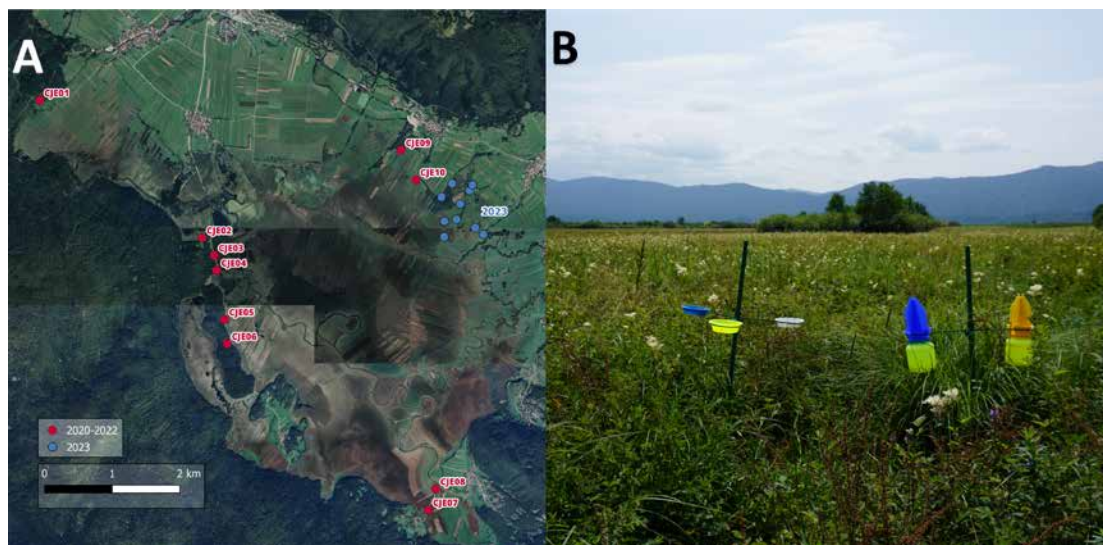
V Evropi in tudi Sloveniji najdemo šest družin čebel (Andrenidae, Apidae, Colletidae, Halictidae, Megachilidae in Melittidae). Zaradi človekovega tesnega stika z medonosno čebelo, le-te povezujemo s socialnim načinom življenja, vendar pa imajo v Evropi pravo eusocialno strukturo (plodna matica in sterilne delavke) pravzaprav le redki predstavniki iz družine Apidae in Halictidae. Najbolj znani predstavniki eusocialnih divjih čebel pri nas so čmrljih (rod *Bombus*). Večina vrst čebel živi popolnoma ali delno samotarsko življenje.

V zadnjem času vse bolj prepoznavamo pomen divjih čebel in drugih divjih opraševalcev za kmetijstvo. Pestrost opraševalcev je namreč ključna za zanesljivo pridelavo hrane (Garibaldi in sod., 2013; Bevk in Prešern, 2021). Vendar pa populacije in pestrost čebel hitro upadajo. V Evropi je dokumentirano ogroženih 9,2 % vrst čebel, vendar za 56,7 % vrst za oceno ogroženosti ni na voljo dovolj podatkov, tako da je delež ogroženih čebel verjetno precej večji. Pri čmrljih, ki so najbolj raziskani, je ogroženih 23,6 % vrst, populacije pa upadajo pri 45,6 % vrst. Glavni razlogi so pomankanje hrane, pesticidi, izguba mest za gnezdenje, podnebne spremembe in bolezni (Nieto in sod., 2014).

Raziskave čebel na Cerkniškem jezeru

V zadnjih desetletjih je na območju Cerkniškega jezera največ podatkov zbral dr. Andrej Gogala, od leta 2020 pa sodelavci Nacionalnega inštituta za biologijo (NIB) z monitoringom divjih čebel. Leta 2020 se je v okolici jezera začelo intenzivno vzorčenje divjih čebel, ki je potekalo v okviru dveh monitoringov. Prva tri leta smo vzorčenje izvajali na 10 lokacijah na širšem območju jezera in njegovim robom med Dolenjo vasjo in Gorenjim Jezerom, v letu 2023 pa na 10 lokacijah na območju Boričk in Černigolc pod vasjo Grahovo (slika 1A). Za vzorčenje smo uporabili modre, rumene in bele lovilne krožnike, prva tri leta tudi modre in rumene križne prestrezne pasti, napolnjene z vodo z dodatkom detergenta (slika 1B). Pasti čebele privabljajo z barvo. Prva tri leta smo vzorčili desetkrat letno, pasti pa so bile vsakokrat postavljene 48 ur. V letu 2023 smo vzorčili šestkrat, pasti pa so bile postavljene šest ur. Ulovljene divje čebele smo preparirali in jih shranili v suhi zbirki NIB.

Čebele smo določili do vrste po Fauna Helvetica 1–6 (Amiet in sod., 1999; 2001; 2004; 2007; 2010; 2017) in Entomologica Austriaca, Zeitschrift der Österreichischen Entomologischen Gesellschaft, Supplement 1, Illustrierte Bestimmungstabelle für die Arten der Gattung *Hylaeus* F. (Maskenbienen in Deutschland, Österreich und der Schweiz (Dathe in sod., 2016).



Slika 1. A) Območje Cerkniškega jezera z označenimi točkami vzorčenja divjih čebel v letih 2020-2022 (rdeče točke) in v letu 2023 (modre točke). B) Pasti za divje čebele na lokaciji CJE09 na vlažnem travniku južno od vasi Martinjak. Levo so lovilni krožniki, desno pa prestrezne pasti (foto: slika A – Rok Šturm, slika B – Mojca Pibernik).

Pestrost čebel na Cerkniškem jezeru

Pred letom 2020 je bilo na območju Cerkniškega jezera z zaledjem znanih 69 vrst divjih čebel, z intenzivnim monitoringom pa je ta številka narasla na 163 vrst. Doslej je bilo torej najdenih kar 28 % v Sloveniji oziroma skoraj 8 % v Evropi poznanih vrst. Glede na to, da smo tudi v zadnjem letu (2023), kljub manjši intenzivnosti vzorčenja, še vedno dobili 8 novih vrst, lahko sklepamo, da seznam še ni popoln. Na območju Cerkniškega jezera živijo predstavniki vseh šestih družin (preglednici 1 in 2).

Kar 24 vrst, ki so bile najdene pred letom 2020, z intenzivnim monitoringom nismo zaznali. Ne-katere od teh vrst so mogoče izginile, dobršen del razlage pa je lahko tudi v načinu vzorčenja. Vzorčenje s pastmi za vse vrste ni enako učinkovito. Primerno je predvsem za vrste, ki se hranijo na zelo različnih rastlinah, manj pa je primerno za vrste, ki so bolj specializirane. Te lažje najdemo z mreženjem po cvetovih.

Preglednica 1: Število zabeleženih vrst čebel na območju Cerkniškega jezera po družinah in njihov delež glede na število vseh vrst v Sloveniji (Divje čebele v Sloveniji, 2024) in Evropi (Nieto in sod., 2014, Rasmont in sod., 2017).

Družina	Št. vrst na območju Cerkniškega jezera	Št. vrst v Sloveniji	Delež glede na št. vrst v Sloveniji (%)	Št. vrst v Evropi	Delež glede na št. vrst v Evropi (%)
Andrenidae	28	131	20,4	489	5,7
Apidae	30	146	20,5	577	5,2
Colletidae	20	48	41,7	146	13,7
Halictidae	39	110	35,5	344	11,3
Megachilidae	39	130	30,0	456	8,6
Melittidae	7	11	63,6	39	17,9
Skupaj	163	576	28,6	2051	8,0

Preglednica 2: Seznam vrst najdenih na območju Cerkniškega jezera. Pri vsaki vrsti je označeno ali je bila najdena pred letom 2020 (opazovanje dr. A. Gogale) in po letu 2020, ko se je začel monitoring divjih čebel (NIB). *Pri vrstah, ki so bile najdenih v letih 2020–2023 je tudi podatek ali so bile ulovljene v gozdu oziroma na gozdnem robu ali mokrotnem travniku.

Družina	Vrsta	Pred 2020	Po 2020	Gozd/ gozdni rob *	Mokrotni travnik *
Andrenida	<i>Andrena bicolor</i> Fabricius 1775		X	X	X
	<i>Andrena bucephala</i> Stephens 1846		X	X	X
	<i>Andrena chrysosceles</i> (Kirby 1802)	X	X	X	
	<i>Andrena curvungula</i> Thomson 1870		X		X
	<i>Andrena dorsata</i> (Kirby 1802)		X		
	<i>Andrena flavipes</i> Panzer 1799		X	X	X
	<i>Andrena fulvago</i> (Christ 1791)		X	X	X
	<i>Andrena fulvata</i> Stoeckhert 1930		X	X	
	<i>Andrena fulvida</i> Schenck 1853		X	X	X
	<i>Andrena gravida</i> Imhoff 1832		X	X	X
	<i>Andrena haemorrhoa</i> (Fabricius 1781)	X	X	X	X
	<i>Andrena hattorfiana</i> (Fabricius 1775)	X	X		X
	<i>Andrena helvola</i> (Linnaeus 1758)		X	X	
	<i>Andrena humilis</i> (Imhoff 1832)	X	X	X	X
	<i>Andrena intermedia</i> Thomson 1872	X			
	<i>Andrena minutula</i> (Kirby 1802)	X	X	X	X

Andrenida	<i>Andrena nitida</i> (Müller 1776)		X		X
	<i>Andrena nitidiuscula</i> (Schenck 1853)	X			
	<i>Andrena pallitarsis</i> Pérez 1902	X			
	<i>Andrena paucisquama</i> Noskiewicz 1924		X	X	X
	<i>Andrena pontica</i> Warncke 1972	X			
	<i>Andrena praecox</i> (Scopoli 1763)	X	X		
	<i>Andrena schencki</i> Moraqitz 1866	X			
	<i>Andrena scotica</i> Perkins 1916		X	X	
	<i>Andrena subopaca</i> Nylande, 1848		X	X	X
	<i>Andrena trimmerana</i> (Kirby, 1802)		X		
	<i>Andrena viridescens</i> Viereck 1916	X			
	<i>Panurgus banksianus</i> (Kirby, 1802)		X	X	
Apidae	<i>Amegilla quadrifasciata</i> Villers 1789		X	X	
	<i>Anthophora furcata</i> (Panzer 1798)		X	X	X
	<i>Anthophora plumipes</i> (Pallas 1772)	X			
	<i>Bombus argillaceus</i> (Scopoli 1763)		X	X	
	<i>Bombus bohemicus</i> Seidl 1837		X	X	
	<i>Bombus haematurus</i> Kriechbaumer 1870		X	X	
	<i>Bombus hortorum</i> (Linnaeus 1761)		X	X	X
	<i>Bombus humilis</i> Illiger 1806	X	X	X	X
	<i>Bombus hypnorum</i> (Linnaeus 1758)		X	X	X
	<i>Bombus lapidarius</i> (Linnaeus 1758)		X	X	X
	<i>Bombus lucorum</i> (Linnaeus 1761)		X	X	X
	<i>Bombus pascuorum</i> (Scopoli 1763)	X	X	X	X
	<i>Bombus pratorum</i> (Linnaeus 1761)		X	X	X
	<i>Bombus ruderarius</i> (Müller, 1776)		X	X	X
	<i>Bombus sylvarum</i> (Linnaeus 1761)	X	X	X	X
	<i>Bombus terrestris</i> (Linnaeus 1758)		X	X	X
	<i>Ceratina callosa</i> (Fabricius 1794)		X		X
	<i>Ceratina chalybea</i> Chevrier 1872	X	X	X	X
	<i>Ceratina cucurbitina</i> (Rossi 1792)		X		
	<i>Ceratina cyanea</i> (Kirby 1802)	X	X	X	X
	<i>Epeoloides coecutiens</i> (Fabricius 1775)	X	X	X	X
	<i>Eucera longicornis</i> (Linnaeus 1758)		X	X	
	<i>Nomada castellana</i> Dusmet 1913		X		X
	<i>Nomada flavoguttata</i> (Kirby 1802)		X	X	
	<i>Nomada integra</i> Brullé 1832	X	X	X	
	<i>Nomada mutica</i> Morawitz 1872	X			

Apidae	<i>Tetraloniella salicariae</i> (Lepeletier 1841)	X	X	X
	<i>Xylocopa iris</i> (Christ 1791)		X	
	<i>Xylocopa valga</i> Gerstaecker 1872		X	X
	<i>Xylocopa violacea</i> (Linnaeus 1758)		X	X
Colletidae	<i>Colletes daviesanus</i> Smith 1846	X		
	<i>Colletes hederæ</i> Schmidt & Westrich 1993	X		
	<i>Hylaeus angustatus</i> (Schenck 1861)		X	X
	<i>Hylaeus brevicornis</i> Nylander 1852		X	X
	<i>Hylaeus communis</i> Nylander 1852	X	X	X
	<i>Hylaeus confusus</i> Nylander 1852	X	X	X
	<i>Hylaeus difformis</i> (Eversmann 1852)		X	X
	<i>Hylaeus dilatatus</i> (Kirby 1802)		X	X
	<i>Hylaeus gibbus</i> Saunders 1850		X	X
	<i>Hylaeus gredleri</i> Förster 1871	X	X	X
	<i>Hylaeus hyalinatus</i> Smith 1842	X	X	X
	<i>Hylaeus incongruus</i> Förster 1871		X	X
	<i>Hylaeus intermedius</i> Förster 1871		X	X
	<i>Hylaeus leptocephalus</i> (Morawitz 1870)		X	X
	<i>Hylaeus moricei</i> (Fries 1898)	X		
	<i>Hylaeus nigritus</i> (Fabricius 1798)		X	X
	<i>Hylaeus pfankuchi</i> (Alfken 1919)	X	X	X
	<i>Hylaeus punctatus</i> (Brullé 1832)		X	X
	<i>Hylaeus sinuatus</i> (Schenck 1853)		X	X
	<i>Hylaeus styriacus</i> Förster 1871		X	X
Halictidae	<i>Duforea dendiventris</i> (Nylander 1848)		X	X
	<i>Halictus maculatus</i> Smith 1848		X	X
	<i>Halictus scabiosae</i> (Rossi 1790)		X	X
	<i>Halictus sexcinctus</i> (Fabricius 1775)	X	X	X
	<i>Halictus simplex</i> Blüthgen 1923		X	X
	<i>Halictus subauratus</i> (Rossi 1792)		X	X
	<i>Halictus tumulorum</i> (Linnaeus 1758)	X	X	X
	<i>Lasioglossum albipes</i> (Fabricius 1781)		X	X
	<i>Lasioglossum angusticeps</i> (Perkins 1895)		X	X
	<i>Lasioglossum bluethgeni</i> Ebmer 1971		X	X
	<i>Lasioglossum calceatum</i> (Scopoli 1763)	X	X	X
	<i>Lasioglossum costulatum</i> (Kriechbaumer 1873)	X	X	X
	<i>Lasioglossum discum</i> (Smith 1853)		X	X
	<i>Lasioglossum fulvicorne</i> (Kirby 1802)	X	X	X

Halictidae	<i>Lasioglossum glabriusculum</i> (Morawitz 1872)	X	X	X
	<i>Lasioglossum interruptum</i> (Panzer 1798)	X		X
	<i>Lasioglossum leave</i> (Kirby 1802)	X	X	
	<i>Lasioglossum laevigatum</i> (Kirby 1802)	X	X	X
	<i>Lasioglossum laticeps</i> (Schenck 1868)	X	X	X
	<i>Lasioglossum lativentre</i> (Schenck 1853)		X	X
	<i>Lasioglossum leucozonium</i> (Schränk 1781)	X	X	X
	<i>Lasioglossum majus</i> (Nylander 1852)	X	X	X
	<i>Lasioglossum malachurum</i> (Kirby 1802)	X		
	<i>Lasioglossum morio</i> (Fabricius 1793)	X	X	X
	<i>Lasioglossum nigripes</i> (Lepelletier 1841)		X	X
	<i>Lasioglossum nitidulum</i> (Fabricius 1793)		X	X
	<i>Lasioglossum parvulum</i> (Schenck 1853)		X	
	<i>Lasioglossum pauxillum</i> (Schenck 1853)	X	X	X
	<i>Lasioglossum politum</i> (Schenck 1853)		X	X
	<i>Lasioglossum puncticolle</i> (Morawitz 1872)		X	
	<i>Lasioglossum villosulum</i> (Kirby 1802)		X	X
	<i>Lasioglossum zonulum</i> (Smith 1848)	X	X	X
	<i>Rophites quinquespinosus</i> Spinola 1808	X		
	<i>Rophitoides canus</i> (Eversmann 1852)	X		
	<i>Sphecodes ephippius</i> (Linnaeus 1767)	X	X	X
	<i>Sphecodes longulus</i> Hagens 1882		X	
	<i>Sphecodes pelludicus</i> Smith 1845		X	X
	<i>Sphecodes reticulatus</i> Thomson 1870		X	X
	<i>Sphecodes scabricollis</i> Wesmäl 1835	X		
Megachilidae	<i>Anthidiellum strigatum</i> (Panzer 1805)	X	X	X
	<i>Anthidium manicatum</i> (Linnaeus 1758)		X	X
	<i>Anthidium oblongatum</i> (Illiger 1806)	X		
	<i>Chelostoma campanularum</i> (Kirby 1802)	X	X	X
	<i>Chelostoma distinctum</i> Stöckert 1929		X	
	<i>Chelostoma florissomne</i> (Linnaeus 1758)		X	X
	<i>Chelostoma foveolatum</i> (Morawitz 1868)		X	
	<i>Chelostoma rapunculi</i> (Lepelletier 1841)	X	X	X
	<i>Coelioxys alata</i> Förster 1853		X	
	<i>Coelioxys conoidea</i> (Illiger 1806)		X	
	<i>Coelioxys echinata</i> Förster 1853		X	
	<i>Coelioxys inermis</i> (Kirby 1802)	X	X	X
	<i>Coelioxys rufescens</i> Lepelletier 1825		X	

Megachilidae	<i>Heriades crenulatus</i> Nylander 1856		X	X	X
	<i>Heriades rubicola</i> Pérez 1890		X	X	
	<i>Heriades truncorum</i> (Linnaeus 1758)	X	X	X	X
	<i>Hoplitis adunca</i> (Panzer 1798)	X			
	<i>Hoplitis claviventris</i> (Thomson 1872)		X	X	
	<i>Hoplitis leucomelana</i> (Kirby 1802)		X	X	
	<i>Hoplitis mitis</i> (Nylander 1852)		X		
	<i>Hoplitis praestans</i> (Morawitz 1894)		X	X	
	<i>Megachile alpicola</i> Alfken 1924		X		X
	<i>Megachile centuncularis</i> (Linnaeus 1758)	X	X	X	X
	<i>Megachile ericetorum</i> Lepeletier 1841	X			
	<i>Megachile ligniseca</i> (Kirby 1802)		X	X	X
	<i>Megachile rotundata</i> (Fabricius 1784)	X			
	<i>Megachile versicolor</i> Smith 1844	X	X		X
	<i>Osmia aurulenta</i> (Panzer 1799)	X			
	<i>Osmia bicolor</i> (Schrank 1781)	X	X	X	
	<i>Osmia bicornis</i> (Linnaeus 1758)		X	X	X
	<i>Osmia caerulescens</i> (Linnaeus 1758)	X	X	X	
	<i>Osmia niveata</i> (Fabricius 1804)		X	X	
	<i>Osmia spinulosa</i> (Kirby 1802)	X			
	<i>Pseudoanthidium nanum</i> (Mocsáry 1880)		X		
	<i>Stelis breviscula</i> (Nylander 1848)		X	X	
	<i>Stelis odontopyga</i> Noskiewicz 1925	X			
	<i>Stelis phaeoptera</i> (Kirby 1802)		X	X	
	<i>Stelis punctulatissima</i> (Kirby 1802)	X			
	<i>Trachusa byssina</i> (Panzer 1805)	X	X		X
Melittidae	<i>Dasypoda hirtipes</i> (Fabricius 1793)		X	X	X
	<i>Macropis europaea</i> Warncke 1973	X	X	X	X
	<i>Macropis fulvipes</i> (Fabricius 1804)	X			
	<i>Melitta haemorrhoidalis</i> (Fabricius 1775)	X	X	X	X
	<i>Melitta leporina</i> (Panzer 1799)	X	X	X	
	<i>Melitta nigricans</i> Alfken 1905	X	X	X	
	<i>Melitta tricincta</i> Kirby 1802	X			

Monitoring divjih čebel v letih 2020–2022 je potekal še na štirih drugih območjih v Sloveniji, kjer je bilo število najdenih vrst občutno manjše. Velika pestrost čebel ob Cerkniškem jezeru kaže na to, da jezero s svojo dinamiko ustvarja raznolika okolja, ki omogoča življenje številnim čebeljim vrstam.

Družina **peščinskih čebel (Andrenidae)** je na območju Cerkniškega jezera zastopana z 28 vrstami. Čebele iz te družine so kratkorile, talno gnezdeče, prisotne in relativno pogoste na celotnem območju Evrope (Gogala, 2019; Michener, 2000; Michez in sod., 2019), kjer je prepoznanih 489 vrst (Nieto in sod., 2014; Michez in sod., 2019). V Sloveniji je bilo najdenih 131 vrst (Gogala, 2019). Petina teh vrst je prisotna tudi na območju Cerkniškega jezera. Vse z izjemo vrste *Panurgus banksianus* so iz rodu *Andrena*.

Peščinarke (*Andrena*) v Evropi, so rod čebel z največjim številom vrst. Med seboj se morfološko zelo razlikujejo, saj lahko dosegaajo od 5 do 18 mm. Tudi obarvanost in odlačenost variira med živimi rdečimi, rjavimi ali sivimi in črnimi odtenki. Živijo samotarsko, nekatere vrste v skupnih kolonijah za katere uporabljajo isti vhod, a vsaka vrsta skrbi le za svojo zalego. Vse peščene čebele gnezdiijo v tleh, vendar imajo različne vrste raje tudi različne podlage, kot so različni tipi zemlje ali peska (Gogala, 2014a).



Slika 2: Levo *Andrena praecox* na cvetu vrbe (*Salix* spp.), desno *Andrena haemorrhoa* na cvetovih gloga (*Crataegus monogyna*) (foto: Blaž Koderman).

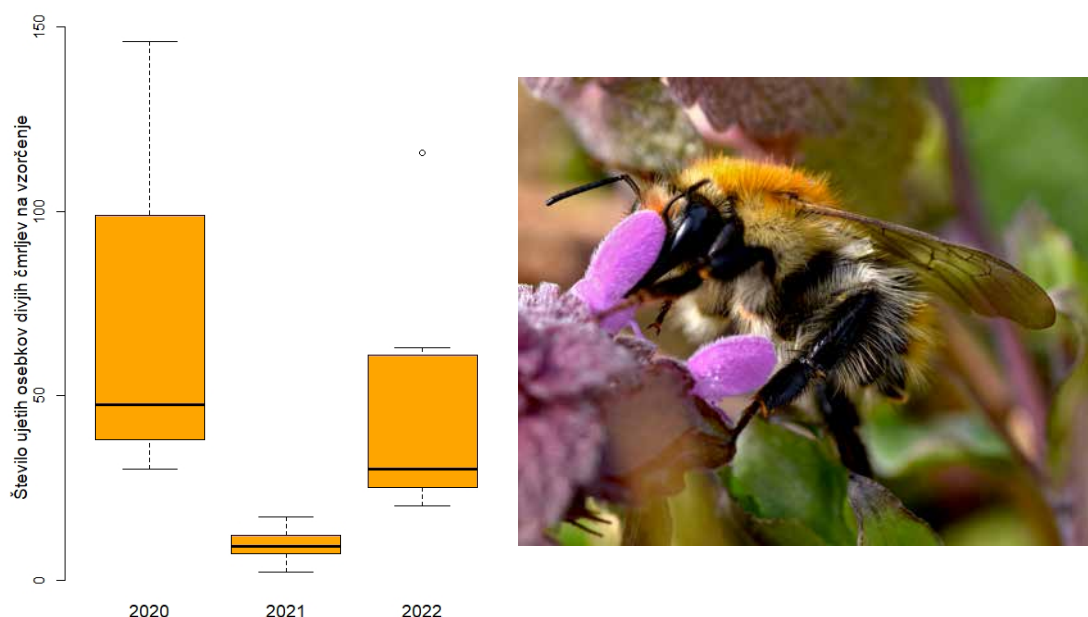
Med drugim na Cerkniškem jezeru živi peščinarke vrste *Andrena praecox* (slika 2). Njeno latinsko ime se nanaša na zgodnost njenega začetka aktivnosti (Scheuchl in Willner, 2016). Zgodnje vrste divjih čebel postanejo dejavne po prvi močnejši pomladanski otoplitvi. Po zimski hibernaciji si morajo čimprej nabrati dovoljšno zalogo energije, da pričnejo z gnezdenjem. Tako so takšne vrste močno povezane z zgodaj spomladi cvetočimi rastlinami, ki so v tem času razmeroma redke in maloštevilne. Omenjena "zgodnja" peščinarke, je skozi svojo evolucijo razvila posebno navezanost na cvetove vrb (*Salix* spp.) in jo tako lahko najdemo le na njihovih cvetovih. Vrstam, ki so specializirane na le eno vrsto ali rod rastlin pravimo malobralne ali oligolektične vrste (Gogala, 2014a).

Iz družine **Apidae** smo našli 30 vrst. V to družino spada širok nabor dolgorilih vrst, ki se med seboj močno razlikujejo po izgledu, velikosti in vedenjskih vzorcih. Jezički predstavnikov skupine lahko segajo tudi preko svojih telesnih dolžin (Michez in sod., 2019). Čeprav se je znotraj družine v dveh rodovih razvilo pravo socialno vedenje (*Bombus*, *Apis*), večina vrst živi samotarsko. Za Slovenijo je znanih 146, za Evropo 577 vrst.

Med rodovi vrstno prevladujejo čmrlji (*Bombus*) s 13 vrstami od skupno 35 znanimi v Sloveniji (Gogala, 2014a). So eusocialne čebele, a je struktura njihovih družin manj kompleksna kot pri medonosni čebeli (Rasmont in sod., 2021). Po prvi pomladni otoplitvi se matice, ki edine prezimijo, prebudijo iz zimske hibernacije in prično z iskanjem hrane. Kmalu začnejo z gnezdenjem. Matica sama naredi voščene lončke, kamor spravlja zalogo hrane za prvo generacijo delavk

(Rasmont in sod., 2021). Ko se izleže dovolj delavk, matica preneha z izletavanjem na pašo (Grad in sod., 2010). V zadnji fazi življenja družine se razvijejo tudi spolni osebki, torej mlade matice in samci. Mlade matice po parjenju poiščejo mesta za prezimovanje (ne prezimijo v gnezdih), gnezda pa propadejo. Čmrlji lahko gnezdijo pod zemljo (npr. v opuščenih gnezdih malih sesalcev) ali nad zemljo (na tleh, v gosti vegetaciji, v duplih), odvisno od vrste. V čmrljih družinah je nekaj deset do nekaj sto osebkov.

Na območju Cerkniškega jezera smo opazili izjemno visoko gostoto čmrljev v primerjavi z drugimi območji v Sloveniji, kjer je potekal monitoring divjih čebel. Število čmrljev na Cerkniškem jezeru je bilo za najmanj štirikrat večje. Najpogostejši je rjavi čmrlj (*Bombus pascuorum*). Ker so čmrlji velike čebele, ki potrebujejo veliko hrane od pomladi do jeseni, njihovo veliko število kaže na to, da Cerkniško jezero zagotavlja dovolj bogate prehranske vire skozi celotno leto. Tako kot drugod v Sloveniji smo tudi na tem območju v letih 2020–2022 zaznali veliko nihanje števila čmrljev, ki se je kazalo kot upad števila v letu 2021 (slika 3). Zaradi kratkotrajnosti monitoringa ne vemo, ali je bil upad v okviru običajnih populacijskih nihanj, ali je šlo za izjemen pojav. Domnevamo, da je bil posledica zelo deževne pomladi, zaradi katere je mnogo čmrljih gnezd propadlo.



Slika 3: Levo število ujetih čmrljev na Cerkniškem jezeru po letih. Število v letu 2021 je značilno nižje kot v letih 2020 in 2022 ($p < 0,001$; Wilcoxonov test). Desno rjavi čmrlj (*Bombus pascuorum*) na mrtvi koprivi (*Lamium sp.*) (foto: Blaž Koderman).

V družini **opnark (Colletidae)** smo našli 20 vrst in sicer iz rodov *Colletes* in *Hylaeus*. Rodova sta si med seboj zelo različna. Medtem ko je za prvega značilna močna odlačenost in talno gnezdenje, čebele drugega rodu praktično nimajo dlak in gnezdijo v steblih (Michez in sod., 2019). Skupen pa jima je način premazovanja sten zarodnih celic z izločki Duforjevih žlez. Ko se izloček posuši ustvari opnasto vrečko, ki zalogo hrane ščiti pred vlago (Gogala, 2014a; Michez in sod., 2019).

Rod *Colletes* je bil zabeležen le z dvema vrstama. Vrste so malobralne, torej vezane na specifične hranilne rastline (Gogala, 2014a), zato je njihovo prisotnost težko potrditi s splošnim monitoringom s pastmi. Precej več predstavnic je bilo zabeleženih iz rodu zakrinkanih čebel (*Hylaeus*) (slika 4). To so drobne, črne čebele, velike večinoma le med 5–7 mm. Na obrazu imajo pogosto

izražene bele oziroma rumene lise ali obrazno masko po kateri so tudi dobile ime. Peloda ne prenašajo na telesu, temveč ga shranjujejo in prenašajo v golši (Gogala, 2014a). Zanimiva najdba v omenjeni skupini je zagotovo vrsta *Hylaeus pfankuchi*, do sedaj v Sloveniji najdena le na Cerkniškem jezeru in v Dragi pri Igu. Za vrsto je značilno gnezdenje v steblih trstičja.



Slika 4: Levo čebela opnarka (*Colletes* sp.) na cvetu ivanjščice (*Leucanthemum* sp.), desno zakrinkana čebela (*Hylaeus gibbus*) z značilno obrazno masko (foto: Blaž Koderman).

Družina **brazdark (Halictidae)** je zastopana z 39 vrstami iz rodu *Lasioglossum* in *Halictus*. Brazdarke so široka družina kratkorilih in povečini talno gnezdečih čebel, v katerih se je pri nekaterih vrstah razvilo eusocialno življenje. Na Cerkniškem jezeru je največ vrst iz rodu *Lasioglossum*, kjer najdemo tako vrste, s pravo socialno strukturo, kot tudi popolnoma samotarske čebele (Michez, 2019). Drugi najbolj zastopan rod v tej kategoriji je rod *Halictus*. Rodova si delita slovenski imeni (brazdarke in vitke čebele), saj sta bila ločena šele nedavno (Gogala, 2014a).

Znotraj čebel **znosk (Megachilidae)** je bilo najdenih 39 vrst. Najbolj pestra sta rodova listorezk (*Megachile*) in dišavk (*Osmia*), poleg njiju pa smo potrdili prisotnost tudi rodov *Anthidiellum*, *Anthidium*, *Chelostoma*, *Coelioxys*, *Heriades*, *Hoplitis*, *Pseudoanthidium*, *Stelis* in *Trachusa*. Morda najbolj presenetljiva najdba znotraj te skupine predstavlja vrsta *Hoplitis mitis*, ki je poznana kot gorska vrsta. Čebele znoske spadajo med dolgorile čebele (skupaj z družino Apidae). Krtačka (organ za prenašanje peloda) se pri njih nahaja na spodnji strani zadka. Vse vrste so samotarske ali kleptoparazitske (socialni paraziti). Prve za gradnjo gnezd uporabljajo najrazličnejše materiale, ali mešanico le-teh. Najpogostejši materiali so blato, pesek, rastlinski material, smola (Gogala, 2014ab; Michez, 2019).

Žagoroške (*Melitta*), oljarke (*Macropis*) (slika 5) in hlačarke (*Dasypoda*) združujemo v družino **Melittidae**. Največ vrst je iz prvih dveh rodov. Samice oljark so oligolektične in obiskujejo le cvetove pijavčnic (*Lysimachia* spp.). Njihova značilnost je tudi ta, da svoje zarodne celice impregnirajo s cvetnimi olji, s katerimi se, namesto z medičino, tudi prehranjujejo. Svoja gnezda gradijo na podoben način kot peščinske čebele. Gnezda same izkopljejo na nasipih ali previsih in so pogosto skrita pod šopi trave.

Pokazatelj velike pestrosti čebel je tudi prisotnost **kukavičjih čebel** (slika 6). Skupina kukavičjih čebel je parafiletska, kar pomeni, da združuje več rodov in družin, ki si med seboj niso sorodne, a jih združujemo v skupino, saj so se pri njih razvili podobni vedenjski vzorci – socialni parazitizem. Na območju Cerkniškega jezera smo našli kar 20 parazitskih vrst čebel (preglednica 3).

Ker nabirajo hrano le za lastno oskrbo, ne pa tudi za oskrbo potomcev, jih je težje opaziti na cvetovih. Manj se tudi lovijo v pasti. Večino časa in energije porabijo za iskanje primernih gostiteljskih vrst. Kukavičje čebele navadno parazitirajo le na majhnem številu gostiteljskih vrst na katere so se evolucijsko prilagodile (Michener, 2006; Gogala, 2014). Prisotnost določenih vrst kukavičjih čebel tako posredno govori tudi o prisotnosti gostiteljskih vrst.



Slika 5: Levo samec oljarke (*Macropis* sp.) na cvetovih špajke (*Valeriana* sp.), desno listorezka (*Megachile* sp.) s pelodno krtačko na spodnji strani zadka (foto: Blaž Koderman).



Slika 6: Kukavičji čebeli, levo *Stelis* sp. na navadnem glavincu (*Centaurea jacea*), desno *Sphecodes* sp. na poljskem osatu (*Cirsium arvense*) (foto: Blaž Koderman).

Koničaste čebele (*Coelioxys*) tako najpogosteje napadajo gnezda listorezk (*Megachile*), čebele pohajkovalke (*Nomada*) večinoma parazitirajo peščinske čebele (*Andrena*) in krvave čebele (*Sphecodes*) na vitkih čebelah (*Halictus*, *Lasioglossum*).

Na parazitski tip življenja so prilagojene tudi morfološko. Pri koničastih čebelah (*Coelioxys*) tako lahko opazimo stožčasto, koničasto oblikovan zadek, ki jim omogoča odlaganje jajčec v zarodne celice gostiteljskih čebel, njihove ličinke pa so opremljene s srpastimi čeljustmi, najverjetneje namenjene uničenju ličink gostiteljske vrste v zarodni celici (Michener, 2006). Zaradi prisotnosti vrste *Nomada mutica* tako v okolici Cerknškega jezera lahko pričakujemo vsaj eno od vrst *Andrena ferox*, ali *A. spinigera*, zaradi *Coelioxys conoidea* pa lahko pričakujemo tudi prisotnost *Megachile maritima* ali *M. lagopoda*.

Preglednica 3: Seznam parazitskih vrst čebel najdenih na območju Cerkniškega jezera in njihove gostiteljske vrste (Divje čebele v Sloveniji, 2024, Scheuchl in Willner, 2016).

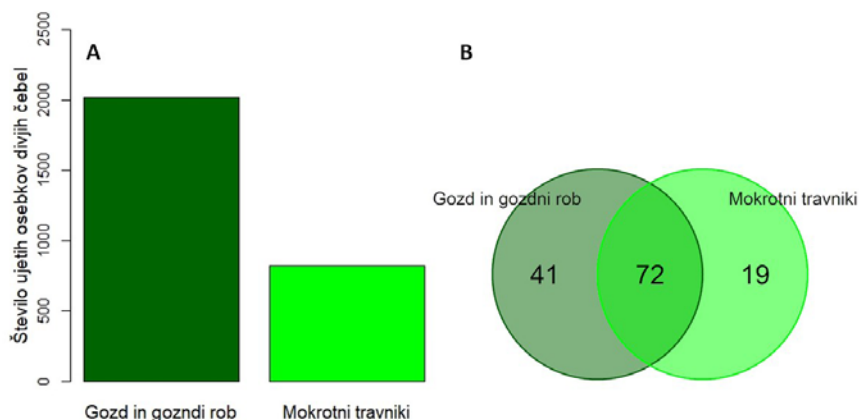
Družina	Rod	Vrsta	Znane gostiteljske vrste
Apidae	Bombus	<i>B. bohemicus</i>	<i>Bombus lucorum</i> , <i>B. terrestris</i> , <i>B. cryptarum</i> , <i>B. magnus</i>
	Epeoloides	<i>E. coecutiens</i>	<i>Macropis europaea</i>
	Nomada	<i>N. castellana</i>	<i>Andrena (Microandrena) spp.</i>
		<i>N. flavoguttata</i>	<i>Andrena minutula</i>
		<i>N. integra</i>	<i>Andrena humilis</i>
		<i>N. mutica</i>	<i>Andrena ferox</i> , <i>A. spinigera</i>
Halictidae	Sphecodes	<i>S. ephippius</i>	<i>Andrena spp.</i> , <i>Halictus spp.</i> , <i>Lasioglossum spp.</i>
		<i>S. longulus</i>	<i>Lasioglossum spp.</i>
		<i>S. pelludicus</i>	<i>Andrena spp.</i> , <i>Lasioglossum spp.</i>
		<i>S. reticulatus</i>	<i>Andrena argentata</i> , <i>A. barbilabris</i> , <i>A. wilkella</i> <i>Lasioglossum prasinum</i>
		<i>S. scabricollis</i>	<i>Lasioglossum leucozonium</i> , <i>L. majus</i> , <i>L. zonulum</i>
Megachilidae	Coelioxys	<i>C. alata</i>	<i>Megachile ligniseca</i> , <i>Anthophora furcata</i>
		<i>C. conoidea</i>	<i>Megachile maritima</i> , <i>M. lagopoda</i>
		<i>C. echinata</i>	<i>Megachile rotundata</i>
		<i>C. inermis</i>	<i>Megachile centuncularis</i> , <i>M. versicolor</i>
		<i>C. rufescens</i>	<i>Anthophora spp.</i>
		<i>S. breviscula</i>	<i>Heriades truncorum</i>
	Stelis	<i>S. odontopyga</i>	<i>Osmia spinulosa</i>
		<i>S. phaeoptera</i>	<i>Osmia leaiana</i> , <i>O. niveata</i>
		<i>S. punctulatissima</i>	<i>Anthidium spp.</i> , <i>Osmia spp.</i>

Primerjava združb čebel gozdnega roba in mokrotnih travnikov

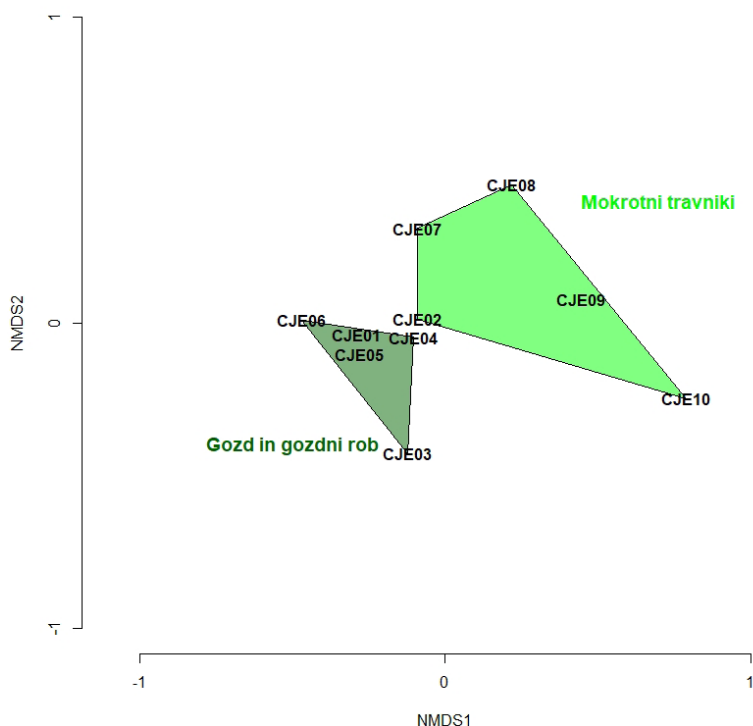
Na območju monitoringa čebel, ki je potekal v letih 2020–2023, prevladujeta dva habitatna tipa in sicer gozd z gozdnim robom in mokrotni travniki. Gozdni rob je nad jezerom na južni strani Cerkniškega polja, med Dolenjo vasjo in vasjo Otok (vzorčna mesta CJE01, CJE03, CJE04, CJE05, CJE06; slika 1A), mokrotni travniki pa med vasjo Martinjak in vasjo Gornje Jezero (CJE02, CJE07, CJE08, CJE09, CJE10 in vsa vzorčna mesta v letu 2023). Travniki, na območju kjer smo vzorčili, med leti 2020 in 2022, so ekstenzivni in košeni le enkrat, pozno v letu, če sploh.

Združbi čebel obeh habitatnih tipov se precej razlikujeta. To je bilo slutiti že med terenskim delom, saj se je v gozdu in na gozdnem robu ulovilo več kot dvakrat toliko čebel kot na mokrotnih travnikih (slika 7A), prav tako pa so bile gozdne združbe vrstno bolj pestre kot tiste na mokrotnih travnikih (slika 7B). Od skupno 132 vrst, ki smo jih ujeli od leta 2020 do 2022, je bila le dobra polovica (72) prisotnih v obeh habitatnih tipih, kar 41 vrst pa smo našli le v gozdu in na gozdnem robu, polovico manj (19) pa samo na mokrotnih travnikih.

Združbi smo primerjali s pomočjo multivariatne analize nMDS, ki jasno prikaže razliko v populacijah divjih čebel gozda z gozdnim robom in mokrotnega travnika (slika 8).



Slika 7: Primerjava populacij divjih čebel gozdnega roba in mokrotnih travnikov. A) Število ulovljenih osebkov, B) Vennov diagram števila zabeleženih vrst.



Slika 8: nMDS analiza abundanc osebkov divjih čebel na različnih vzorčnih mestih. ($k = 3$, stress value = 0,06, R; "vegan") kaže ločene združbe divjih čebel v gozdnem sestoj in na mokrotnih travnikih.

Analiza vključuje podatke o abundanci vsake vrste na posamezni lokaciji. Lokacija CJE02 tvori jasno ločen poligon območij mokrotnih travnikov, a je vseeno najbližje poligonu gozdnih lokacij. Kot je bilo že omenjeno, je bilo mesto vzorčenja na mokrotnem travniku, a zelo blizu gozdnih vzorčnih mest (slika 1A).

Ker travniki veljajo za najpomembnejši življenjski prostor čebel, so rezultati, torej večja pestrost čebel v gozdu in na gozdnem robu, nekoliko presenetljivi. Mogoče je del razlage v poplavljanju travnikov, kar je z vidika gnezdenja v tleh gnezdečih vrst neugodno. Zanimivo bi bilo raziskati še združbe suhih travnikov in jih primerjati z mokrotnimi. Vsekakor pa rezultati kažejo, da je tudi gozd pomemben življenjski prostor številnih vrst čebel.

Zaključki

Cerkniško jezero je eno od bolj raziskanih območij čebelje favne v Sloveniji. Doslej je bilo najdenih 163 vrst čebel, od tega več kot polovica od leta 2020 naprej, ko se je začel intenziven monitoring čebel. Našli smo predstavnike vseh šestih v Sloveniji in Evropi živečih družin čebel. V primerjavi z ostalimi, sicer maloštevilnimi, podobno raziskanimi območji v Sloveniji, se Cerkniško jezero ponaša z največjo pestrostjo čebel. Nadaljnje raziskave bi gotovo prinesle še dodatne vrste.

Ker v preteklosti na tem območju ni bilo intenzivnih vzorčenj čebel, ne vemo, koliko so se na tem območju v zadnjih desetletjih spremenile čebelje združbe, še manj kakšni so populacijski trendi. Monitoringi v zadnjih letih so tako izhodiščno stanje za prihodnje ocene. Poznanje stanja združb je ključno za spremljanje vpliva človekovih posegov, načrtovanje naravovarstvenih ukrepov in spremljanje njihove učinkovitosti. Zato upamo, da se bo monitoring nadaljeval.

Zanimivi so tudi rezultati primerjave dveh prevladujočih habitatnih tipov in sicer gozda z gozdnim robom in mokrotnih travnikov. Več kot polovica vrst je sicer prisotnih v obeh habitatnih tipih, od ostalih pa več v gozdu kot na mokrotnih travnikih. Zanimivo bi bilo proučiti še združbe suhih travnikov v zaledju.

Pomembno je, da se naravovarstveni ukrepi na območju Cerkniškega jezera ohranijo oziroma še okrepijo. Z vidika čebel je pomembno ohranjanje mozaične krajine, ki različnim vrstam zagotavlja prehranske vire od pomladi do jeseni in možnosti gnezdenja.

Summary

Wild bees of Lake Cerknica

Lake Cerknica is a Slovenian biodiversity hotspot for wild bees. Studies of wild bees in the area have begun in the last decades by dr. Andrej Gogala, who collected and observed specimens and recorded their occurrences. He recorded 69 species. Later, between years 2020–2023, with the intensive monitoring conducted by the National Institute of Biology, the number of found species has increased to 163. This accounts for 28% of all species in Slovenia, or about 8% of Europe's wild bee fauna. Intensive monitoring was done by passive colour traps (vane traps and pan traps). The observed specimens belong to all 6 family trees that are found in Europe. Halictidae and Megachilidae being the most diverse ones, with both containing 39 species. Next biggest family is Apidae, with 30 species, followed by Andrenidae with 28 and Colletidae with 20. The lowest species richness was recorded in Melittidae with only 7 species, which was to be expected. Among all the families, 20 species of cuckoo bees were found, which indicates a healthier environment that protected areas can achieve. Bumblebee population density is at least 4 times greater than at any other sampling site in Slovenia we encountered. Therefore, it is reasonable to assume, that Lake Cerknica offers higher diversity of plants, that supply food for pollinators (including large bees such as bumblebees) throughout the whole season. Distinct difference was also observed between species caught on wet meadows and the edge of the forest.

Zahvala

Notranjskemu regijskemu parku se zahvaljujemo za pomoč pri izbiri lokacij monitoringa. Projekt Zasnova metodologije monitoringa divjih opraševalcev v Sloveniji (V1-1938) so sofinancirali Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, Ministrstvo za naravne vire in prostor in Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano iz državnega proračuna. Monitoring divjih čebel v letu 2023 je bil financiran iz sklada za podnebne spremembe.

Viri

Amiet, F., Krebs, A. 2014. Bienen Mitteleuropas Gattungen, Lebensweise, Beobachtung, 2. izd., Wiebelsheim, Haupt Berne

Amiet, F., Müller, A., Neumeyer, R. 1999. APIDAE 2. Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF).

Amiet, F., Herrmann, M., Müller, A., Neumeyer R. 2001 APIDAE 3. Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF).

Amiet, F., Herrmann, M., Müller, A., Neumeyer R. 2004. APIDAE 4. Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF).

Amiet, F., Herrmann, M., Müller, A., Neumeyer R. 2007. APIDAE 5. Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF).

Amiet, F., Herrmann, M., Müller, A., Neumeyer R. 2010. APIDAE 6. Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF).

Amiet, F., Müller, A., Praz, C. R. 2017. APIDAE 1 (2. Izd.), Centre suisse de cartographie de la faune (CSCF).

Bevk, D., Prešern, J. 2021. Pollinators communities differ across years and crops. *Plant, Soil and Environment*, 67, 10, str. 600-607.

Danforth, B. N., Cardinal, S. 2013. Bees diversified in the age of eudicots, *Proceedings of the royal society B*, 280, 1755.

Dathe, H. H., Scheuchl, E., Ockermüller, E. 2016. Illustrierte Bestimmungstabelle für die Arten der Gattung *Hylaeus* F. (Maskenbienen) in Deutschland, Österreich und der Schweiz, *Entomologica Austriaca Zeitschrift*, Supplement 1, Dunaj, der Österreichischen Entomologischen Gesellschaft.

Divje čebele v Sloveniji, Bee Fauna of Slovenia: Checklist of Species (Hymenoptera: Apoidea), <https://www2.pms-lj.si/andrej/cebele.htm>, Datum: 22. 1. 2024

Garibaldi, L. A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M. A., Bommarco, R., Cunningham, S. A., Kremen, C., Carvalheiro, L. G., Harder, L. D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N. P., Dudenhöffer, J. H., Freitas, B. M., Ghazoul, J., Greenleaf, S., Hipólito, J., Holzschuh, A., Howlett, B., Isaacs, R., Javorek, S. K., Kennedy, C. M., Krewenka, K. M., Krishnan, S., Mandelik, Y., Mayfield, M. M., Motzke, I., Munyuli, M., Nault, B. A., Otieno, M., Petersen, J., Pisanty, G., Potts, S. G., Rader, R., Ricketts, T. H., Rundlöf, M., Seymour, C. L., Schüepp, C., Szentgyörgyi, H., Taki, H., Tscharntke, T., Vergara, C. H., Viana, B. F., Wanger, T. C., Westphal, C., Williams, N., Klein, A. M. 2013. Wild Pollinators Enhance Fruit Set of Crops Regardless of Honey Bee Abundance, *Science*, 339 str. 1608-1611.

Gogala, A. 2014a. Čebele Slovenije, Slovenija, Založba ZRC, Biološki inštitut Jovana Hadžija, 179 str.

Gogala, A. 2014b. Čebele znoske v Sloveniji, *Scopolia*, Št. 80, Ljubljana, Prirodoslovni muzej Slovenije, 195 str.

Gogala, A. 2019. Peščinske čebele v Sloveniji, Št. 96, Ljubljana, Prirodoslovni muzej Slovenije, 189 str.

Grad, J. 2010. Življenjski krog čmrljev, V D. Bevk, J. Grad, P. Kozmus (ur.) Čmrlji v Sloveniji, Lukovica, Čebelarstva zveza Slovenije, 32–51.

- Grimaldi, D., Engel, M. S. 2005. *Evolution of the Insects*, Cambridge University Press, England
- Michener, C. D. 2006. *The Bees of the World*, 2. izd. Baltimore, The Johns Hopkins University Press, 953 str.
- Michez, D., Rasmont, P., Terzo, M., Vereecken, N. J. 2019. *Bees of Europe, Hymenoptera of Europe 1*, Francija, N.A.P. Editions, 547 str.
- Nieto, A., Roberts, S. P. M., Kemp, J., Rasmont, P., Kuhlmann, M., Criado, M. G., Biesmeijer, J. C., Bogusch, P., Dathe, H. H., De la Rua, P., De Meulemeester, T., Dehton, M., Dewulf, A., Oritz-Sánchez, F. J., Lhomme, P., Pauly, A., Potts, S. G., Praz, C., Quarata, M., Radchenko, V. G., Scheuchl, E., Smit, J., Straka, J., Terzo, M., Tomozii, B., Window, J., Michez, D. 2014: *European Red List of Bees*, European Commission, Belgium.
- Rasmont, P., Devalez, J., Pauly, A., Michez, D., Radchenko, V. G. 2017. Addition to the checklist of IUCN European wild bees (Hymenoptera: Apoidea), *Annales de la Société entomologique de France*, Vol. 53, No. 1, 17-32.
- Rasmont, P., Ghisbain, G., Terzo, M. 2021. *Bumblebees of Europe and neighbouring regions, Hymenoptera of Europe 3*, Francija, N.A.P. Editions, 631 str.
- Scheuchl, E., Willner W. 2016. *Taschenlexikon der Wildbienen Mitteleuropas*, Nemčija, Quelle & Meyer Verlag Wiebelsheim, 917 str.

Primarna proizvodnja rastlin – osnova delovanja ekosistema

Nik Ojdanič, Nataša Dolinar, Matej Holcar, Dragan Abram, Mateja Grašič, Alenka Gaberščik

Uvod

Večino primarne proizvodnje na zemeljski obli predstavlja energija Sonca, shranjena v organskih snoveh, ki nastajajo v procesu fotosinteze. Manjši del pa temelji na energiji kemijskih vezi in kemosintezi, katere nosilci so nekateri mikroorganizmi. Vsa energija, ki jo primarni proizvajalci privzamejo, prispeva k nastanku bruto primarne proizvodnje (PPb). Del energije rastline (oz. mikroorganizmi) porabijo za svoje vzdrževanje (dihanje oz. respiracijo, ΔR), ostanek pa omogoča nastanek oziroma prirast biomase, ki predstavlja neto primarno proizvodnjo (PPn) (Odum, 1971). PPn izračunamo po naslednji enačbi:

$$PPn = PPb - \Delta R \quad \dots(1)$$

Proizvodi fotosinteze so (1) ogljikovi hidrati, ki so univerzalni substrat, (2) kisik, ki je biološki oksidant in omogoča dihanje ter (3) energija kemijskih vezi, ki predstavlja vir energije za rastlino in druge organizme, zato je fotosinteza energijska in materialna osnova življenja na Zemlji (Odum in Barrett, 2005). Primarna proizvodnja se navadno izraža kot masa nastalih organskih snovi oz. masa ogljika. Če primarna proizvodnja presega potrebe rastline, se kopičijo založne snovi, ki jih kasneje rastline porabljajo glede na potrebe in strategijo vrste. Energija, ki jo nakopičijo rastline, prehaja po ekosistemu preko različnih ravni hranjenja (primarni producenti, rastlinojedi, mesojedi), kjer se vključuje v njihovo biomaso in se porablja za dihanje, v končni fazi pa jo v procesu razgradnje porabijo razkrojevalci. Hkrati z energijo po ekosistemu prehajajo tudi različna hranila, ki jih rastline pridobijo iz neživega okolja in jih uporabijo za izgradnjo svojega telesa. Izjeme so mesojedke (npr. *Drosera intermedia* Hayne), ki lahko hranila pridobijo tudi iz živali. Obseg primarne proizvodnje je zato parameter, ki odraža stanje oz. vitalnost rastlinskih združb. Odvisen je od posamezne rastlinske vrste in njenih prilagoditev, kot so velikost fotosinteze in listni indeks, dolžina rastne sezone ter okoljskih razmer (temperatura, padavine, dostopna hranila in prisotne motnje) (Chapin in sod., 2012).

Na presihajočem Cerkniškem jezeru je primarna proizvodnja razmeroma velika v primerjavi s stalnimi jezери, saj je pokritost z vegetacijo skoraj 100 % (Gaberščik in sod., 2003) (slika 1). Prispevek fitoplanktona k primarni proizvodnji je majhen, kar kažejo koncentracije klorofila *a* v vodi, ki so majhne in zelo variabilne (Kosi, 2002). V letih z visokim vodostajem v vegetacijski sezoni lahko k primarni proizvodnji precej prispevajo makroalge, kot so nitaste alge in parožnice (slika 2) in prave vodne rastline, kot so dristavci in rmanec. Parožnice v razmerah visokih pozno pomladanskih in poletnih vodostajev tvorijo obsežne sestoje na območju Rešeta in Zadnjega kraja, v bolj sušnih letih pa je njihova proizvodnja biomase majhna.

Globalne spremembe hidroloških razmer vse bolj ogrožajo različne vrste mokrišč. Težava so predvsem občasne nepričakovane skrajne spremembe, ki vplivajo na različne ravni ekosistema in njihovo delovanje (Cronk in Fennessy, 2001; Dolinar in sod., 2010a). Na presihajočem Cerkniškem jezeru so motnje zaradi sprememb vodostaja od nekdaj pglavitni dejavnik, ki vpliva na zgradbo in delovanje ekosistema, vključno s primarno proizvodnjo. Danes spremembe vodostajev postajajo vse skrajnejše in nepričakovane. Da bi ugotovili učinke teh sprememb, so bile na primeru modelne vrste navadnega trsta (*Phragmites australis*) izvedene raziskave vplivov teh

sprememb na primarno proizvodnjo vrste. Pri tem nas je zanimalo tudi, v katerih obdobjih v in izven vegetacijske sezone so skrajni vodostaji najbolj usodni za to vrsto. Raziskave so vključevale tudi vpliv na izgled (habitus) rastlin.



Slika 1: Na presihajočem Cerkniškem jezeru je pokritost z vegetacijo skoraj 100 %. Prevladujejo sestoji navadnega trsta (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) (foto: Matej Blatnik).



Slika 2: V letih z visokim vodostajem se pogosto množično pojavijo parožnice (rod *Chara* L.), ki lahko tvorijo debele preproge. Ko voda odteče ostanejo na suhem in propadejo; levo – v vodi, desno – ko voda odteče (foto: Alenka Gaberščik).

V raziskavo sta bila vključena dva sestoja trsta, in sicer obrežni sestoj v bližini struge Stržena, kjer je voda večinoma prisotna celo leto (Gorenje Jezero), ter jezerski sestoj, ki je odmaknjen od struge Stržena, zaradi česar so spremembe vodostaja tam obsežnejše (Zadnji kraj). Na dveh različnih lokacijah je bila spremljana tudi dinamika rasti trsta glede na vodostaj. V rastnih sezonah med 2017 in 2021 pa je bila dinamika rasti navadnega trsta spremljana z uporabo tehnike daljinskega zaznavanja (Ojdanič in sod., 2023b).

Primarna proizvodnja navadnega trsta

Na presihajočem Cerkniskem jezeru je navadni trst izpostavljen nepredvidljivim okoljskim spremembam, ki so posledica naravnih motenj, povezanih s spremembami vodostaja. Spremembe vodostaja imajo lahko različne učinke. Valovanje in tokovi delujejo kot mehanska sila, ki lomi ali poškoduje poganjke, visoki vodostaji onemogočajo rast in razvoj listne površine trsta in motijo preskrbo koreninskega sistema s kisikom, izsuševanje pa povzroči pomanjkanje vode in hranil (Urbanc-Berčič in Gaberščik, 2001), kar močno vpliva na primarno proizvodnjo (Ojdanič in sod., 2023a). Letna neto nadzemna proizvodnja navadnega trsta naj bi bila od 3 do 15 % večja kot največja nadzemna biomasa, saj prihaja do izgub zaradi odmiranja poganjkov, odpadanja listov in prehranjevanja rastlinojedih živali. Podzemno proizvodnjo je mnogo težje ovrednotiti, saj korenine in korenike rastejo in odmirajo različno hitro in v različnih časovnih obdobjih, ter tudi zato, ker se snovi neprestano prenašajo med poganjki in korenikami (Asaeda in sod., 2006). Na primer, če je gladina vode spomladi visoka, se lahko shranjena hranila porabijo za hitro podaljševanje poganjkov, listi pa se ne razvijejo dokler so poganjki potopljeni (Schmieder in sod., 2004).

Na Cerkniskem jezeru je nadzemna biomasa navadnega trsta podobna nadzemni biomasi trsta, ki uspeva na severnejših mokriščih z razmeroma majhno primarno proizvodnjo (Thevs in sod., 2007). Izmerjene vrednosti na različnih lokacijah Cerkniskega jezera in v različnih letih so zelo raznolike in znašajo od 54 do 1605 g/m². Za Nežidersko jezero (Madžarska) navajajo povprečne vrednosti nadzemne biomase 1950 g/m², za jezero Comana (Romunija) 4165 g/m² in za jezero Tåkern (Švedska) 338 g/m² (Brix in sod., 2001) (preglednica 1).

Preglednica 1: Primarna proizvodnja različnih mokrišč ter primarna proizvodnja navadnega trsta (*Phragmites australis*), SM – suha masa.

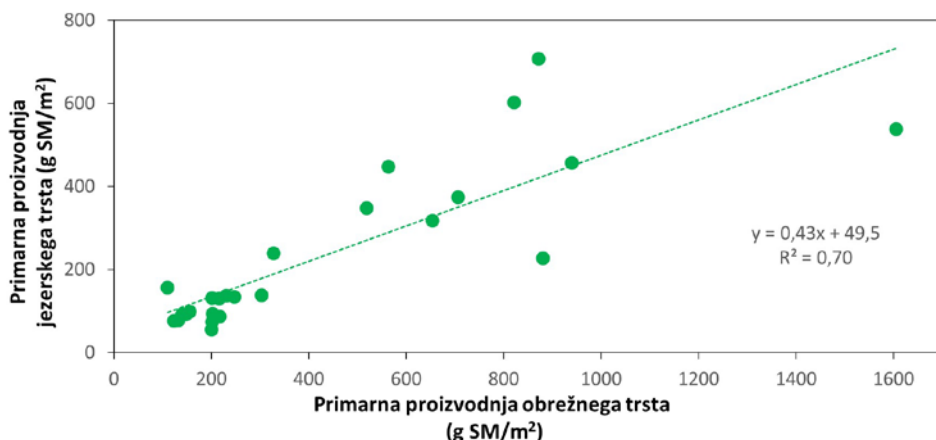
Tip mokrišča/vrsta	Nadzemna biomasa (g SM/m ² /leto)	Podzemna biomasa (g SM/m ² /leto)	Vir
Šotno barje S zemljepisne širine	100–2000		Mitsch in Gosselink, 2015
Sladkovodno mokrišče	900–5500		
Slano mokrišče	130–3700		
Mangrove	1270–5400		
<i>Phragmites australis</i>			
Nežidersko jezero (Madžarska)	1950 ± 792	2803 ± 987	Brix in sod., 2001
Delta Donave (Romunija)	2590 ± 230	4090 ± 757	
Jezero Comana (Romunija)	4165 ± 750	11178 ± 5694	
Jezero Tåkern (Švedska)	338 ± 53	4525 ± 1710	
Slotermeer (Nizozemska)	1305 ± 122	3577 ± 538	
Blejsko jezero (Slovenija)	1040	3640	Gaberščik-Kopušar in Martinčič, 1982
Cerkniško jezero (Slovenija)	331 ± 307*	2400**	

* Povprečna nadzemna biomasa (± SD) na različnih lokacijah v letih 1986, 1987, 1997 ter 2002–2023.

** Vzorčenje leta 2011 na Zadnjem kraju (Dolinar, 2013).

Primerjava med primarno proizvodnjo nadzemne biomase obrežnih in jezerskih sestojev na Cerkniskem jezeru je pokazala, da se produktivnost obeh sestojev zelo razlikuje (slika 3). Sestoji

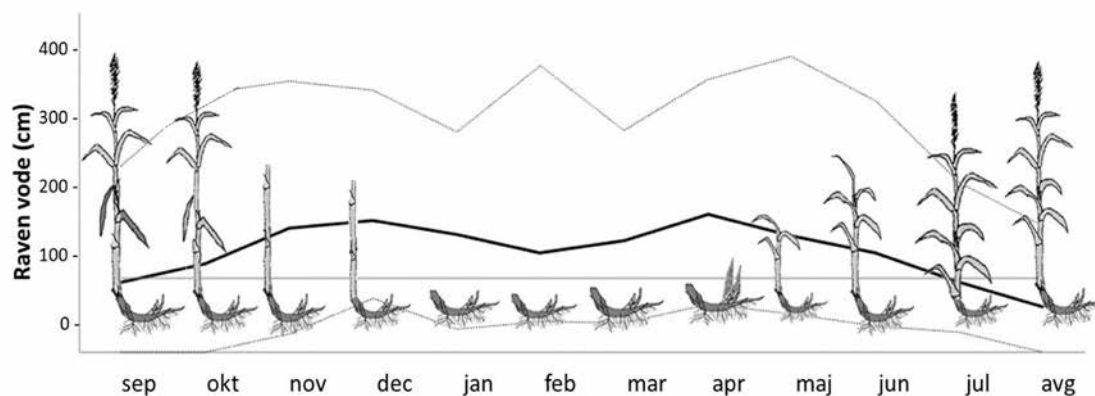
trsta na ožjem območju jezera imajo v povprečju za več kot polovico manjšo primarno proizvodnjo nadzemne biomase kot obrežni sestoji. To je posledica stalne dostopnosti vode (zaradi bližine vodotoka) za obrežne sestoje in skrajnosti vodostajev (poudarjenih sušnih obdobj in poplav) na ožjem območju jezera, delno pa tudi posledica zgradbe usedlin. vzdolž glavnega toka Stržena, ob katerem raste obrežni trst, je razmeroma globoka plast organskih tal, medtem ko je v osrednjem delu jezera večinoma plitva plast bolj ali manj mineralnih tal z manjšo sposobnostjo zadrževanja vode (Dolinar in sod., 2010b; Dolinar in Gaberšček, 2010). Howard (2010) poroča, da se različni genotipi navadnega trsta različno odzivajo na različna tla, saj nekateri bolje uspevajo na organskih, drugi pa na peščenih tleh.



Slika 3: Odnos med primarno proizvodnjo nadzemne biomase obrežnega (Gorenje Jezero) in jezerskega sestoja (Zadnji kraj). Primerjane so povprečne vrednosti v letih 1986, 1987, 1997 ter 2002-2023.

Dinamika rasti navadnega trsta

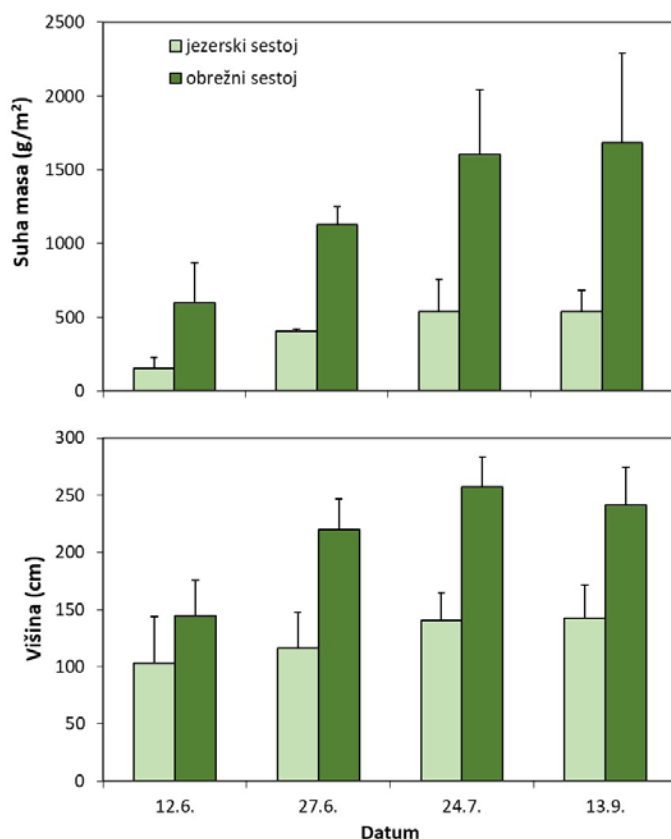
Za Cerkniško jezero je značilno, da trst svoj razvoj začne razmeroma pozno (Rudolf, 2008) pogosto, ko je jezero še poplavljeno (slika 4).



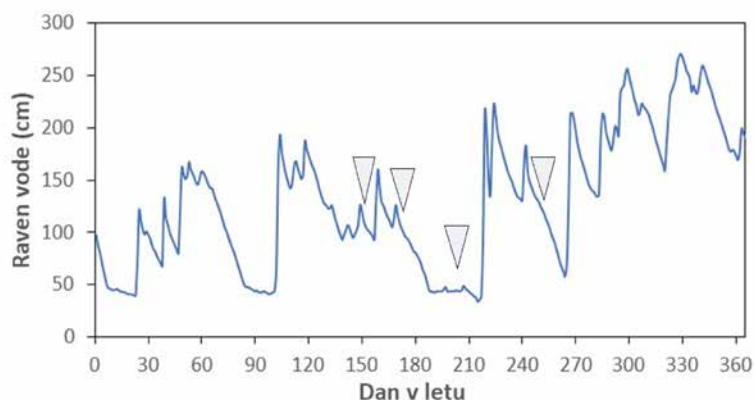
Slika 4: Shematski prikaz razvoja navadnega trsta od septembra, faze shranjevanja zalog v korenike, do avgusta, faze največje nadzemne biomase. S celo črto so prikazane mediane povprečnih mesečnih ravni vode, z zgornjo in spodnjo sivo prekinjeno črto pa največje in najmanjše vrednosti povprečnih mesečnih vodostajev na merilni postaji Gorenje Jezero od leta 1954 do leta 2010 (povzeto po Dolinar, 2013).

Po drugi strani pa v ugodnih razmerah lahko ostanejo rastline dejavne še pozno v jesen (Asaeda in sod., 2011). Začetek vegetacijske sezone na Cerkniškem jezeru je odvisen od višine vodostaja spomladi (Ojdanič in sod., 2023a; Ojdanič in sod., 2023b), sezona pa se večinoma zaključi v začetku jeseni, v kolikor sezone ne skrajšajo poznopoletne poplave. Ugodne razmere jeseni omogočijo shranjevanje zalog v korenike in uspešnejšo rast v poletnem času (Gaberščik in sod., 2020). Za hitro rast in razvoj navadnega trsta v spomladanskem času je ključnega pomena biomasa korenin, ki je odraz ustvarjenih zalog. Z večjo biomaso korenin je povezan večji bazalni premer mladih poganjkov (Mook in van der Toorn, 1985). Poganjki z večjim bazalnim premerom imajo več možnosti, da v mokrišču, ki je zalito z vodo, ostanejo nepoškodovani in razvijejo liste nad vodno gladino.

S poznavanjem dinamike naraščanja biomase in okoljskih razmer v sezoni lahko prepoznamo tiste ugodne in omejitvene dejavnike, ki najbolj spodbujajo ali zavirajo rast primarnih proizvajalcev (McCormick in sod., 2010). V mokriščih so to predvsem hidrološke značilnosti (Hudon in sod., 2005; Smith in Brock, 2006; Dolinar in sod., 2016; Gaberščik in sod., 2018; Ojdanič in sod., 2023a). V letu 2002 sta se tako jezerski kot tudi obrežni sesto razvijala postopno, vendar se je biomasa in višina trsta v sestojih močno razlikovala (slika 5). Hidrološke razmere (slika 6) kažejo kratkotrajno (dvotedensko) presahnitev na začetku rastne sezone, ki ji sledi hiter dvig vodne gladine, nato enomesečna presahnitev julija in ponoven hiter dvig vode v avgustu. Spremembe so bistveno večje na območju jezerskega sestoja v primerjavi z obrežnim sestojem, kar se odraža tudi v količini primarne proizvodnje in največjih razlikah v prirastku v juniju.



Slika 5: Dinamika nadzemne biomase in višine rastlin navadnega trsta v jezerskem in obrežnem sestoju v rastni sezoni leta 2002.



Slika 6: Dinamika ravni vode na postaji Stržen (Gorenje Jezero) v letu 2002. Čas merjenja primarne proizvodnje trsta je označen s puščicami (vir: ARSO).

Visoke temperature v jesenskem času lahko predstavljajo težavo, saj ob spletu različnih okoliščin izzovejo rast trsta po zaključku rastne sezone. Na sliki 7 vidimo mlade poganjke trsta, ki so se pojavili na nekaterih pokošenih rastiščih trsta konec oktobra 2007. Poganjki trsta, ki se razvijejo izven vegetacijske sezone, nimajo prihodnosti, saj njihov nadaljnji razvoj onemogočijo poznojesenske nizke temperature. To pomeni izgubo za rastlino, saj poganjki za rast porabijo dragocene založne snovi iz korenin in tako zmanjšajo potencial za rast v prihodnji rastni sezoni.



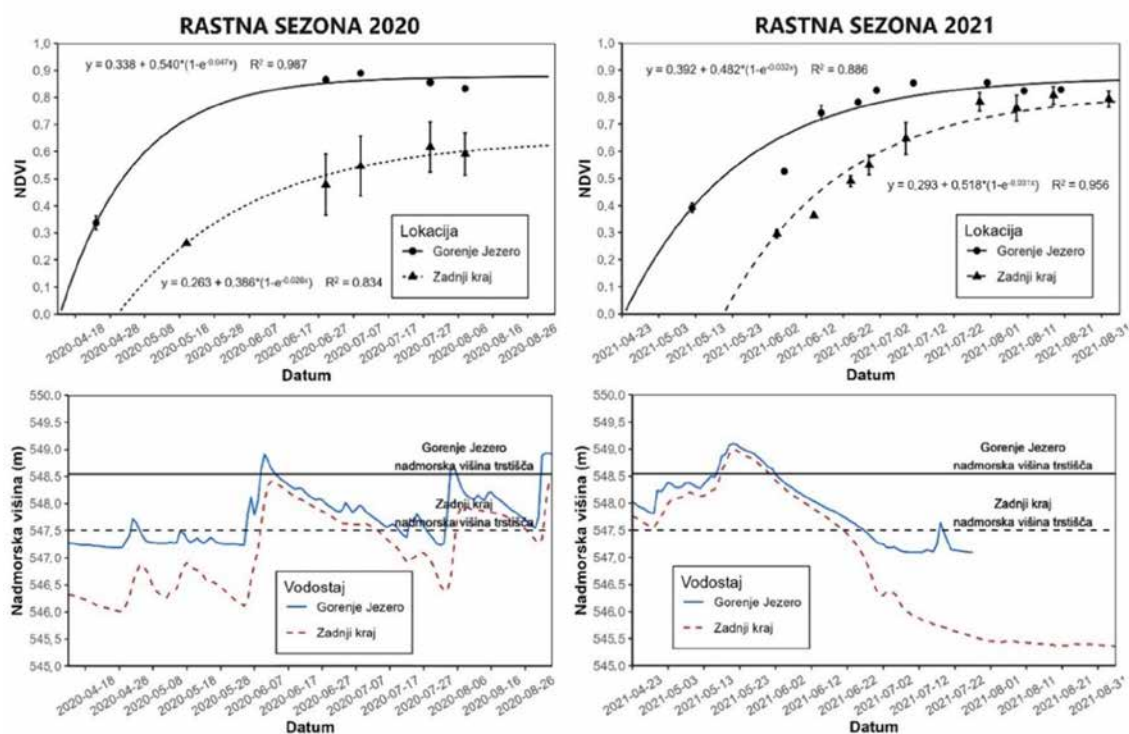
Slika 7: Mladi poganjki navadnega trsta, ki so se pojavili konec oktobra 2007 (foto: Alenka Gaberščik).

Dinamiko rasti navadnega trsta lahko spremljamo tudi z uporabo tehnik daljinskega zaznavanja. Analiza satelitskih posnetkov ter njihovih časovnih vrst je pogosto uporabljena metoda v

mokriščih, kjer so zaradi oddaljenosti in težje dostopnosti meritve na terenu otežene (Santin-Janin in sod., 2009; Kumar in Mutanga, 2017). Ojdanič in sod. (2023b) so rast navadnega trsta jezerskega sestoja pri Zadnjem kraju in obrežnega sestoja pri Gorenjem Jezeru spremljali z uporabo tehnik daljinskega zaznavanja v petletnem obdobju (2017–2021). Iz satelitskih posnetkov srednje visoke ločljivosti (Sentinel-2, GSD = 10 m) so izračunali vegetacijske indekse NDVI (normirani diferencialni vegetacijski indeks) od začetka rastne sezone ter do vrhunca rastne sezone. NDVI temelji na razmerju med odbito bližnjo infrardečo svetlobo (NIR) in rdečo svetlobo (R) in ga izračunamo po enačbi:

$$NDVI = \frac{(NIR - R)}{(NIR + R)} \quad \dots(2)$$

Zaradi vsebnosti klorofila vegetacija dobro absorbira rdečo svetlobo, medtem ko zaradi celične zgradbe intenzivno odbija bližnjo infrardečo svetlobo. NDVI se tako uporablja za oceno biomase rastlinskega pokrova (Yan in sod., 2022), spremljanje produktivnosti (Vicente-Serrano in sod., 2016), zaznavanje rastlinskega stresa (Chávez in sod., 2016) in oceno vodnega potenciala listov (Dong in sod., 2021). Vrednosti NDVI se hkrati z razvojem rastlin večajo, kar omogoča spremljanje rasti (Pan in sod., 2015; Tóth, 2018). V rastni sezoni 2021 je bil jezerski sestoj dlje časa zalit v primerjavi z obrežnim sestojem (slika 8).



Slika 8: Model rasti do nasičenja na podlagi NDVI vrednosti za jezerski in obrežni sestoj v rastnih sezonah 2020 in 2021. Spodnji del slike predstavlja nadmorske višine jezerskega in obrežnega trstišča ter njun obseg zalitosti (povzeto po Ojdanič in sod., 2023b).

Zaradi daljše zalitosti je rastna krivulja jezerskega sestoja zamaknjena, kar kaže na to, da se vegetacijska sezona obrežnega trstišča začne hitreje. Jezerski navadni trst je začel rasti 30. maja, 28 dni kasneje kot obrežni navadni trst (Ojdanič in sod., 2023b). NDVI vrednosti, ki so na območju Cerkniškega jezera med 0 in 0,2, pomenijo odsotnost rastlin. Vrednosti med 0,2 in 0,4 predstavljajo začetek rasti navadnega trsta. Končne vrednosti NDVI ob vrhuncu rastne sezone,

ki so nad 0,7, predstavljajo zdrava vitalna trstišča. V rastni sezoni 2021 v vrhuncu rastne sezone ni bilo večjih razlik, kar pomeni, da sta bili obe trstišči vitalni. V začetku rastne sezone 2020 je bil vodostaj na obeh lokacijah nizek, vendar je obrežni trst pri Gorenjem Jezeru kljub temu hitreje začel vegetacijsko sezono (slika 8). V mesecu juniju je zaradi povečane količine padavin vodostaj na obeh lokacijah narasel. Jezersko trstišče je bilo večino julija zalito, medtem ko je bilo obrežno trstišče zaradi večje nadmorske višine zalito le nekaj dni. Atipičen dvig vodostaja v začetku poletja ni vplival na vitalnost obrežnega trstišča, saj so vrednosti NDVI velike (med 0,8 in 0,9). NDVI vrednosti jezerskega trstišča so bile bistveno manjše, kar nakazuje slabše stanje trstišča.

Vpliv okoljskih dejavnikov na proizvodne parametre navadnega trsta

Vpliv povprečnih mesečnih vodostajev in temperatur

Dolarin in sod. (2016) so ugotavljali povezavo med mesečnimi vodostaji, temperaturo in produktivnostjo (nadzemno biomaso) trsta v letih 1986, 1987, 1997, ter od leta 2002 do 2015 v jezerskem in obrežnem sestoju. Ugotovili so tesne povezave med biomaso in vodostajem jeseni predhodnega leta in spomladi tekočega leta, predvsem na jezerski lokaciji. Trst na območju jezera, ki je izpostavljen izrazitim sušam in poplavam, je posebej občutljiv na visoko raven vode na začetku in na koncu rastne sezone in je v manjši meri odvisen od temperatur, medtem ko je obrežni trst, ki ima vseskozi nemoteno preskrbo z vodo, v večji meri odvisen od temperature. Ugodne temperature (skupaj z zadostno količino vode) so pomembne predvsem ob koncu rastne sezone, ko se v koreninah kopičijo zaloge. Trst ima konservativen način rabe proizvodov fotosinteze (asimilatov) in je ob ugodnih razmerah lahko jeseni še dolgo fotosintezno dejaven ter kopiči rezervne snovi v podzemnih organih (Larcher, 2003). Jeseni nakopičene zaloge zagotavljajo energijo za hiter razvoj spomladi v primeru nizke ravni vode in visokih temperatur. V kolikor pa je raven vode visoka, pa trst shranjena hranila porabi za hitro podaljševanje poganjkov, da ti čimprej dosežejo vodno gladino, saj se na potopljenem delu poganjkov listi ne razvijejo. Ob koncu sezone je asimilacijska površina manjša kot običajno in rastlina lahko shrani manj asimilatov.

Podobne rezultate so dale tudi kasnejše analize z daljšimi nizi podatkov (Gaberščik in sod., 2020). Pokazale so močnejše in številnejše večinoma negativne korelacije z vodostaji v primeru jezerskega trsta. Na produktivnost so najbolj vplivali vodostaji oktobra in novembra predhodnega leta ter vodostaji maja in junija v tekočem letu. Maj in junij sta bila tudi najvplivnejša meseca glede temperature zraka. V obrežnem sestoju sta bila bazalni premer rastlin in višina rastlin pozitivno povezana z višino vode in negativno s temperaturo zraka, vodostaj decembra in januarja pa je bil negativno povezan s številom internodijev. Spremembe vodostaja predstavljajo fizično silo, ki lahko zlomi posušena stebila trsta, ki ob višjih vodostajih služijo za pasivno prezračevanje koreninskega sistema (Armstrong in Armstrong, 1990; Afreen in sod., 2007). Posebno težavo spremembe vodostaja predstavljajo v zimskem času, ko je jezero zamrznjeno (slika 9) in se led ob upadanju (spreminjanju) vodne gladine lomi in pri tem poškoduje v led ujete rastline. Zlomljena in poškodovana stebila predstavljajo omejitev za rastline v spomladanskem času, saj je prezračevanje koreninskega sistema preko stebel moteno, posebej, če je raven vode visoka. Jezerski trst je zaradi presihanja pogosto izpostavljen tudi dolgotrajnim sušnim obdobjem, na kar se odzove z zmanjšanjem listne površine in s povečano učinkovitostjo rabe vode (Pagter in sod., 2005). To potrjuje negativna korelacija med vodostajem in številom listov v juniju in juliju (Gaberščik in sod., 2020).



Slika 9: Jezero v ledenem oklepu (foto: Matej Blatnik).

V obdobju od leta 2007 do 2021 so bile poleg meritev produktivnosti opravljene tudi meritve značilnosti habitusa (bazalni diameter, višina, listna masa, masa stebela z listnimi nožnicami in cvetovi), gostote rastlin ter deleža cvetočih rastlin jezerskega in obrežnega trsta. Primerjava merjenih parametrov na obeh lokacijah je pokazala značilne razlike. Rastline z obrežnega rastišča so v povprečju višje in težje, pa tudi gostota rastlin na tem rastišču je večja (preglednica 2). Kot smo že omenili, je poglobljena razlika med obema lokacijama vodni režim, ki ga na Gorenjem Jezeru (obrežni sestoj) zaznamuje bližina vodotoka Stržen, ki zagotavlja stalno prisotnost hiporeične vode.

Preglednica 2: Povprečne vrednosti in standardne deviacije rastnih parametrov navadnega trsta iz jezerskega (Zadnji kraj) in obrežnega (Gorenje Jezero) sestoj v obdobju od leta 2007 do 2021.

Parameter	Jezerski sestoj trsta	Obrežni sestoj trsta	p-vrednost
Višina (cm)	148,0 ± 30,6	183,3 ± 26,5	≤0,001
Bazalni premer stebela (mm)	5,2 ± 1,0	5,1 ± 0,8	nz
Število internodijev na rastlino (n)	16,3 ± 1,7	16,0 ± 1,7	nz
Število listov na rastlino (n)	9,5 ± 3,2	9,9 ± 2,4	nz
Število rastlin (n)	50,4 ± 20,9	64,9 ± 26,4	≤0,001
Biomasa listov (g/m ²)	105,3 ± 46,8	159,3 ± 72,4	≤0,001
Biomasa stebel (g/m ²)	338,7 ± 192,4	619,6 ± 270,7	≤0,001
Cvetoče rastline (%)	47,6 ± 26,6	58,7 ± 18,1	≤0,05

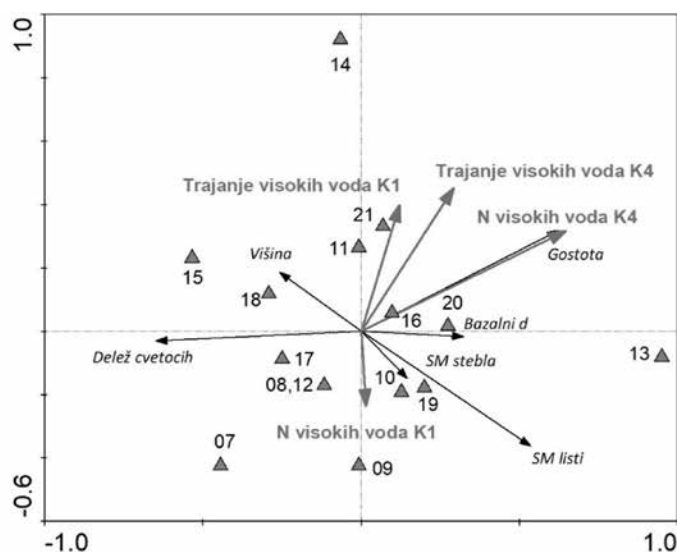
* nz – ni statistično značilnih razlik (Mann-Whitney test).

V Zadnjem kraju (jezerski sestoj), ki je približno 1 km oddaljen od Stržena, je površinska voda v povprečju prisotna le 9–10 mesecev na leto. V sušnem obdobju, ki običajno nastopi poleti, se podtalnica lahko spusti več metrov pod površje (Kranjc, 2002). Različne razmere vplivajo tudi na funkcionalne lastnosti trsta. Raziskava, ki so jo objavili Li in sod. (2014), je pokazala, da se funkcionalne lastnosti listov in korenin vodnega in kopenskega trsta lahko močno razlikujejo, kar lahko vpliva na njihove strategije pridobivanja virov. Pokazali so tudi, da kopenski trst raste počasneje, vendar je bolj odporen na neugodne okoljske razmere.

Vpliv skrajnih vodostajev

Ojdanič in sod. (2023a) so opravili analizo vpliva skrajnih (najvišjih in najnižjih) vodostajev in temperatur na merjene parametre. V ta namen so leto razdelili na štiri četrletja. Za vsak vzorec so upoštevali okoljske podatke (vodostaje) iz četrtega četrletja prejšnjega leta, ki bi lahko vplivali na kopičenje rezerv v koreninah trsta, ter obdobja prvega (obdobje neaktivnosti), drugega (čas vegetativne rasti) in tretjega četrletja (obdobje razvoja razmnoževanih organov) v tekočem letu. Raziskali so vpliv pogostosti in trajanja skrajnih vodostajev v posameznih četrletjih, in sicer visokih voda (ki so opredeljene kot vodostaji nad mejo običajnih poplav (Gaberšček in sod., 2018) in skrajno nizkih voda, ko se je gladina vode v Strženu na merilni postaji Gorenje Jezero znižala pod 50 cm vsaj za en teden. Redundantna analiza odnosov med okoljskimi parametri ter parametri produktivnosti in habitusa trsta so tako kot že predhodne raziskave vpliva povprečnih vodostajev pokazale, da so za jezerski sestoj pomembni parametri visokega vodostaja v četrtem četrletju prejšnjega leta, medtem ko so bili za obrežni sestoj pomembni parametri prvega četrletja tekočega leta. Pogostost in trajanje skrajnih (najvišjih in najnižjih) vodostajev so imeli večji pojasnjevalni potencial kot povprečne vrednosti teh parametrov. Imeli so tudi večji pojasnjevalni potencial za jezerski trst v Zadnjem kraju v primerjavi z obrežnim trstom na Gorenjem Jezeru. Spremenljivke visokega vodostaja so pojasnile 60 % variance parametrov produktivnosti jezerskega sestoja in 21 % variance parametrov produktivnosti obrežnega sestoja. Za parametre nizkega vodostaja je bila pojasnjena varianca 51 oz. 24 %. Temperature so pojasnile majhen delež variance.

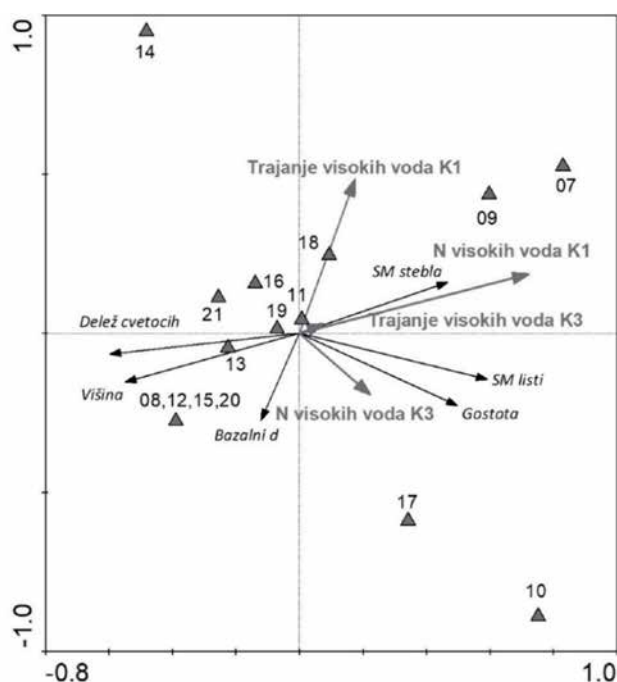
V pričujočem prispevku predstavljamo grafične rezultate redundantne analize (RDA), v kateri smo se osredotočili na odnos med merjenimi ravnimi parametri trsta v jezerskem in obrežnem sestoju ter pogostostjo in trajanjem skrajno visokih in skrajno nizkih vodostajev v posameznem četrletju leta. V primeru jezerskega sestoja (slika 10) je raziskava pokazala, da pogostost pojavljanja skrajno visokih vodostajev in njihovo trajanje v četrtem četrletju razložita 12 in 11 % variabilnosti ravnih parametrov. Isti spremenljivki v prvem četrletju tekočega leta še dodatno razložita 5 % variabilnosti.



Slika 10: RDA graf, ki prikazuje povezavo med ravnimi parametri trsta in trajanjem ter pogostostjo skrajno visokih vodostajev v jezerskem sestoju (Zadnji kraj) v obdobju od 2007 do 2021. Trikotniki označujejo različna leta, odebeljeni vektorji neodvisne spremenljivke, tanjši vektorji pa odvisne spremenljivke. K – četrletje (kvartil), N – frekvenca pojavljanja, SM – suha masa, d – premer, Gostota – gostota poganjkov.

Pogostost pojavljanja skrajno visokih vodostajev in njihovo trajanje v četrtem četrletju je v pozitivnem odnosu z gostoto rastlin in v negativnem odnosu z deležem cvetočih rastlin. Valovanje in skrajne poplave lahko polomijo stebila in poškodujejo apikalne meristeme (Mook in van der Toorn, 1985). V sezonah, ki sledijo takim dogodkom, se lahko pojavijo številnejši novi poganjki (Čuda in sod., 2021), pri katerih pa je navadno povprečni bazalni premer manjši. V zelo ugodnih razmerah se lahko pojavi tudi močna medvrstna kompeticija, ki negativno vpliva na majhne in pozno zrasle poganjke ter cvetenje rastlin (Haslam, 1970).

Odnos med merjenimi parametri trsta v obrežnem sestoju ter pogostostjo in trajanjem skrajno visokih vodostajev v posameznem četrletju leta je predstavljen na sliki 11.



Slika 11: RDA graf, ki prikazuje povezavo med rastnimi parametri in trajanjem ter pogostostjo skrajno visokih vodostajev v obrežnem sestoju (Dolenje Jezero) v obdobju od 2007 do 2021. Trikotniki označujejo različna leta, odebeljeni vektorji neodvisne spremenljivke, tanjši vektorji pa odvisne spremenljivke. K – četrletje (kvartil), N – frekvenca pojavljanja, SM – suha masa, d – premer, Gostota – gostota poganjkov.

Redundančna analiza je pokazala, da pogostost pojavljanja skrajno visokih vodostajev in njihovo trajanje v prvem četrletju razložita 15 in 10 % variabilnosti rastnih parametrov, isti spremenljivki v tretjem četrletju pa še dodatnih 5 in 3 %. Vektor Trajanje skrajno visokih vodostajev v prvem četrletju kaže v nasprotno smer od vektorja Bazalni premer, vektor Pogostost skrajno visokih vodostajev v prvem četrletju pa v nasprotno smer od vektorja Višina rastlin. Vektorja, ki opredeljujeta visoke vode v tretjem četrletju (v reproduktivni fazi), sta v negativnem odnosu z deležem cvetočih rastlin in v pozitivnem odnosu z gostoto rastlin. Oboje je verjetno povezano s poškodovanostjo poganjkov zaradi visoke vode, sprememb vodostaja, občasno pa tudi valovanja.

Redundančna analiza, v kateri smo ugotavljali odnos med merjenimi parametri trsta ter pogostostjo in trajanjem skrajno visokih vodostajev v posameznem četrletju leta v jezerskem sestoju na Zadnjem Kraju, je pokazala predvsem vpliv pogostosti izsuševanja. Največjo težavo predstavlja večkratno izsuševanje v tretjem četrletju, ki razloži 15 % variabilnosti merjenih paramet-

trov, medtem ko pogostost izsuševanja v prvem in četrtem četrletju razložita dodatnih 7 in 4 % variabilnosti merjenih parametrov. Vektor Pogostost nizkih vodostajev v tretjem četrletju kaže v nasprotno smer od vektorja Višina in delež cvetočih rastlin, medtem ko vektor Pogostost nizkih vodostajev v prvem četrletju kaže v nasprotno smer od vektorjev Bazalni premer in Go-stota rastlin.

Redundančna analiza, v kateri smo ugotavljali odnos med merjenimi parametri trsta ter pogostostjo in trajanjem skrajno nizkih vodostajev v posameznem četrletju leta v obrežnem sestoju na Gorenjem Jezeru, je pokazal predvsem vpliv trajanja in pogostosti nizkih vodostajev v četrtem četrletju predhodnega leta (ki razložita 6 in 11 % variabilnosti merjenih parametrov) in pogostosti nizkih vodostajev v tretjem četrletju tekočega leta (ki razloži 9 % variabilnosti merjenih parametrov). Pogostost nizkih vodostajev je povezana s spremembami vodostaja, ki na rastline delujejo kot stresni dejavnik in motnja (Larcher, 2003).

Če povzamemo rezultate analiz vpliva skrajnih vodostajev na oba sestoja, lahko ugotovimo, da tudi skrajno visoki vodostaji predstavljajo težavo za jezerski sestoj predvsem v zadnjem četrletju preteklega leta, za obrežni sestoj pa v prvem četrletju tekočega leta. Skrajno nizki vodostaji so bolj vplivali na proizvodne parametre jezerskega trsta v primerjavi z obrežnim trstom, medtem ko je bil vpliv na lastnosti poganjkov večji v obrežnem sestoju. Spremembe vodne gladine, ki so izrazitejše v Zadnjem kraju, dodatno negativno vplivajo na rastline, čeprav je trst dobro prilagojen na takšne razmere, saj dobro raste v razmeroma globoki vodi, prenese pa lahko tudi pomanjkanje vode (Pagter in sod., 2005). Kljub tej prožnosti na primarno proizvodnjo trsta vplivajo že majhne spremembe vodnega režima. Ob povečanju vodne gladine z 10 na 20 cm je bilo ugotovljeno znatno zmanjšanje biomase in dolžine poganjkov (Hellings in Gallagher, 1992). Vretare in sod. (2001), ki so proučevali rast trsta v različno globoki vodi, so poročali, da so imele rastline, ki so se začele razvijati v 70 cm globoki vodi, manj poganjkov, ki so bili višji, razmerje med nadzemno in podzemno biomaso pa je bilo razmeroma visoko. White in Ganf (2002) pa poročata, da hitre spremembe vodne gladine lahko vplivajo na vitalnost trsta tudi zaradi zmanjšane prenosa kisika v rizosfero ob poplavih. Skrajno in hitro naraščanje vodostaja vodi do podobnih posledic kot skrajno in hitro izsuševanje, še posebej, če do hitrega naraščanja pride po zelo nizkih vodostajih (Zohary in Ostrovsky, 2011). Raven podtalnice pa vpliva tudi na obliko, koncentracijo in razpoložljivost hranil v porni vodi rizosfere navadnega trsta in s tem na vitalnost korenin (Urbanc-Berčič in Gaberščik, 2001).

Rezultati analiz medsebojne povezanosti med hidrološkimi razmerami mokrišča in proizvodnimi lastnostmi trsta kažejo, da lahko ekohidrološki pristop zagotovi podlago za uspešno upravljanje mokrišč, kjer prevladuje trst.

Zaključek

Primarna proizvodnja je parameter, ki odraža vitalnost rastlinskih združb. Na presihajočem Cerkniškem jezeru je primarna proizvodnja razmeroma velika v primerjavi s stalnimi jezери, saj je pokritost z vegetacijo skoraj 100 %. Navadni trst pomembno prispeva k nadzemni biomas. Njegova nadzemna biomasa je primerljiva z nadzemno biomaso severnejših trstišč z razmeroma majhno primarno proizvodnjo. Primerjava primarne proizvodnje nadzemne biomase obrežnih in jezerskih sestojev na Cerkniškem jezeru je pokazala, da imajo sestoji trsta na ožjem območju jezera v povprečju za več kot polovico manjšo primarno proizvodnjo kot obrežni sestoji. S sledenjem sezonske dinamike prirasta biomase in razmer v okolju lahko prepoznamo ugodne in

omejitvene dejavnike v času razvoja trsta. V letu 2002 sta se tako jezerski kot tudi obrežni sestoj razvijala postopno, vendar se je biomasa in višina trsta med sestojema močno razlikovala, kar je bila posledica spreminjanja vodostaja. Dinamiko rasti navadnega trsta lahko spremljamo tudi z uporabo tehnik daljinskega zaznavanja. Vrednosti NDVI se hkrati z razvojem rastlin večajo, kar omogoča spremljanje rasti. V rastni sezoni 2021 je bil jezerski sestoj dlje časa zalit v primerjavi z obrežnim sestojem. Zaradi daljše zalitosti je rastna krivulja jezerskega sestoja zamaknjena, kar nakazuje na to, da se vegetacijska sezona obrežnega trstišča začne prej. Raziskave povezanosti med mesečnimi vodostaji, temperaturo in produktivnostjo so pokazale, da je jezerski sestoj posebej občutljiv na visoko raven vode na začetku in na koncu rastne sezone in da je v manjši meri odvisen od temperatur, medtem ko je obrežni trst, ki ima vseskozi nemoteno preskrbo z vodo, v večji meri odvisen od temperature. Ugodne temperature skupaj z zadostno količino vode so pomembne predvsem ob koncu rastne sezone, ko se v koreninah kopičijo zaloge. Rezultati analize vpliva skrajnih vodostajev na oba sestoja so pokazali, da visoki vodostaji predstavljajo težavo za jezerski sestoj predvsem v zadnjem četrtletju preteklega leta, za obrežni sestoj pa v prvem četrtletju tekočega leta. Skrajno nizki vodostaji so bolj vplivali na proizvodne parametre jezerskega trsta v primerjavi z obrežnim trstom, medtem ko je bil vpliv na lastnosti poganjkov večji v obrežnem sestoju. Rezultati analiz medsebojne povezanosti med hidrološkimi razmerami mokrišča in proizvodnimi lastnostmi trsta kažejo, da lahko ekohidrološki pristop zagotovi podlago za uspešno upravljanje mokrišč, kjer prevladuje navadni trst.

Summary

Primary production – the basis of ecosystem functioning

Most of the Earth's primary production is based on solar energy stored in the organic matter produced by photosynthesis. A smaller part is based on chemosynthesis, carried out by some microorganisms. All the energy taken up by primary producers represents gross primary production. Part of the energy is used by plants (or microorganisms) for their maintenance, and the remainder is net primary production. The products of photosynthesis are carbohydrates, which are the universal substrate for organisms, oxygen, which is a biological oxidant that enables respiration, and chemically bound energy, which is the source of energy for other organisms. Primary production is usually expressed as mass of organic matter or carbon mass produced. The primary production of the intermittent Lake Cerknica is relatively high compared to permanent lakes, while it is rather low compared to some other wetlands. The contribution of phytoplankton to this primary production is relatively low and variable. Macroalgae, such as filamentous algae and stoneworts, may have a higher contribution. Especially the latter can form extensive stands in the area of Rešeto and Zadnji kraj in years with high water levels, while in the drier years their biomass production is low. Global changes significantly affect hydrological conditions in wetlands. In the intermittent Lake Cerknica, disturbances due to water level fluctuations have always been a major factor affecting the structure and functioning of the ecosystem, including primary production. Nowadays, changes in water levels are becoming more extreme. Therefore, we used common reed (*Phragmites australis*) as model species to investigate how these changes affect the production of the species. We compared two reed stands, a riparian stand thriving in the vicinity of the Stržen riverbed, where water is mostly present throughout the whole year, and a lake stand, where water level changes are more extensive.

The estimated aboveground biomass of common reed in Lake Cerknica is similar to that of reeds from northern wetlands. Values measured at different locations and in different years were

very variable, ranging from 54 to 1605 g/m². The comparison between the primary production of the riparian and lake stands showed that the productivity of these stands is very different. On average, primary production of riparian stands is twice as high as that of the lake stands. This is due to the permanent availability of water (due to the proximity of the watercourse) for the riparian stands and extreme water level fluctuations in the lake area. The rhizome biomass in autumn is crucial for the rapid growth and development of common reed in spring, as data from literature show that a larger basal diameter of young shoots is associated with a larger rhizome biomass. Shoots with a larger basal diameter are more likely to resist disturbances and develop leaves above the water surface when water level is high. In Lake Cerknica, reed development starts relatively late, at the beginning of May, and depends on water level in the second quartile of the year. Under favourable conditions, plants can remain active well into late autumn, over by October, unless the season is shortened by late summer flooding. This activity supports the accumulation of assimilates in the rhizomes, which creates the basis for reed growth in the next vegetative period.

The analysis of the relationship between monthly water levels and productivity in the years 1986, 1987, 1997, and from 2002 to 2015 in the lake and riparian stands confirmed the importance of water levels in autumn of the previous growing season and in spring, especially at the lake site. Reeds at the lake area, which are exposed to pronounced droughts and floods, were particularly sensitive to high water levels at the beginning and at the end of the growing season and to a lesser extent to temperature, whereas the characteristics of the riparian reeds, which have permanent water supply throughout the growing season, were more temperature-dependent. Reeds display a conservative way of how they use photosynthetic products, and, under favourable conditions, they can remain photosynthetically active for a long time in autumn, accumulating reserves in underground organs.

For the period from 2007 to 2019, different reed parameters were related to mean monthly water levels and air temperatures for the two stands. Stronger and more numerous mostly negative correlations were found in the case of lake reed stand. Water level in December and January was negatively related with the number of internodes, as water level fluctuations represent a physical force that can break dead reed stems that serve to passively aerate the root system at higher water levels. It can have negative consequences for reed development in spring if the water levels are high. Lake reed is often subjected to prolonged dry periods and responds by reducing leaf area and increasing water use efficiency.

In 2023 the analysis of the effects of extreme and maximum and minimum water levels and temperatures on the measured productivity parameters was performed. For this purpose, one year was divided into four quartiles. For each sample, extreme temperatures and water levels from the fourth quartile of the previous year, which could have influenced the accumulation of reserves in the roots of the reed, and the periods of the first (period of inactivity), second (period of vegetative growth), and third quartiles (period of development of reproductive organs) of the current year were considered. High water level variables explained 60% of the variance of the productivity parameters of the lake stand and 21% of the variance of the productivity parameters of the riparian stand. Low water level parameters explained 51 and 24% of the variance, respectively. Temperature extremes explained a small proportion of the variance.

When we considered only the duration and frequency of extreme water events, the analyses of the two stands revealed that high water levels present a problem for the lake stand mainly in the last quartile of the previous year, while for the riparian stand, they are problematic in

the first quartile of the current year. Extremely low water levels also had a greater impact on the parameters of the lake stand compared to the riparian stand, while the impact on shoot characteristics was greater in the riparian stand. Changes in water level, which are more pronounced in the lake stand, have a further negative effect on the plants, although reed can be well adapted to such conditions, as it thrives well in relatively deep water and is able to withstand water deficit. Despite this resilience, even small changes in the water regime exert an effect on primary production of the reed. Soil water content may also influence the form, concentration, and availability of nutrients in the pore water of the rhizosphere of common reed, and thus reed vitality.

The results of the analyses of the relationships between wetland hydrology and reed production characteristics suggest that an ecohydrological approach can provide the basis for successful management of reed-dominated wetlands.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212, preko financiranja mladih raziskovalcev 28500, 39096 in 55856 ter projekta eLTER – European Long-Term Ecosystem and Socio-Ecological Research Infrastructure, ki ga financira Evropska komisija.

Viri

- Afreen, F., Zobayed, S., Armstrong, J., Armstrong, W. 2007. Pressure gradients along whole culms and leaf sheaths, and other aspects of humidity-induced gas transport in *Phragmites australis*. *Journal of Experimental Botany*, 58(7), 1651–1662. <https://doi.org/10.1093/jxb/erm017>
- Armstrong, J., Armstrong, W. 1990. Light-enhanced convective throughflow increases oxygenation in rhizomes and rhizosphere of *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *New Phytologist*, 114(1), 121–128. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1990.tb00382.x>
- Asaeda, T., Baniya, M. B., Rashid, M. H. 2011. Effect of floods on the growth of *Phragmites japonica* on the sediment bar of regulated rivers: a modelling approach. *International Journal of River Basin Management*, 9(3–4), 211–220. <https://doi.org/10.1080/15715124.2011.613837>
- Asaeda, T., Manatunge, J., Roberts, J., Hai, D. N. 2006. Seasonal dynamics of resource translocation between the aboveground organs and age-specific rhizome segments of *Phragmites australis*. *Environmental and Experimental Botany*, 57(1–2), 9–18. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2005.03.006>
- Brix, H., Sorrell, B. K., Lorenzen, B. 2001. Are *Phragmites*-dominated wetlands a net source or net sink of greenhouse gases? *Aquatic Botany*, 69(2–4), 313–324. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00145-0](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00145-0)
- Chapin, F. S., Matson, P. A., Vitousek, P. M. 2012. *Principles of Terrestrial Ecosystem Ecology* (2nd edition). Springer Science+Business Media. 529 str.
- Chávez, R. O., Clevers, J. G. P. W., Decuyper, M., de Bruin, S., Herold, M. 2016. 50 years of water extraction in the Pampa del Tamarugal basin: Can *Prosopis tamarugo* trees survive in the hyper-arid Atacama Desert (Northern Chile)? *Journal of Arid Environments*, 124, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.09.007>
- Cronk, J. K., Fennessy, M. S. 2001. *Wetland Plants* (1st edition). Boca Raton. CRC Press. 482 str. <https://doi.org/10.1201/9781420032925>

- Čuda, J., Skálová, H., Meyerson, L. A., Pyšek, P. 2021. Regeneration of *Phragmites australis* from rhizome and culm fragments. *Preslia*, 93(3), 237–254. <https://doi.org/10.23855/preslia.2021.237>
- Dolinar, N. 2013. Primarna proizvodnja, razgradnja in glivna kolonizacija izbranih rastlinskih vrst na presihajočem Cerkniškem jezeru: doktorska disertacija [Doctoral dissertation]. Ljubljana. Univerza v Ljubljani. Biotehniška fakulteta. 102 str.
- Dolinar, N., Gaberščik, A. 2010. Mycorrhizal colonization and growth of *Phragmites australis* in an intermittent wetland. *Aquatic Botany*, 93(2), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2010.03.012>
- Dolinar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>
- Dolinar, N., Rudolf, M., Šraj, N., Gaberščik, A. 2010a. Environmental changes affect ecosystem services of the intermittent Lake Cerknica. *Ecological Complexity*, 7(3), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.09.004>
- Dolinar, N., Šraj, N., Pongrac, P., Regvar, M., Gaberščik, A. 2010b. The Presence of Mycorrhiza in Different Habitats of an Intermittent Aquatic Ecosystem. V *Water and Nutrient Management in Natural and Constructed Wetlands* (pp. 299–308). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-90-481-9585-5_22
- Dong, X., Peng, B., Sieckenius, S., Raman, R., Conley, M. M., Leskovar, D. I. 2021. Leaf water potential of field crops estimated using NDVI in ground-based remote sensing—opportunities to increase prediction precision. *PeerJ*, 9, e12005. <https://doi.org/10.7717/peerj.12005>
- Gaberščik, A., Grašič, M., Abram, D., Zelnik, I. 2020. Water level fluctuations and air temperatures affect common reed habitus and productivity in an intermittent wetland ecosystem. *Water (Switzerland)*, 12(10). <https://doi.org/10.3390/w12102806>
- Gaberščik-Kopušar, A., Martinčič, A. 1982. Produktivnost vrste *Phragmites australis* Trin. na Blejskem jezeru. *Biološki Vestnik*, 30(1), 25–44.
- Gaberščik, A., Krek, J. L., Zelnik, I. 2018. Habitat diversity along a hydrological gradient in a complex wetland result in high plant species diversity. *Ecological Engineering*, 118, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.017>
- Gaberščik, A., Urbanc-Berčič, O., Kržič, N., Kosi, G., Brancelj, A. 2003. The intermittent Lake Cerknica: Various faces of the same ecosystem. *Lakes & Reservoirs: Science, Policy and Management for Sustainable Use*, 8(3–4), 159–168. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1770.2003.00228.x>
- Haslam, S. M. 1970. The development of the annual population in *Phragmites communis* Trin. *Annals of Botany*, 34, 571–591.
- Hellings, S. E., Gallagher, J. L. 1992. The effects of salinity and flooding on *Phragmites australis*. *The Journal of Applied Ecology*, 29(1), 41. <https://doi.org/10.2307/2404345>
- Howard, R. J. 2010. Intraspecific variation in growth of marsh macrophytes in response to salinity and soil type: Implications for Wetland Restoration. *Estuaries and Coasts*, 33(1), 127–138. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9227-z>
- Hudon, C., Gagnon, P., Jean, M. 2005. Hydrological factors controlling the spread of common reed (*Phragmites australis*) in the St. Lawrence River (Québec, Canada). *Écoscience*, 12(3), 347–357. <https://doi.org/10.2980/i1195-6860-12-3-347.1>
- Kosi, G. 2002. Alge v jezeru in njegovih pritokih. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 66–72). Ljubljana, Društvo biologov Slovenije.
- Kranjc, A. 2002. Hidrološke značilnosti. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 27–37). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenija.

- Kumar, L., Mutanga, O. 2017. Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9), 935. <https://doi.org/10.3390/rs9090935>
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th edition). Berlin. Springer. 514 str.
- Li, L., Han, W., Thevs, N., Jia, X., Ji, C., Jin, D., He, P., Schmitt, A. O., Cirella, G. T., Zerbe, S. 2014. A comparison of the functional traits of common reed (*Phragmites australis*) in northern China: Aquatic vs. terrestrial ecotypes. *PLoS ONE*, 9(2), e89063. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089063>
- McCormick, M. K., Kettenring, K. M., Baron, H. M., Whigham, D. F. 2010. Extent and reproductive mechanisms of *Phragmites australis* spread in brackish wetlands in Chesapeake Bay, Maryland (USA). *Wetlands*, 30(1), 67–74. <https://doi.org/10.1007/s13157-009-0007-0>
- Mitsch, W. J., Gosselink, J. G. 2015. *Wetlands* (5th edition). New York. Wiley. 747 str.
- Mook, J. H., van der Toorn, J. 1985. Delayed response of common reed *Phragmites australis* to herbivory as a cause of cyclic fluctuations in the density of the moth *Archanara geminipuncta*. *Oikos*, 44(1), 142. <https://doi.org/10.2307/3544055>
- Odum, E. P. 1971. *Fundamentals of Ecology* (3rd edition). Philadelphia. W.B. Saunders Co. 574 str.
- Odum, E. P., Barrett, G. W. 2005. *Fundamentals of Ecology* (5th edition). Belmont, CA. Thomson Brooks/Cole. 598 str.
- Ojdanič, N., Holcar, M., Golob, A., Gaberščik, A. 2023a. Environmental extremes affect productivity and habitus of common reed in intermittent wetland. *Ecological Engineering*, 189, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106911>
- Ojdanič, N., Zelnik, I., Holcar, M., Gaberščik, A., Golob, A. 2023b. Contrasting dynamics of littoral and riparian reed stands within a wetland complex of Lake Cerknica. *Plants*, 12(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/plants12051006>
- Pagter, M., Bragato, C., Brix, H. 2005. Tolerance and physiological responses of *Phragmites australis* to water deficit. *Aquatic Botany*, 81(4), 285–299. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.01.002>
- Pan, Z., Huang, J., Zhou, Q., Wang, L., Cheng, Y., Zhang, H., Blackburn, G. A., Yan, J., Liu, J. 2015. Mapping crop phenology using NDVI time-series derived from HJ-1 A/B data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 34, 188–197. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.08.011>
- Rudolf, M. 2008. Vpliv presihanja na aktivnost in primarno produkcijo vrst *Phragmites australis* in *Carex elata* na Cerkniškem jezeru [Master of science thesis]. Ljubljana. Univerza v Ljubljani. Biotehniška fakulteta. 86 str.
- Santin-Janin, H., Garel, M., Chapuis, J.-L., Pontier, D. 2009. Assessing the performance of NDVI as a proxy for plant biomass using non-linear models: a case study on the Kerguelen archipelago. *Polar Biology*, 32(6), 861–871. <https://doi.org/10.1007/s00300-009-0586-5>
- Schmieder, K., Dienst, M., Ostendorp, W., Jöhnk, K. 2004. Effects of water level variations on the dynamics of the reed belts of Lake Constance. *International Journal of Ecohydrology & Hydrobiology*, 4, 469–480.
- Smith, R. Geoff. B., Brock, M. A. 2006. The ups and downs of life on the edge: the influence of water level fluctuations on biomass allocation in two contrasting aquatic plants. *Plant Ecology*, 188(1), 103–116. <https://doi.org/10.1007/s11258-006-9151-2>
- Thevs, N., Zerbe, S., Gahlert, F., Mijit, M., Succow, M. 2007. Productivity of reed (*Phragmites australis* Trin. ex Steud.) in continental-arid NW China in relation to soil, groundwater, and land-use. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, 81, 62–68.
- Tóth, V. R. 2018. Monitoring spatial variability and temporal dynamics of *Phragmites* using unmanned aerial vehicles. *Frontiers in Plant Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fpls.2018.00728>

- Urbanc-Berčič, O., Gaberščik, A. 2001. The influence of water table fluctuations on nutrient dynamics in the rhizosphere of common reed (*Phragmites australis*). *Water Science and Technology*, 44(11–12), 245–250. <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0836>
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Olano, J. M., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Tomás-Burguera, M., Gazol, A., Azorin-Molina, C., Bhuyan, U., El Kenawy, A. 2016. Diverse relationships between forest growth and the normalized difference vegetation index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.001>
- Vretare, V., Weisner, S. E. B., Strand, J. A., Granéli, W. 2001. Phenotypic plasticity in *Phragmites australis* as a functional response to water depth. *Aquatic Botany*, 69(2–4), 127–145. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(01\)00134-6](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(01)00134-6)
- White, S. D., Ganf, G. G. 2002. A comparison of the morphology, gas space anatomy and potential for internal aeration in *Phragmites australis* under variable and static water regimes. *Aquatic Botany* 73(2), 115–127. [https://dx.doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00010-4](https://dx.doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00010-4)
- Yan, J., Zhang, G., Ling, H., Han, F. 2022. Comparison of time-integrated NDVI and annual maximum NDVI for assessing grassland dynamics. *Ecological Indicators*, 136, 108611. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.108611>
- Zohary, T., Ostrovsky, I. 2011. Ecological impacts of excessive water level fluctuations in stratified freshwater lakes. *Inland Waters*, 1(1), 47–59. <https://doi.org/10.5268/IW-1.1.406>

Glivna kolonizacija korenin različnih rastlinskih vrst

Nataša Dolinar, Nina Šraj, Paula Pongrac, Marjana Regvar, Alenka Gaberščik

Uvod

Večina rastlinskih vrst ima glivne simbionte, ki vplivajo na sposobnost preživetja in evolucijo rastlin (Rodriguez in sod., 2009), kar je posebno pomembno v stresnih razmerah. V preteklosti glivni kolonizaciji rastlin v mokriščih niso pripisovali posebnega pomena, v nekaterih mokriščih je celo niso opazili (Thormann in sod., 1999) ali pa so označili nekatere mokriščne vrste, npr. iz rodu šašev, kot nemikorizne (Muthukumar in sod., 2004). Danes vemo, da so rastline v mokriščih kolonizirane tako z glivnimi endofiti (Weishampel in Bedford, 2006) kot tudi z arbuskularno-mikoriznimi glivami (angl. *arbuscular mycorrhizal fungi* – AMF) (Bohrer in sod., 2004; Dolinar in sod., 2016; Ipsilantis in Sylvia, 2007; Šraj-Kržič in sod., 2006), čeprav se večina raziskovalcev osredotoča na arbuskularno mikorizo (AM). Prvotne rastlinske vrste so se ob prehodu na kopno morale soočiti z rednim izsuševanjem, pomanjkanjem hranil in intenzivnim UV sevanjem. Vzajemne povezave med AMF in jetrnjaki, so predstavljale pomembno prednost pri prehodu rastlinskih prednikov na kopno (Rich in sod., 2021). Na Cerkniškem jezeru, kjer so razmere za rastline pogosto nepredvidljive, so potekale raziskave kolonizacije korenin različnih rastlinskih vrst z AMF in glivnimi endofiti (s temnimi-septiranimi endofiti; angl. *dark septate endophytes* – DSE) (Dolinar in sod., 2016; Šraj-Kržič in sod., 2006; Vengust in Gaberščik, 2018).

Endofiti so glive, ki naseljujejo rastline, ne da bi povzročali kakršnekoli vidne simptome obolevnosti (Brundrett, 2006). Najdemo jih v nadzemnih in podzemnih delih rastlin. V koreninah so najštevilnejši, saj so korenine ponor ogljika, zagotavljajo hranila tako rastlini kot simbiotom in so v tesnem stiku z okoljem, ki je poseljeno z najrazličnejšimi mikroorganizmi (Schulz, 2006). Pozitivni vplivi glivnih endofitov na rastline so različni: (1) inducirajo proizvodnjo obrambnih metabolitov proti patogenom (Friesen in sod., 2011; Wang in sod., 2022), (2) izločajo rastlinske hormone (Chen in sod., 2010), (3) mobilizirajo hranila iz rizosfere (območja, ki obdaja rastlinske korenine, kjer poteka interakcija med koreninami in talnimi mikroorganizmi) (Mandyam in sod., 2012) in (4) vplivajo na metabolizem rastline (Liu in sod., 2022) in mikoriznih gliv (Scervino in sod., 2009). Vse to lahko vodi v povečano odpornost na bolezni (Lou in sod., 2011), izboljšano rast rastline (Ernst in sod., 2003) ali povečano toleranco na abiotične strese (Khidir in sod., 2010). Med endofiti imajo pomembno vlogo DSE, filogenetsko nepovezana skupina askomicet, ki jih prepoznamo po debelih, temnih, septiranih inter- in intracelularnih hifah in mikrosklerocijih (MS) (Rodriguez in sod., 2009). MS so skupki okroglih celic z debelo steno, ki imajo vlogo zaščitnega organa ali vegetativnega razmnoževanja (Mandyam in Jumpponen, 2005; 2008). DSE se pojavljajo v koreninah in lahko podobno kot mikorizne glive, tvorijo mrežo hif v rizosferi, kar izboljša rastlinam dostop do vode in hranil (Liu in Wei, 2019). Z rastlinami tvorijo mutualistične povezave in niso patogeni, saj so bili vedno opaženi na zdravih koreninskih laskih. Pripisujejo jim zaščitno vlogo v stresnih razmerah (Jumpponen, 2001; Rodriguez in sod., 2009), zato so pogosti v skrajnih okoljih. Hife gliv DSE proizvajajo melanin v celičnih stenah, ki povečuje njihovo trdnost, povečuje odpornost rastlin na patogene in ščiti korenine pred dehidracijo (Jumpponen, 2001). Nedavno je bilo dokazano, da melanin z vezavo toksičnih kovin na hidroksilne skupine ščiti celovitost glivnih celičnih sten (Potisek in sod., 2021). DSE imajo manjše potrebe po rastlinskem ogljiku v primerjavi z mikoriznimi glivami, zaradi česar so manj obremenjujoči za gostiteljsko rastlino, ki raste v neugodnih okoljskih razmerah (Malicka in sod., 2022). Vse te prednosti

pa so ključnega pomena v stresnih razmerah presihajočih habitatov na Cerkniškem jezeru. Pri rastlinah v vodnem okolju o DSE poročajo le redki avtorji (npr. Miller in Bever, 1999; Dolinar in sod., 2016), zato izsledki raziskav na Cerkniškem jezeru prinašajo številne novosti. Kljub mnogim koristnim učinkom DSE pa njihove prisotnosti v koreninah večina raziskovalcev še ne prišteva med mikorizne vzajemne povezave.

AMF so predstavnice debela gliv Glomeromycota, ki so v simbiozi z več kot 90 % kopenskih rastlinskih vrst (Glick, 2020). Od endofitskih gliv se razlikujejo po treh poglavitnih lastnostih: (1) AMF tvorijo kratkožive razrasle strukture arbuskule, ki močno povečajo površino izmenjave med glivo in rastlino in tako omogočijo večjo učinkovitost izmenjave virov, (2) njihov razvoj je usklajen z razvojem rastline, ter (3) tako glivni kot tudi rastlinski partner imata prednosti zaradi izmenjave hranil (Brundrett, 2006). Mikorizne glive z obsežnim zunajkoreninskim micelijem vplivajo na vitalnost rastlin tako, da pozitivno vplivajo na kroženje makrohranil, saj mobilizirajo fosfor in dušik ter so pomemben ponor ogljika v tleh (Bonfante in Genre, 2010; Johnson in sod., 2015), obenem pa ščitijo rastlino pred mehanskimi vplivi in strupenimi kovinami (Pongrac in sod., 2007; Parniske, 2008). Ena najpomembnejših vlog AMF je povečana preskrba rastlin s fosforjem. Odzivi močvirskih rastlin kažejo, da imajo veliko koristi od AMF, tudi v poplavnih razmerah (Ramírez-Viga in sod., 2018). V mokriščih je dostopnost hranil, še posebej pa fosforja, odvisna od spleta številnih dejavnikov, ki lahko prikrijejo neposredne koristi simbioze z AMF. V kopenskih ekosistemih je kolonizacija z AMF pogosto manjša v tleh, kjer je na voljo obilo fosforja, kar so potrdile tudi raziskave na mokriščnih rastlinah (Stevens in Peterson, 1996). Povezava med fosforjem in kolonizacijo z AMF je celovitejša v anoksičnih tleh in mokriščih s spreminjajočo se ravni vode, saj prihaja do sprememb v mobilnosti in topnosti fosforja (Baldwin in sod., 2000). Na preskrbo s fosforjem vpliva tudi časovna usklajenost med potrebami rastlin po fosforju s količino fosforja v tleh, še posebej, če so v mokrišču zelo velike ali majhne koncentracije fosforja (Carvalho in sod., 2001). Mikorizne glive ugodno vplivajo tudi na razgradnjo saj lahko dušik privzemajo neposredno iz organskih snovi (Hodge in sod., 2001). Mnoge mokriščne rastline se na pomanjkanje kisika odzovejo z razvojem specializiranega prezračevalnega tkiva (aerenhima), skozi katerega prehaja kisik od poganjkov h koreninam. Prezračevalno tkivo omogoča prezračevanje korenin in njihove neposredne okolice (Björn in sod., 2022) in tako vpliva na dostopnost hranil ter izboljša razmere za rast in razvoj gliv. Glive lahko preživijo tudi v anoksičnih razmerah, v primeru če potrebujejo manj kisika ali če so zgoščene ob koreninah, od koder neposredno ali z difuzijo dobijo kisik (Miller in Bever, 1999).

Obseg kolonizacije z AMF je v obratnem sorazmerju z globino vode ali trajanjem poplav (Stevens in Peterson, 1996; Mendoza in sod., 2005; Dolinar in Gaberščik, 2010; Dolinar in sod., 2016). Število spor AMF se v poplavljenih tleh navadno ne zmanjša (Miller in Sharitz, 2000). Vpliv poplav je odvisen od stopnje kolonizacije pred poplavljanjem. V primeru, da je kolonizacija v koreninah pred poplavlami vzpostavljena, se glive lahko tudi ob poplavljanju ohranijo in širijo z rastočim koreninskim sistemom (Neto in sod., 2006). Potencial za kolonizacijo lahko naraste zaradi obsežnega zračnega tkiva v koreninah, ki omogoča oskrbo rizosfere s kisikom (Voesenek in sod., 2006), pa tudi zaradi prezračevanja tal zaradi presahnitve. Obseg struktur AMF pa se lahko zmanjša zaradi velikih vsebnosti fosforja ali velikega deleža organske snovi v tleh (Wigand in sod., 1998). Dostopnost kisika vpliva na morfologijo in gostoto posameznih struktur. Ipsilantis in Sylvia (2007) sta opazila zmanjšanje pogostosti svitkov, arbuskulov in veziklov zaradi poplavljanja pri vrsti *Panicum hemitomon* L., pri vrsti navadnem rogozu (*Typha latifolia* L.) pa so strukture AMF praktično izginile. Rod *Typha* je z obsežnim zračnim tkivom zelo učinkovit pri prezračevanju rizosfere, kar omogoča glivno kolonizacijo tudi pri vodnih primerkih, pri čemer naj bi večji zračni prostori omogočali razvoj arbuskulov in manjši razvoj svitkov (Nielsen in sod., 2004).

Presihanje na Cerkniškem jezeru omogoča učinkovito prezračevanje koreninskega sistema, kar ustvarja ugodnejše razmere tudi za epifitske in mikorizne glive.

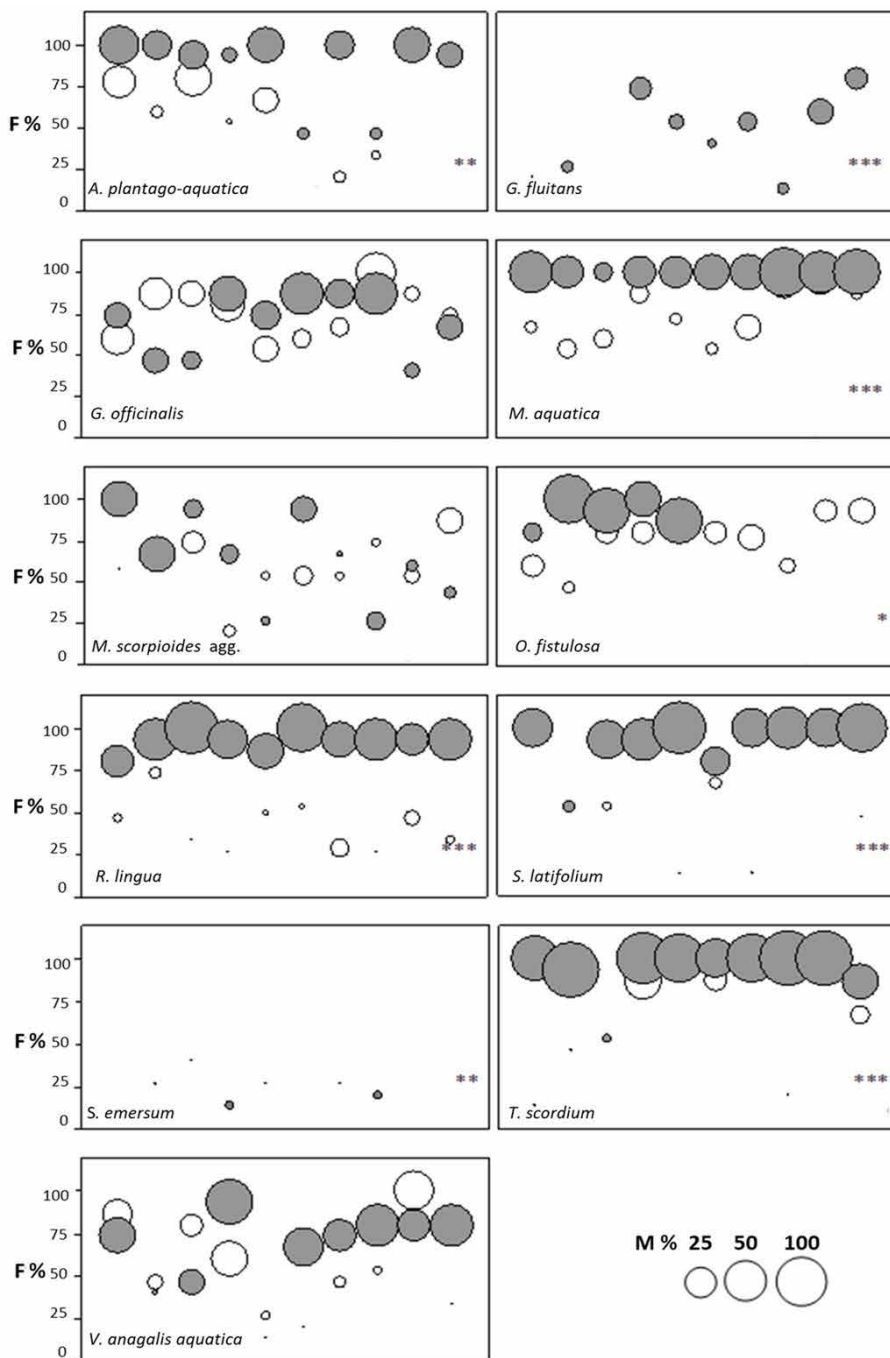
Rastline na Cerkniškem jezeru so zaradi sprememb vodostaja stalno izpostavljene motnjam, ki lahko poškodujejo prisotno vegetacijo (Dolinar in sod., 2016). Za novo naselitev motenega območja z rastlinami so potrebne učinkovite strategije rastlin. Asmelash in sod. (2016) so pokazali, da imajo AMF pomembno vlogo pri sukcesiji rastlinskih združb, saj povečujejo nadzemno in podzemno biotsko raznovrstnost, čeprav je njihov vpliv na primarno produktivnost lahko zanemarljiv. Spremembe vodne gladine vplivajo tudi na stopnjo mineralizacije in sproščanje hranil, kar so pokazale različne študije (Boulton in Brock, 1999). Tako je tudi na Cerkniškem jezeru, kjer je dostopnost hranil v sušnem obdobju majhna, medtem ko se v času poplavljenosti poveča (Urbanc-Berčič in Gaberščik, 2004). Medsebojni vpliv med razpoložljivostjo vode in hranil je zato lahko ključen pri vzpostavitvi simbioze z AMF pri nekaterih rastlinskih vrstah (Cornwell in sod., 2001).

Cerkniško jezero z vidika glivne kolonizacije predstavlja modelni sistem za proučevanje vpliva sprememb količine vode na rastišču. Posebno zanimive so amfibijske rastline, ki lahko uspevajo v vodi in na kopnem. V letih 2005 in 2006 so potekale raziskave prisotnosti AMF in DSE pri kopenskih in vodnih primerkih amfibijskih vrst trpotčasti porečnik (*Alisma plantago-aquatica* L.), vodna meta (*Mentha aquatica* L.), močvirska spominčica (*Myosotis scorpioides* (L.) agg.), plavajoča sladika (*Glyceria fluitans* (L.) R.Br.), navadna božja milost (*Gratiola officinalis* L.), velika zlatica (*Ranunculus lingua* L.) česnov vrednik (*Teucrium scordium* L.), širokolistna koščica (*Sium latifolium* L.), navadni sovec (*Oenanthe fistulosa* L.), enostavni ježek (*Sparganium emersum* Rehmann) in vodni jetičnik (*Veronica anagallis-aquatica* L.) nabranih na območju Rešeta in v pritokih jezera (Kržič, 2007). V letih 2008 in 2009 pa so bile izvedene raziskave glivne kolonizacije korenin rastlinskih vrst na hidrološkem gradientu jezera (Dolinar, 2013). Raziskave so vključevale kolonizacijo korenin navadnega trsta (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) (tako z AM, kot tudi z DSE) skozi rastno sezono, na lokacijah Dujice, Gorenje Jezero in Zadnji kraj, ter sezonske spremembe v glivni kolonizaciji pisane čužke (*Phalaris arundinacea* L.), na območju Rešeta. Izvedena je bila tudi raziskava glivne kolonizacije dveh vrst sitovca, rjastega sitovca (*Schoenus ferrugineus* L.) z Dujic in črnkastega sitovca (*S. nigricans* L.) nabranega na območju Rešeta, togega šaša (*Carex elata* All.) v Zadnjem kraju ter močvirskega grinta (*Senecio paludosus* L.), visokega trpotca (*Plantago altissima* L.) in velikega poletnega zvončka (*Leucorum aestivum* L.) z območja Rešeta (Dolinar, 2013). Ocena stopnje glivne kolonizacije je potekala po metodi, kot so jo opisali Trouvelot in sod. (1986) in je vključevala spremljanje prisotnosti struktur AMF (hif, arbuskulov, veziklov in svitkov) in struktur DSE (hif in MS).

Glivna kolonizacija korenin pri amfibijskih rastlinah

Kolonizacija korenin s strukturami AMF je bila ugotovljena pri vseh preiskovanih vrstah amfibijskih rastlin (Šraj-Kržič in sod., 2006). Raziskave na Cerkniškem jezeru so prvo poročilo o AM za širokolistno koščico in enostavni ježek. Pri potopljenih primerkih proučevanih rastlinskih vrst je bil opažen manjši obseg kolonizacije z AMF v primerjavi s kopenskimi primerki (slika 1), kar je v skladu ugotovitvami o zmanjšanju kolonizacije z AMF z globino vode ali trajanjem poplav zaradi pomanjkanja kisika (Stevens in Peterson, 1996; Miller, 2000). Med potopitvijo rastline oskrbujejo rizosfero in tako tudi AMF s kisikom preko aerenhima (Voesenek in sod., 2006). Ker so razmere, ki spodbujajo nastanek aerenhima (zalitje habitata in s tem pomanjkanje kisika) tudi razlog za zmanjšano kolonizacijo z AMF (Stevens in Peterson, 1996; Rascio, 2002), neposredne povezanosti med parametri AMF in aerenhimom večinoma ni. Tovrstna povezava je bila ugo-

tovljena le za veliko zlatico. Poleg poplav lahko na pojavljanje AMF vpliva tudi fenološka faza rastline (Bohrer in sod., 2004).

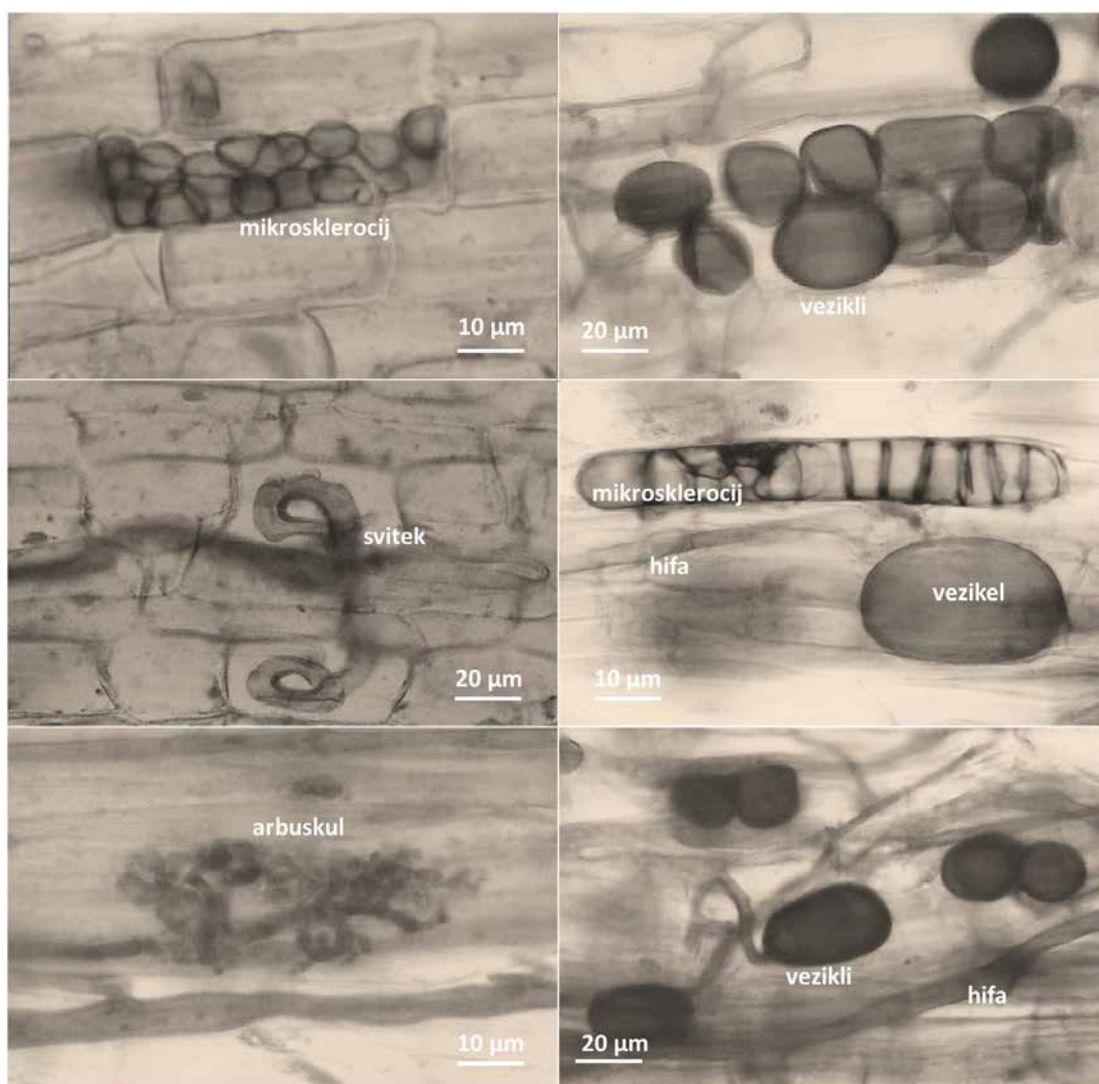


Slika 1: Mikorizna frekvenca (F %) pri posameznih vodnih (o) in kopenskih primerkih (●) amfibijskih rastlinskih vrst. Za latinsko poimenovanje vrst glej preglednico 1. Mikorizna intenziteta (M %). Zvezdice označujejo značilne razlike med vodno in kopensko obliko (* < 0,05; ** < 0,01; *** < 0,001) (povzeto po Kržič, 2007). Za celotna latinska in slovenska imena vrst glej preglednico 1.

Cornwell in sod. (2001) so poročali o večji kolonizaciji z AMF pri rastlinah z manjšim obsegom aerenhima, ki slabše prezračujejo rizosfero, kar pripisujejo manjši razpoložljivosti hranil. Pri am-

fibijskih rastlinah na Cerkniškem jezeru je bil delež zračnega tkiva v koreninah razmeroma velik (15–30 %), vendar variabilen (Kržič, 2007). V primeru omejene razpoložljivosti hranil (npr. pod vplivom anoksije) ali pomanjkanja hranil je proizvodnja antocianinov strategija rastlin za povečanje zaščite pred stresnimi dejavniki (Steyn in sod., 2002). Multivariatna analiza kaže, da so antocianini pomemben dejavnik, ki pojasnjuje pogostost mikorize, saj se v večjih koncentracijah pojavljajo pri vodnih primerkih rastlin (Gaberšček in sod., 2017).

AMF so tvorile arbuskule pri kopenskih primerkih vseh amfibijskih rastlin, le pri vodnih primerkih plavajoče vodne sladike, navadnega sovca, širokolistne koščice in enostavnega ježka arbuskulov ni bilo. Arbuskuli so edine strukture, s katerimi nedvoumno dokazujemo prisotnost AMF pri posamezni rastlinski vrsti (slika 2).



Slika 2: Glivne strukture temnih-septiranih endofitov in arbuskularno mikoriznih gliv v koreninah navadnega trsta (foto: Nataša Dolinar).

Vendar tudi njihova odsotnost v določenem letnem času še ne pomeni, da rastlina ni sposobna tvoriti tovrstne koristne vzajemne povezave z glivami. Gostota arbuskulov pri vodnih in kopenskih primerkih se je značilno razlikovala pri navadni božji milosti, navadnem sovcu, širokolistni

koščici in česnovem vredniku. Vezikli so bili prisotni pri vodnih in kopenskih primerkih vseh amfibijskih rastlin, z izjemo plavajoče sladike in enostavnega ježka, ki v času poplav nista bili kolonizirani. Pri trpotčastem porečniku, vodni meti, močvirski spominčici, navadnem sovcu, veliki zlatici, širokolistni koščici in česnovem vredniku je bila gostota veziklov pri kopenskih primerkih značilno večja od gostote pri vodnih (Kržič, 2007).

Tudi značilnosti rizosfernih tal vplivajo na pojavljanje AMF, saj AMF v hranilno revnih tleh povečujejo sprejem hranil (Smith in Read, 1997; Andersen in Andersen, 2006). Rizosferna tla proučevanih rastlin so imela delež organske snovi < 10 %. Mikorizna intenziteta je bila značilno večja v tleh z večjim deležem organske snovi, kar je v nasprotju z raziskavami v kopenskih ekosistemih. V organskih tleh se porablja kisik in narašča vsebnost fosforja, to pa naj bi zaviralo mikorizno kolonizacijo (Wigand in sod., 1998). Vsebnosti rastlinam dostopnega fosforja v rizosfernih tleh amfibijskih rastlin so bile majhne (< 5,3 mg/L), kar pojasnjuje prisotnost kolonizacije z AMF pri vseh amfibijskih vrstah (preglednica 1).

Preglednica 1: Delež organske snovi in vsebnost rastlinam dostopnega fosforja v rizosfernih tleh vodnih (V) in kopenskih primerkov (K) amfibijskih rastlinskih vrst trpotčasti porečnik (*Alisma plantago-aquatica*), plavajoča sladika (*Glyceria fluitans*), navadna božja milost (*Gratiola officinalis*), vodna meta (*Mentha aquatica*), močvirska spominčica (*Myosotis scorpioides* agg.), navadni sovec (*Oenanthe fistulosa*), velika zlatica (*Ranunculus lingua*), širokolistna koščica (*Sium latifolium*), enostavni ježek (*Sparganium emersum*), česnov vrednik (*Teucrium scordium*) in vodni jetičnik (*Veronica anagallis-aquatica* L.). Podatki so predstavljeni kot aritmetične sredine (avg) ± standardne deviacije (SD). Student t-test: nz, $p > 0,05$; * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$ (povzeto po Kržič, 2007).

Vrsta		Delež organske snovi (%)			Rastlinam dostopni P (mg/L)	
		avg ± SD	t-test		avg ± SD	t-test
trpotčasti porečnik	V	1,19 ± 0,35	nz	V	1,05 ± 0,11	nz
	K	0,69 ± 0,03		K	1,24 ± 0,16	
plavajoča sladika	V	0,45 ± 0,06	nz	V	1,48 ± 0,05	nz
	K	0,47 ± 0,09		K	1,91 ± 0,05	
navadna božja milost	V	4,66 ± 0,13	***	V	1,60 ± 0,02	***
	K	7,85 ± 0,28		K	2,05 ± 0,03	
vodna meta	V	2,63 ± 0,44	*	V	0,23 ± 0,09	*
	K	0,83 ± 0,07		K	1,32 ± 0,04	
močvirska spominčica	V	0,73 ± 0,33	nz	V	0,73 ± 0,05	nz
	K	1,03 ± 0,19		K	2,57 ± 0,29	
navadni sovec	V	2,64 ± 0,14	***	V	0,76 ± 0,07	*
	K	0,49 ± 0,06		K	1,19 ± 0,10	
velika zlatica	V	3,12 ± 0,15	***	V	1,20 ± 0,01	*
	K	6,67 ± 0,24		K	1,55 ± 0,06	
širokolistna koščica	V	1,44 ± 0,48	***	V	1,12 ± 0,08	**
	K	9,84 ± 0,50		K	5,28 ± 0,01	
enostavni ježek	V	2,43 ± 0,34	nz	V	1,46 ± 0,01	***
	K	2,20 ± 0,17		K	1,69 ± 0,01	
česnov vrednik	V	2,62 ± 0,29	***	V	0,86 ± 0,11	*
	K	6,32 ± 0,16		K	3,30 ± 0,04	
vodni jetičnik	V	1,05 ± 0,18	**	V	1,47 ± 0,06	nz
	K	2,00 ± 0,10		K	1,48 ± 0,04	

Koncentracije so bile nekoliko večje v rizosferi kopenskih primerkov, kar je posledica pospešene mineralizacije v vlažnih tleh. Ugotavljanje povezanosti kolonizacije z AMF z značilnostmi rizosfernih tal je potekalo s pomočjo dvosmernega Spearmanovega korelacijskega koeficienta. Mikorizna intenziteta (M %) je bila v značilni pozitivni povezavi z deležem organske snovi v rizosfernih tleh ($p = 0,343$, $p \leq 0,01$). Med mikorizno frekvenco (F %), gostoto arbuskulov (A %) ter veziklov (V %) in deležem organske snovi v tleh nismo določili značilnih povezav Kržič (2007). Kolonizacija z AMF je bila pri nekaterih vrstah v značilni povezavi s fotokemično učinkovitostjo PSII (Šraj-Kržič in sod., 2009), ki je pokazatelj vitalnosti rastline. AM najverjetneje predstavlja prednost za rastline presihajočih habitatov, saj povečuje učinkovitost sprejema hranil iz tal, kar je še posebej pomembno v času poplav. Vodni primerki amfibijskih rastlin praviloma nimajo sposobnosti sprejema hranil skozi listno površino, sprejem hranil iz tal pa je upočasnen, saj v vodi ni transpiracijskega toka (Rascio, 2002).

DSE oziroma njihove strukture, MS, so bile najdene pri vseh 11 vrstah amfibijskih rastlin (slika 2). Delež korenin, koloniziran z DSE, je bil za večino vrst majhen. Bolj pogosto so se pojavljali predvsem pri trpotčastem porečniku in pri vrstah manj koloniziranih AMF, kot sta enostavni ježek in plavajoča sladika. Raziskave o DSE pri rastlinah presihajočih habitatov na Cerkniškem jezeru so bile prve te vrste (Šraj-Kržič in sod., 2006).

Glivna kolonizacija korenin pri navadnem trstu in trstični pisanki

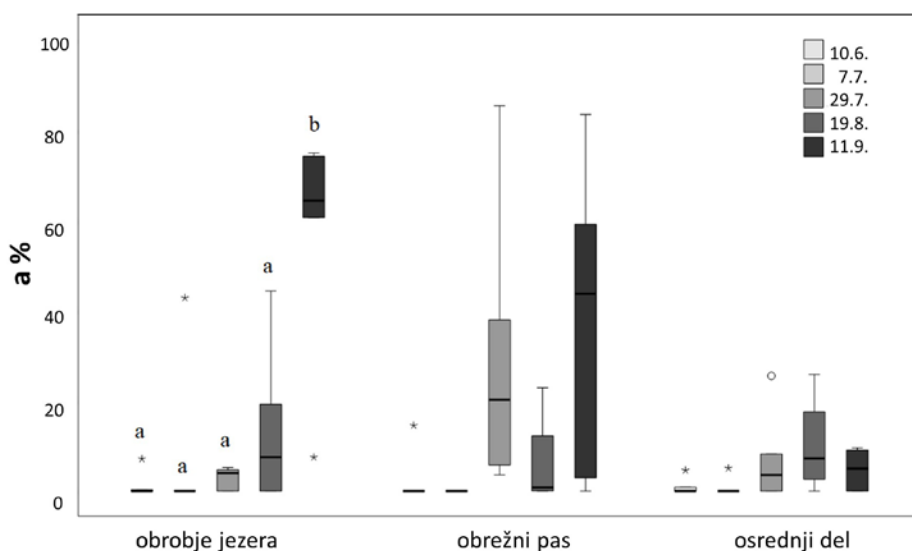
Glivna kolonizacija navadnega trsta je bila zabeležena v različnih rastiščih, razlike so bile le v stopnji kolonizacije in gostoti posameznih glivnih struktur. Glivna kolonizacija korenin pri navadnem trstu je bila na splošno zelo majhna, vendar so bile najdene različne strukture AMF (arbuskuli, vezikli in svitki) ter DSE strukture (MS) (Dolinar in sod., 2010; Dolinar, 2013). Prisotnost AMF v koreninah navadnega trsta so potrdili Cooke in Lefor (1998) in Oliveira in sod. (2001), čeprav v poplavljenih razmerah AM ni bila vedno prisotna (Wirsal, 2004). V koreninah navadnega trsta so prav tako opazili hife in strukture DSE (Wu in sod., 2009). Pri navadnem trstu so do sedaj našli več kot 300 glivnih taksonov, vendar je bolj pogostih navadno samo nekaj vrst (Neubert in sod., 2006).

Vpliv vodostaja na glivno kolonizacijo korenin navadnega trsta je bil podrobneje proučen z iskanjem značilnih povezav med glivno kolonizacijo trsta na Zadnjem kraju za leti 2008 in 2009 skupaj in povprečnim sedemdnevni vodostajem pred vzorčenjem (Dolinar, 2013). Rezultati so potrdili, da je ob dvigu vodostaja res prišlo do zmanjšanja glivne kolonizacije, vendar samo deleža koloniziranih korenin, pri gostoti arbuskulov in veziklov pa so bile vidne pozitivne linearne povezave. Ker so bile predvsem vrednosti pogostosti opaženih arbuskulov izrazito majhne, ni moč sklepati, da je v resnici prišlo do povečanja gostote arbuskulov zaradi poplavljanja. Večja gostota veziklov, ki so založne strukture (Bonfante in Genre, 2010) v primeru višjega vodostaja lahko kaže na spremenjeno dejavnost gliv kot prilagoditev na novo nastale razmere. Dosedanje raziskave, ki so proučevale vpliv vodostaja na prisotnost mikoriznih ali endofitskih gliv, so prav tako pogosto dale nasprotnoče si rezultate. Poplavljen tla imajo lahko za posledico manjšo stopnjo glivne kolonizacije (Stevens in sod., 2011), spremembo v tipu kolonizacije (Šraj-Kržič in sod., 2006) ali v vrstni sestavi (Wang in sod., 2011) v primerjavi z nepoplavljenimi tlemi, lahko pa do sprememb sploh ne pride (Bauer in sod., 2003). Prav tako ni pojasnjeno, ali poteka kolonizacija novih korenin v poplavljenih tleh, ali se ob zalitju tal z vodo samo ohrani, medtem, ko se je razvila v z suhih tleh (Miller in Sharitz, 2000). Rezultati glivne kolonizacije korenin navadnega

trsta s Cerkniškega jezera kažejo na to, da so glive bolj pogoste, kadar tla niso zalita z vodo, ob poplavljanju pa se v koreninskem sistemu ohranijo (Dolinar in sod., 2016).

Sezonska dinamika glivne kolonizacije je odvisna od hidroloških razmer in fenološke faze. Delež koloniziranih fragmentov (F %) je skozi rastno sezono 2008 je na obrobju jezera naraščal (Gaberšček in sod., 2017). V obrežnem pasu je bil F % pri prvem vzorčenju značilno večji od ostalih vzorčenj, podobno tudi v osrednjem delu jezera, vendar je tu pri zadnjem vzorčenju F % spet manjši. Tudi nekateri drugi parametri so proti koncu sezone večji kot na začetku, na primer gostota arbuskulov (slika 3) in svitkov (Dolinar, 2013). Kolonizacija trsta s strukturami DSE je bila velika na začetku in na koncu rastne sezone (Dolinar in Gaberšček, 2010).

Pri opaženih spremembah v glivni kolonizaciji skozi rastno sezono je težko opredeliti, katere spremembe so posledica sprememb vodostaja in katere drugih dejavnikov, predvsem fenoloških faz rastlinskega gostitelja (Koide, 1991). Strukture AMF so bile številčnejše pri rastlinah, ki so rasle na tleh z majhno vsebnostjo organske snovi in fosforja v osrednjem delu (Dolinar, 2013). Po drugi strani pa so imele korenine trsta, ki uspeva na organskih tleh (na obrobju), več MS.



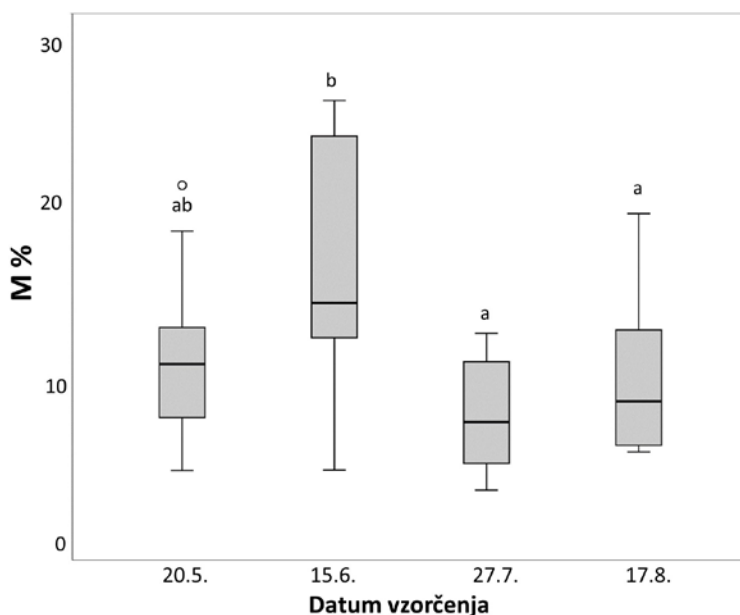
Slika 3: Gostota arbuskulov (a %) v delu fragmenta z glivno kolonizacijo pri navadnem trstu na vzorčnih mestih Dujice, Gorenje Jezero in Zadnji kraj v letu 2008. N = 5. Različne črke pri posameznih vzorčnih mestih označujejo statistično značilne razlike med datumi. ° prikazuje osamelce, * prikazuje ekstremne osamelce.

Če se strukture AMF razvijejo v sušnem obdobju, se ohranijo tudi ob poplavih zaradi zmožnosti navadnega trsta, da podzemnim organom zagotavlja kisik. Povezava med kolonizacijo z AMF in DSE ter parametri rasti ni pokazala pomembne povezave, saj spremembe vodne gladine lahko izničijo pozitivne učinke na rast rastlin (Dolinar in sod., 2010).

Dosedanje raziskave so pokazale, da je glivna kolonizacija navadno večja takrat, ko ima rastlina dodatne zahteve po hranilih, to je v času cvetenja ali plodenja (Bohrer in sod., 2004; Pongrac in sod., 2007). Pri navadnem trstu je to najverjetneje tudi v jesenskem času, ko trst intenzivno kopiči zaloge v koreninah, na kar kaže naraščanje frekvence in intenzitete kolonizacije proti koncu rastne sezone (Dolinar, 2013). V nekaterih drugih raziskavah so pogosto opazili največji obseg glivne kolonizacije spomladi, ko poteka intenzivna vegetativna rast (Bajwa in sod., 2001; Welsh in sod., 2010). Analiza korenin trsta na območju Zadnjega kraja, kjer so spremembe vodostaja največje, je pokazala, da je nižji 7-dnevni vodostaj pred vzorčenjem značilno povezan z

večjo frekvenco glivne kolonizacije (Dolinar in sod., 2016). Raziskave vpliva različnih poplavnih režimov na AM pri rižu so pokazale, da je bil rastlinski ogljik prisoten v AMF pri vseh režimih poplavljanja, kar dokazuje znatna obogatitev z izotopom C^{13} v maščobnih kislinah, značilnih za AMF, s tem, da je bila količina ogljika manjša pri večji intenzivnosti poplavljanja in značilno večja v fazi rasti, ko so imele rastline večje potrebe po hranilih (Bao in sod., 2019).

Pri proučevanju glivne kolonizacije korenin trstične pisanke je bilo ugotovljeno, da so bili v času vseh vzorčenj kolonizirani vsi pregledani koreninski fragmenti ($F\% = 100$), vendar je bila splošna intenziteta glivne kolonizacije ($M\%$) razmeroma majhna, od 5 do 25 % (slika 4), največja pa je bila pri junijskem vzorčenju. Opazili smo zelo malo arbuskulov ($A\% < 1$), veziklov ($V\% < 5$) in MS ($MS\% < 5$), največ je bilo opaziti svitkov ($S\% < 15$). Delež $MS\%$ je bil proti koncu sezone značilno večji, vrednosti $S\%$ pa so proti koncu rastne sezone značilno upadle (Dolinar, 2013).



Slika 4: Intenziteta glivne kolonizacije ($M\%$) korenin trstične pisanke v letu 2009. $N = 10$. Različne črke označujejo statistično značilne razlike med datumi. ° prikazuje osamelec.

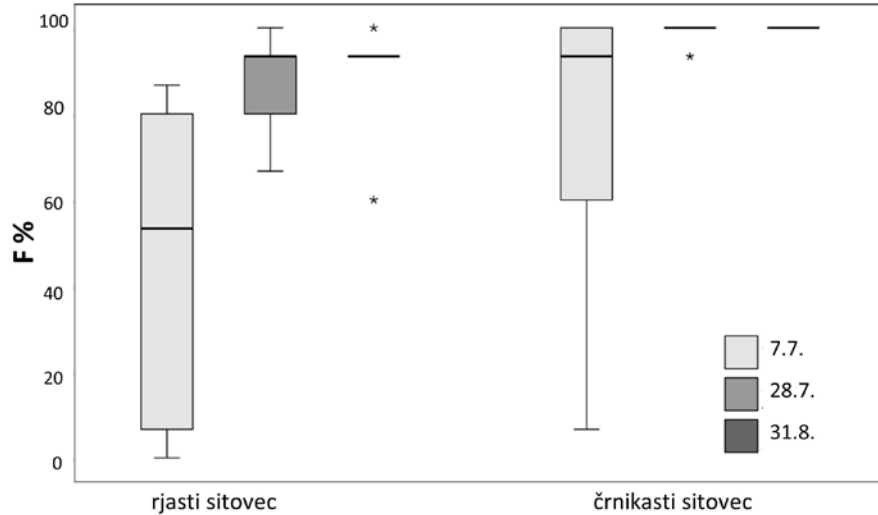
Glivna kolonizacija pri sitovcih

Leta 2008 je bila izvedena še raziskava glivne kolonizacije dveh vrst sitovca, rjastega sitovca nabranega na Dujicah in črnkastega sitovca nabranega na območju Rešeta. Črnkasti sitovec raste na mokrih, pustih tleh, medtem, ko rjasti sitovec raste na pustih barjanskih tleh. Delež koloniziranih fragmentov ($F\%$) korenin je pri obeh vrstah v sezoni naraščal (slika 5). Delež arbuskulov in veziklov je bil večji pri črnkastem sitovcu, medtem ko je bil delež ostalih struktur podoben pri obeh vrstah (Dolinar in sod., 2010; Dolinar, 2013).

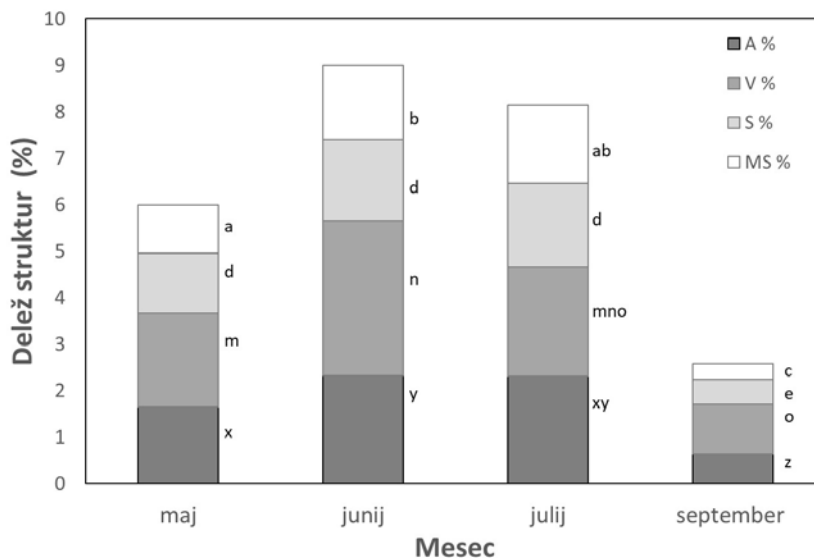
Glivna kolonizacija pri visokem trpotcu

Visoki trpotec je zelnata trajnica, ki sodi v družino *Plantaginaceae*. Cveti od maja do julija (Martinič in sod., 2007). Na Cerkniškem jezeru naseljuje mokrotne travnike z rušnato masnico

(*Deschampsia* – *Plantaginietum altissimae*). Njihov habitat je poplavljen del leta, običajno spomladi in jeseni, v glavni vegetacijski sezoni pa je suh (Martinčič in Leskova, 2002). Vengust in Gaberščik (2018) sta raziskovali kolonizacijo korenin visokega trpotca z glivami v času rastne sezone. Pogostost glivnih struktur (vključno s hifami) je bila razmeroma velika, od 50 % do 90 %, medtem ko je bila mikorizna intenziteta (M %) razmeroma majhna, od 1,8 do 19,5 %, najmanjša pa je bila pri septembrskem vzorčenju.



Slika 5: Sezonske spremembe v deležu koloniziranih fragmentov (F %) korenin pri rjastem *Schoenus ferrugineus* in črnkastem sitovcu (*S. nigricans*) v vegetacijski sezoni 2008. N = 10, * prikazuje ekstremne osamelce.



Slika 6: Gostota različnih glivnih struktur, tj. arbuskulov (A %), veziklov (V %), svitkov (S %), in mikrosklerocijev (MS %) v koreninah visokega trpotca v različnem času vegetacijskega obdobja. Različne črke označujejo značilne razlike med merjenimi parametri v različnih mesecih ($p < 0,05$) (povzeto po Vengust in Gaberščik, 2018).

Pri rastlinah v vegetativni fazi sta opazili podobno pogostost glivnih struktur kot v času cvetenja, medtem ko se je v fazi senescence v septembru pogostost znatno zmanjšala. Število veziklov (založnih struktur) in arbuskulov, ki kažejo na aktivno mikorizo, se je znatno povečalo v fazi cvetenja

in proti koncu sezone upadlo. Nekateri avtorji trdijo, da so vezikli strukture, v katerih gliva kopiči založne snovi, potrebne za preživetje v neugodnih razmerah, kar je na Cerknškem jezeru lahko ključno za uspešno nadaljevanje vegetacijske sezone. Podoben trend je bil opažen tudi pri gostoti MS, ki se je septembra znatno zmanjšala. Vsebnost vode v rastlinah je bila pozitivno povezana z gostoto večine glivnih struktur, razen arbuskulov in svitkov (Vengust in Gaberščik, 2018).

Glivna kolonizacija na hidrološkem gradientu jezera

Primerjava različnih vrst rastočih v habitatih na hidrološkem gradientu jezera (glede na Ellenbergove indekse vlažnosti rastišča vrste) kaže velik delež koloniziranih fragmentov pri večini proučevanih vrst, razen pri koreninah togega šaša, kjer je bilo koloniziranih manj kot 2 % vseh pregledanih fragmentov (preglednica 2).

Preglednica 2: Parametri glivne kolonizacije (mediane) vrst izbranih glede na hidrološki gradient. Vrstni red v preglednici odraža pojavljanje rastlinskih vrst glede na hidrološki gradient (obseg poplav) na Cerknškem jezeru v poletnem času. Za primerjavo so dodani Ellenbergovi indeksi okoljskih parametrov (10 – največ, 1 – najmanj, x nima vpliva, / ni podatka) (Ellenberg s sod., 1992). F % pomeni delež koloniziranih fragmentov, male črke pomenijo delež kolonizacije posameznih glivnih struktur na pregledanih koloniziranih fragmentih, velike črke pomenijo delež kolonizacije posameznih glivnih struktur na vseh pregledanih fragmentih; navadni trst – *Phragmites australis*, togi šaš – *Carex elata*, močvirski grint – *Senecio paludosus*, črnkasti sitovec – *Schoenus nigricans*, poletni zvonček – *Leucojum aestivum*, pisana čužka – *Phalaris arundinacea*, rjasti sitovec – *S. ferrugineus*, visoki trpotec – *Plantago altissima*.

Vrsta	navadni trst	togi šaš	močvirski grint	črnkasti sitovec	poletni zvonček	pisana čužka	rjasti sitovec	visoki trpotec
Indeksi po Ellenbergu*								
Vlažnost	10	10	9	9	9	8	8	/
Bazičnost tal	7	x	x	9	7	7	7	/
Hranila	7	5	6	2	8	7	2	/

Mesto vzorčevanja	Zadnji kraj	Zadnji kraj	Rešeto	Rešeto	Rešeto	Rešeto	Dujice	Rešeto
Parameter kolonizacije	Delež							
F %	100	1,7	79,6	100	100	100	96,7	100
M %	9,8	0,1	3,1	13,3	92,7	6,8	4,4	28,6
m %	9,8	1,8	4,5	13,3	92,7	6,8	4,6	29,1
A %	0	0	0,1	4,4	0	0	0,2	0,2
a %	0	0	2,1	35,7	0	0	5	0,8
V %	1,6	0	0	4,5	70,9	0,3	0,4	6,7
v %	13,6	0	0	33,6	76,7	5,9	6	22,6
S %	0	0,01	0,2	0,3	7,7	1,8	0,1	4
s %	0	1,9	8,8	3,2	8,2	31,9	2,9	13
MS %	1,3	0,01	0,1	3,3	6,2	0,8	1,4	0,9
ms %	13	0,2	2,3	25,4	6,9	13,1	33,9	3

Kljub velikemu F % pa je bila intenziteta glivne kolonizacije navadno zelo majhna (okrog 10 % ali manj). Izstopa veliki poletni zvonček, pri katerem je bila intenziteta glivne kolonizacije skoraj 93 % in visoki trpotec z 29 % (preglednica 2). Večina vrst je imela zelo malo arbuskulov ali je bila brez arbuskulov ($A \% < 5$), kar kaže na odsotnost aktivne mikorize. Tudi veziklov je bilo razmeroma malo ($V \% < 7$), razen pri velikem poletnem zvončku, kjer je bil delež skoraj 71 %. Tudi svitkov in mikrosklerocijev je bilo največ pri velikem poletnem zvončku ($S \% 7,7$; $MS \% 6,2$), pri ostalih vrstah so bile vrednosti manjše (Dolinar, 2013). Raziskave Bauerjeve in sod. (2003) so pokazale, da je bila mikorizna kolonizacija v koreninah različnih vrst na hidrološkem gradientu od 3 do 90 % in je bila še posebej velika pri vrstah iz družine Poaceae (trave), kar je podobno kot pri naših raziskavah.

Zaključek

Kolonizacija korenin z AMF in/ozroma DSE je bila na Cerkniškem jezeru ugotovljena pri večini preiskovanih vrst. Prisotnost gliv omogoča hitrejše odzive vrst in zato večjo prožnost tega spreminjajočega se ekosistema, saj poveča dostopnost vode in hranil, ki jih občasno primanjkuje, obenem pa omogoča hitrejše zaraščanje razgaljenih površin. Rezultati glivne kolonizacije korenin navadnega trsta s Cerkniškega jezera kažejo na to, da so glive bolj pogoste kadar tla niso zalita z vodo, ob poplavljanju pa se ohranijo v koreninskem sistemu.

Summary

Fungal colonisation of roots in different plant species

Most plant species have fungal symbionts that are beneficial for plants survival, vitality and acclimation to stress conditions. In Lake Cerknica, renowned for its intermittent character, conditions for plants are often extreme and unpredictable, research has been carried out on the colonisation of the roots of different plant species by arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) and dark septate endophytes (DSE).

AMF belongs to phylum Glomeromycota, which forms a symbiosis with more than 90% of terrestrial plant species. With extensive extraradical mycelia AMF affect plant vigour by positively affecting nutrient cycling, mobilise phosphorus and nitrogen, and present an important carbon sink in the soil. AMF also protect the plant from mechanical stresses and toxic metals and have a beneficial effect on litter decomposition as they can take up nitrogen directly from organic matter. Different studies of wetland plants showed that they benefit from arbuscular mycorrhiza (AM), even under flooded conditions when oxygen is scarce. Many wetland plants respond to oxygen deficiency by developing aerenchyma, which enable oxygen transport from the shoots to the roots, improving the aeration of the root zone and consequently conditions for fungal growth and development. Despite increased aeration, the extent of colonisation with AMF was inversely proportional to the depth of water or duration of flooding.

DSE colonise roots and can form a network of hyphae in the rhizosphere, which may improve the plant's access to water and nutrients. Similarly to AMF also DSE can thus form mutualistic associations with plants and play a protective role under stress conditions and are common in extreme environments. The reports on DSE in plants in aquatic environments are scarce and the research at Lake Cerknica revealed number of novelties.

Due to changes in water levels, plants on Lake Cerknica are constantly exposed to disturbances that can cause damage. Effective strategies of these plant species are crucial for recolonisation of disturbed areas. AMF and DSE may play an important role in the succession of plant communities by supporting plant metabolism and enhancing above- and below-ground biodiversity. Changes in water level also affect the rate of mineralisation and nutrient release. This is also the case in Lake Cerknica, where nutrient availability is low during the dry season, but increases during flooding. The interaction between water and nutrient availability may therefore be a key factor in the establishment of AMF in many plant species.

Lake Cerknica represents a model system for studying the impact of changes in water level on vegetation in terms of fungal colonisation. Of particular interest are the amphibious plants that can thrive in water and on dry land. In 2005 and 2006, colonisation with AMF and DSE was investigated in terrestrial and aquatic specimens of the amphibian species *Alisma plantago-aquatica*, *Mentha aquatica*, *Myosotis scorpioides* agg., *Glyceria fluitans*, *Gratiola officinalis*, *Ranunculus lingua*, *Teucrium scordium*, *Sium latifolium*, *Oenanthe fistulosa*, *Sparganium emersum* and *Veronica anagallis-aquatica* collected at Rešeto and in the tributaries of the lake. In 2008 and 2009 studies of fungal colonisation of the roots of plant species on the hydrological gradient of the lake was performed. The studies also included root colonisation of *Phragmites australis* (both AMF and DSE) during the growing season, at the sites of Dujice, Gorenje Jezero and Zadnji kraj, and seasonal changes in fungal colonisation of *Phalaris arundinacea*, at the site of Rešeto. A study was also carried out on the fungal colonisation of two *Shoenus* species, *S. ferrugineus* from Dujice region and the *S. nigricans* collected near the area of Rešeto.

Root colonisation by AMF was found in all amphibian plant species examined. The Lake Cerknica surveys are the first report of AM for *S. latifolium* and *S. emersum*. Lower levels of AM were observed in submerged specimens of the plant species studied compared to terrestrial specimens. AMF formed arbuscules in terrestrial specimens of all amphibian species, but were absent in aquatic specimens of *G. fluitans*, *O. fistulosa*, *S. latifolium* and *S. emersum*. The characteristics of rhizosphere soils also affect the occurrence of AM, as AMF increase nutrient uptake in nutrient-poor soils. The organic matter content of the rhizosphere soils of the studied plants was < 10%, however, mycorrhizal intensity was significantly higher in soils with a higher organic matter content, that is related to the absence of long-term flooding in these areas. DSE structures were also found in all 11 species of amphibious plants. The proportion of roots colonised by DSE was low for most species. Our DSE studies in Lake Cerknica were the first of their kind in aquatic environment.

Fungal colonisation of *P. australis* was recorded at different sites, with differences only in the degree of colonisation and the density of individual fungal structures. Fungal colonisation of roots in *P. australis* was generally very low, but a variety of AM structures (arbuscules, vesicles and coils) and DSE structures were found. The seasonal dynamics of fungal colonisation depended on hydrological conditions and phenological phase. It is higher when the soil is not waterlogged, however the structures may persist when the soil is flooded. When examining fungal colonisation of *P. arundinacea* roots, all root fragments were colonised, but the overall intensity of fungal colonisation was relatively low, ranging from 5% to 25%. Very few arbuscules, vesicles and MS were observed, however MS% was significantly increased towards the end of the season.

In 2008, a fungal colonisation study was also carried out on two representatives of genus *Shoenus*. The share of arbuscules and vesicles was higher in *S. nigricans* in comparison to *S. ferrugineus*, while the share of other structures was similar in both species.

Comparison of the different species growing in habitats on the hydrological gradient of the lake (according to Ellenberg humidity indices for species habitat) showed a high proportion of colonised fragments for most of the species studied, except for *Carex elata*, with specific root morphology, where less than 2% of all root fragments examined were colonised with very low intensity of fungal colonisation (around 10% or less). The most notable species were the *Leucojum aestivum*, with colonisation intensity of almost 93%, and *Plantago altissima*, with 29%. Most species had very few or no arbuscules, raising doubts to active AM in these species at the time of sampling.

Root colonisation by AMF and/or DSE was found in most of the species examined at Lake Cerknica. The presence of fungi allows for faster species responses and therefore greater resilience of this permanently changing ecosystem, as it increases the availability of water and nutrients that are temporarily scarce in the system, while allowing for faster regrowth of denuded areas.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 in preko financiranja mladih raziskovalcev 24506 in 28500.

Viri

- Andersen, F. Ø., Andersen, T. 2006. Effects of arbuscular mycorrhizae on biomass and nutrients in the aquatic plant *Littorella uniflora*. *Freshwater Biology*, 51(9), 1623–1633. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2006.01608.x>
- Asmelash, F., Bekele, T., Birhane, E. 2016. The potential role of arbuscular mycorrhizal fungi in the restoration of degraded lands. *Frontiers in Microbiology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01095>
- Bajwa, R., Yaqoob, A., Javaid, A. 2001. Seasonal variation in VAM in wetland plants. *Pakistan Journal of Biological Sciences*, 4(4), 464–470. <https://doi.org/10.3923/pjbs.2001.464.470>
- Baldwin, D. S., Mitchell, A. M., Rees, G. N. 2000. The effects of in situ drying on sediment-phosphate interactions in sediments from an old wetland. *Hydrobiologia*, 431(1), 3–12. <https://doi.org/10.1023/A:1004015019608>
- Bao, X., Wang, Y., Olsson, P. A. 2019. Arbuscular mycorrhiza under water — Carbon–phosphorus exchange between rice and arbuscular mycorrhizal fungi under different flooding regimes. *Soil Biology and Biochemistry*, 129, 169–177. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.11.020>
- Bauer, C. R., Kellogg, C. H., Brigham, S. D., Lamberti, G. A. 2003. Mycorrhizal colonization across hydrologic gradients in restored and reference freshwater wetlands. *Wetlands*, 23, 961–968.
- Björn, L. O., Middleton, B. A., Germ, M., Gaberščik, A. 2022. Ventilation systems in wetland plant species. *Diversity*, 14(7), 517. <https://doi.org/10.3390/d14070517>
- Bohrer, K. E., Friesse, C. F., Amon, J. P. 2004. Seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi in differing wetland habitats. *Mycorrhiza*, 14(5), 329–337. <https://doi.org/10.1007/s00572-004-0292-7>
- Bonfante, P., Genre, A. 2010. Mechanisms underlying beneficial plant–fungus interactions in mycorrhizal symbiosis. *Nature Communications*, 1(1), 48. <https://doi.org/10.1038/ncomms1046>
- Boulton, A. J., Brock, M. A. 1999. Australian freshwater ecology. Processes and management. Canberra, Australia. Gleneagles Publishing, Glen Osmond SA 5064. 297 str.

- Brundrett, M. C. 2006. Understanding the roles of multifunctional mycorrhizal and endophytic fungi. V B. Schulz, C. Boyle, T. N. Sieber (ur.), *Soil Biology*, Vol. 9 (str. 281–298). Berlin – Heidelberg. Springer Verlag.
- Carvalho, L. M., Caçador, I., Martins-Loução, M. 2001. Temporal and spatial variation of arbuscular mycorrhizas in salt marsh plants of the Tagus estuary (Portugal). *Mycorrhiza*, 11(6), 303–309. <https://doi.org/10.1007/s00572-001-0137-6>
- Chen, X. M., Dong, H. L., Hu, K. X., Sun, Z. R., Chen, J., Guo, S. X. 2010. Diversity and antimicrobial and plant-growth-promoting activities of endophytic fungi in *Dendrobium loddigesii* Rolfe. *Journal of Plant Growth Regulation*, 29(3), 328–337. <https://doi.org/10.1007/s00344-010-9139-y>
- Cooke, J. C., Lefor, M. W. 1998. The mycorrhizal status of selected plant species from Connecticut wetlands and transition zones. *Restoration Ecology*, 6(2), 214–222. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.1998.00628.x>
- Cornwell, W. K., Bedford, B. L., Chapin, C. T. 2001. Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in a phosphorus-poor wetland and mycorrhizal response to phosphorus fertilization. *American Journal of Botany*, 88(10), 1824–1829.
- Dolinar, N. 2013. Primarna proizvodnja, razgradnja in glivna kolonizacija izbranih rastlinskih vrst na pre-sihajočem Cerkniškem jezeru : doktorska disertacija [Doctoral dissertation]. Univerza v Ljubljani, Bioteh-niška fakulteta. 102 str.
- Dolinar, N., Gaberščik, A. 2010. Mycorrhizal colonization and growth of *Phragmites australis* in an inter-mittent wetland. *Aquatic Botany*, 93(2), 93–98. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2010.03.012>
- Dolinar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wet-land. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>
- Ernst, M., Mendgen, K. W., Wirsal, S. G. R. 2003. Endophytic fungal mutualists: Seed-borne *Stagonospora* spp. enhance reed biomass production in axenic microcosms. *Molecular Plant-Microbe Interactions*®, 16(7), 580–587. <https://doi.org/10.1094/MPMI.2003.16.7.580>
- Friesen, M. L., Porter, S. S., Stark, S. C., von Wettberg, E. J., Sachs, J. L., Martinez-Romero, E. 2011. Mi-crobially mediated plant functional traits. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 42(1), 23–46. <https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102710-145039>
- Gaberščik, A., Dolinar, N., Šraj, N., Regvar, M. 2017. What have we learnt from studying mycorrhizal colonisation of wetland plant species? V *Mycorrhiza - Function, diversity, state of the art* (str. 291–304). Cham. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-53064-2_14
- Glick, B. R. 2020. Mycorrhizal–plant interactions. V *Beneficial plant-bacterial interactions* (str. 301–317). Cham. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44368-9_9
- Hodge, A., Campbell, C. D., Fitter, A. H. 2001. An arbuscular mycorrhizal fungus accelerates decompo-sition and acquires nitrogen directly from organic material. *Nature*, 413(6853), 297–299. <https://doi.org/10.1038/35095041>
- Ipsilantis, I., Sylvia, D. M. 2007. Interactions of assemblages of mycorrhizal fungi with two Florida wet-land plants. *Applied Soil Ecology*, 261–270.
- Johnson, N. C., Wilson, G. W. T., Wilson, J. A., Miller, R. M., Bowker, M. A. 2015. Mycorrhizal phenotypes and the law of the Minimum. *New Phytologist*, 205(4), 1473–1484. <https://doi.org/10.1111/nph.13172>
- Jumpponen, A. 2001. Dark septate endophytes – are they mycorrhizal? *Mycorrhiza*, 11(4), 207–211. <https://doi.org/10.1007/s005720100112>
- Khidir, H. H., Eudy, D. M., Porras-Alfaro, A., Herrera, J., Natvig, D. O., Sinsabaugh, R. L. 2010. A general suite of fungal endophytes dominate the roots of two dominant grasses in a semiarid grassland. *Journal of Arid Environments*, 74(1), 35–42. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2009.07.014>

- Koide, R. T. 1991. Nutrient supply, nutrient demand and plant response to mycorrhizal infection. *New Phytologist*, 117(3), 365–386. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1991.tb00001.x>
- Kržič, N. 2007. Tekmovalne prednosti makrofitov v presihajočih vodnih telesih = The competitive advantages of macrophytes in intermittent water-bodies [Doctoral dissertation]. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. 88 str.
- Liu, N., Jacquemyn, H., Liu, Q., Shao, S.-C., Ding, G., Xing, X. 2022. Effects of a dark septate fungal endophyte on the growth and physiological response of seedlings to drought in an epiphytic orchid. *Frontiers in Microbiology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.961172>
- Liu, Y., Wei, X. 2019. Dark septate endophyte improves drought tolerance of *Ormosia hosiei* Hemsley & E. H. Wilson by modulating root morphology, ultrastructure, and the ratio of root hormones. *Forests*, 10(10), 830. <https://doi.org/10.3390/f10100830>
- Lou, B., Wang, A., Lin, C., Xu, T., Zheng, X. 2011. Enhancement of defense responses by oligandrin against *Botrytis cinerea* in tomatoes. *African Journal of Biotechnology*, 10(21), 11442–11449.
- Malicka, M., Magurno, F., Piotrowska-Seget, Z. 2022. Plant association with dark septate endophytes: When the going gets tough (and stressful), the tough fungi get going. *Chemosphere*, 302, 134830. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134830>
- Mandyam, K., Fox, C., Jumpponen, A. 2012. Septate endophyte colonization and host responses of grasses and forbs native to a tallgrass prairie. *Mycorrhiza*, 22(2), 109–119. <https://doi.org/10.1007/s00572-011-0386-y>
- Mandyam, K., Jumpponen, A. 2005. Seeking the elusive function of the root-colonising dark septate endophytic fungi. *Studies in Mycology*, 53, 173–189. <https://doi.org/10.3114/sim.53.1.173>
- Mandyam, K., Jumpponen, A. 2008. Seasonal and temporal dynamics of arbuscular mycorrhizal and dark septate endophytic fungi in a tallgrass prairie ecosystem are minimally affected by nitrogen enrichment. *Mycorrhiza*, 18(3), 145–155. <https://doi.org/10.1007/s00572-008-0165-6>
- Martinčič, A., Leskovar, I. 2002. Vegetacija. V A. Gaberščik (ur.), Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru (str. 81–96). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Martinčič, A., Wraber, T., Jogan, N., Ravnik, V., Podobnik, A., Turk, B., Vreš, B., Frajman, B., Strgulc-Krajšek, S., Trčak, B., Bačič, T., Fischer, M. A., Eler, K., Surina, B. 2007. Mala flora Slovenije. Ljubljana. Tehniška založba Slovenije. 967 str.
- Mendoza, R., Escudero, V., García, I. 2005. Plant growth, nutrient acquisition and mycorrhizal symbioses of a waterlogging tolerant legume (*Lotus glaber* Mill.) in a saline-sodic soil. *Plant and Soil*, 275(1–2), 305–315. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-2501-3>
- Miller, S. P. 2000. Arbuscular mycorrhizal colonization of semi-aquatic grasses along a wide hydrologic gradient. *New Phytologist*, 145(1), 145–155. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2000.00566.x>
- Miller, S. P., Bever, J. D. 1999. Distribution of arbuscular mycorrhizal fungi in stands of the wetland grass *Panicum hemitomon* along a wide hydrologic gradient. *Oecologia*, 119(4), 586–592. <https://doi.org/10.1007/s004420050823>
- Miller, S. P., Sharitz, R. R. 2000. Manipulation of flooding and arbuscular mycorrhiza formation influences growth and nutrition of two semiaquatic grass species. *Functional Ecology*, 14(6), 738–748. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2435.2000.00481.x>
- Muthukumar, T., Udaiyan, K., Shanmughavel, P. 2004. Mycorrhiza in sedges? An overview. *Mycorrhiza*, 14(2), 65–77. <https://doi.org/10.1007/s00572-004-0296-3>

- Neto, D., Carvalho, L. M., Cruz, C., Martins-Loução, M. A. 2006. How do mycorrhizas affect C and N relationships in flooded *Aster tripolium* plants? *Plant and Soil*, 279(1–2), 51–63. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-6333-y>
- Neubert, K., Mendgen, K., Brinkmann, H., Wirsel, S. G. R. 2006. Only a few fungal species dominate highly diverse mycofloras associated with the common reed. *Applied and Environmental Microbiology*, 72(2), 1118–1128. <https://doi.org/10.1128/AEM.72.2.1118-1128.2006>
- Nielsen, K. B., Kjølner, R., Olsson, P. A., Schweiger, P. F., Andersen, F. Ø., Rosendahl, S. 2004. Colonisation and molecular diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in the aquatic plants *Littorella uniflora* and *Lo-belia dortmanna* in southern Sweden. *Mycological Research*, 108(6), 616–625. <https://doi.org/10.1017/S0953756204000073>
- Oliveira, R. S., Dodd, J. C., Castro, P. M. L. 2001. The mycorrhizal status of *Phragmites australis* in several polluted soils and sediments of an industrialised region of Northern Portugal. *Mycorrhiza*, 10(5), 241–247. <https://doi.org/10.1007/s005720000087>
- Parniske, M. 2008. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses. *Nature Reviews Microbiology*, 6(10), 763–775. <https://doi.org/10.1038/nrmicro1987>
- Pongrac, P., Vogel-Mikuš, K., Kump, P., Nečemer, M., Tolrà, R., Poschenrieder, C., Barceló, J., Regvar, M. 2007. Changes in elemental uptake and arbuscular mycorrhizal colonisation during the life cycle of *Thlaspi praecox* Wulfen. *Chemosphere*, 69(10), 1602–1609. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2007.05.046>
- Potisek, M., Likar, M., Vogel-Mikuš, K., Arčon, I., Grdadolnik, J., Regvar, M. 2021. 1,8-dihydroxy naphthalene (DHN) - melanin confers tolerance to cadmium in isolates of melanised dark septate endophytes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 222, 112493. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112493>
- Ramírez-Viga, T. K., Aguilar, R., Castillo-Argüero, S., Chiappa-Carrara, X., Guadarrama, P., Ramos-Zapata, J. 2018. Wetland plant species improve performance when inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi: a meta-analysis of experimental pot studies. *Mycorrhiza*, 28(5–6), 477–493. <https://doi.org/10.1007/s00572-018-0839-7>
- Rascio, N. 2002. The underwater life of secondarily aquatic plants: Some problems and solutions. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 21(4), 401–427. <https://doi.org/10.1080/0735-260291044296>
- Rich, M. K., Vigneron, N., Libourel, C., Keller, J., Xue, L., Hajheidari, M., Radhakrishnan, G. V., Le Ru, A., Diop, S. I., Potente, G., Conti, E., Duijsings, D., Batut, A., Le Faouder, P., Kodama, K., Kyojuka, J., Sallet, E., Bécard, G., Rodriguez-Franco, M., Ott, T., Bertrand-Michel, J., Oldroyd, G., Szövényi, P., Bucher, M., Delaux, P.-M. 2021. Lipid exchanges drove the evolution of mutualism during plant terrestrialization. *Science*, 372(6544), 864–868. <https://doi.org/10.1126/science.abg0929>
- Rodriguez, R. J., White Jr, J. F., Arnold, A. E., Redman, R. S. 2009. Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New Phytologist*, 182(2), 314–330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.02773.x>
- Scervino, J. M., Gottlieb, A., Silvani, V. A., Pérgola, M., Fernández, L., Godeas, A. M. 2009. Exudates of dark septate endophyte (DSE) modulate the development of the arbuscular mycorrhizal fungus (AMF) *Gigaspora rosea*. *Soil Biology and Biochemistry*, 41(8), 1753–1756. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.04.021>
- Schulz, B. 2006. Mutualistic interactions with fungal root endophytes. V *Soil Biology* (Vol. 9, str. 261–278). Berlin – Heidelberg. Springer Verlag.
- Smith, S. E., Read, D. J. 1997. *Mycorrhizal symbiosis*, second edition. London, UK. Academic Press.
- Stevens, K. J., Peterson, R. L. 1996. The effect of a water gradient on the vesicular-arbuscular mycorrhizal status of *Lythrum salicaria* L. (purple loosestrife). *Mycorrhiza*, 6(2), 99–104. <https://doi.org/10.1007/s005720050113>
- Stevens, K. J., Wall, C. B., Janssen, J. A. 2011. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on seedling growth and development of two wetland plants, *Bidens frondosa* L., and *Eclipta prostrata* L., grown under three

- levels of water availability. *Mycorrhiza*, 21(4), 279–288. <https://doi.org/10.1007/s00572-010-0334-2>
- Steyn, W. J., Wand, S. J. E., Holcroft, D. M., Jacobs, G. 2002. Anthocyanins in vegetative tissues: a proposed unified function in photoprotection. *New Phytologist*, 155(3), 349–361. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00482.x>
- Szövényi, P., Bucher, M., Delaux, P.-M. 2021. Lipid exchanges drove the evolution of mutualism during plant terrestrialization. *Science*, 372(6544), 864–868. <https://doi.org/10.1126/science.abg0929>
- Šraj-Kržič, N., Pongrac, P., Klemenc, M., Kladnik, A., Regvar, M., Gaberščik, A. 2006. Mycorrhizal colonisation in plants from intermittent aquatic habitats. *Aquatic Botany*, 85(4), 331–336. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2006.07.001>
- Thormann, M. N., Currah, R. S., Bayley, S. E. 1999. The mycorrhizal status of the dominant vegetation along a peatland gradient in southern boreal Alberta, Canada. *Wetlands*, 19(2), 438–450. <https://doi.org/10.1007/BF03161775>
- Trouvelot, A., Kough, J. L., Gianinazzi-Pearson, V. Mesure de taux de mycorhization VA d'un système racinaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. V V. Gianinazzi-Pearson, S. Gianinazzi (ur.), *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae* (str. 217–221). Paris, France. INRA Press.
- Urbanc-Berčič, O., Gaberščik, A. 2004. The Relationship of the processes in the rhizosphere of common reed *Phragmites australis*, Trin. ex Steudel to Water Fluctuation. *International Review of Hydrobiology*, 89(5–6), 500–507. <https://doi.org/10.1002/iroh.200410774>
- Vengust, D. M., Gaberščik, A. 2018. Seasonal dynamics of fungal colonisation of *Plantago altissima* roots in a water-fluctuating wetland = Sezonska dinamika glivne kolonizacije korenin visokega trpotca v presihajočem mokrišču. *Acta Biologica Slovenica*, 61(1), 13–24.
- Voesenek, L. A. C. J., Colmer, T. D., Pierik, R., Millenaar, F. F., Peeters, A. J. M. 2006. How plants cope with complete submergence. *New Phytologist*, 170(2), 213–226. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2006.01692.x>
- Wang, S., Bi, Y., Quan, W., Christie, P. 2022. Growth and metabolism of dark septate endophytes and their stimulatory effects on plant growth. *Fungal Biology*, 126(10), 674–686. <https://doi.org/10.1016/j.funbio.2022.08.006>
- Wang, Y., Huang, Y., Qiu, Q., Xin, G., Yang, Z., Shi, S. 2011. Flooding Greatly Affects the Diversity of Arbuscular Mycorrhizal Fungi Communities in the Roots of Wetland Plants. *PLoS ONE*, 6(9), e24512. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024512>
- Weishampel, P. A., Bedford, B. L. 2006. Wetland dicots and monocots differ in colonization by arbuscular mycorrhizal fungi and dark septate endophytes. *Mycorrhiza*, 16(7), 495–502. <https://doi.org/10.1007/s00572-006-0064-7>
- Welsh, A. K., Burke, D. J., Hamerlynck, E. P., Hahn, D. 2010. Seasonal analyses of arbuscular mycorrhizae, nitrogen-fixing bacteria and growth performance of the salt marsh grass *Spartina patens*. *Plant and Soil*, 330(1–2), 251–266. <https://doi.org/10.1007/s11104-009-0197-5>
- Wigand, C., Andersen, F. O., Christensen, K. K., Holmer, M., Jensen, H. S. 1998. Endomycorrhizae of isoetids along a biogeochemical gradient. *Limnology and Oceanography*, 43(3), 508–515. <https://doi.org/10.4319/lo.1998.43.3.0508>
- Wirsal, S. G. R. 2004. Homogenous stands of a wetland grass harbour diverse consortia of arbuscular mycorrhizal fungi. *FEMS Microbiology Ecology*, 48(2), 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.femsec.2004.01.006>
- Wu, Y., Liu, T., He, X. 2009. Mycorrhizal and dark septate endophytic fungi under the canopies of desert plants in Mu Us Sandy Land of China. *Frontiers of Agriculture in China*, 3(2), 164–170. <https://doi.org/10.1007/s11703-009-0026-x>

Razgradnja rastlinskega opada na presihajočem jezeru

Alenka Gabersčik, Nataša Dolinar, Mateja Grašič, Katarina Vogel-Mikuš, Matevž Likar

Uvod

Mokrišča, v katerih prevladujejo helofiti, imajo veliko primarno proizvodnjo (Cronk in Fennessy, 2001). Manjši delež primarne proizvodnje neposredno izkoristijo primarni potrošniki, večji delež pa je podvržen procesu razgradnje ali pa se kopiči v ekosistemu, kar je odvisno od okoljskih razmer (Longhi in sod., 2008). Razgradnja rastlinskega opada je sklop fizikalnih, kemičnih in bioloških procesov, v katerih se odmrli rastlinski material razgradi na ogljikov dioksid, vodo in mineralna hranila, zato je ključna za globalno kroženje ogljika ter drugih makro in mikro hranil (Lambers in sod., 2008). Poznavanje obsega in dinamike razgradnje opada nam omogoča oceno kopičenja organskih snovi v ekosistemu in vrednotenje funkcije ekosistema (Fennessy in sod., 2008).

Na razgradnjo vplivajo mnogoteri okoljski dejavniki, predvsem temperatura, vodni režim in sestava rastlinskega materiala (Zawislanski in sod., 2001). Visoke temperature in presihanje razgradnjo pospešita (Bedford, 2005), saj ugodno vplivata na dejavnost mikroorganizmov (Battle in Golladay, 2001; Brinson in sod., 1981). Pomemben dejavnik v mokriščih je tudi dostopnost kisika, saj je razgradnja hitrejša v oksičnih kot anoksičnih razmerah (Ryder in Horwitz, 1995). Pri helofitih se razgradnja pogosto začne, ko odmrli rastlina še stoji (Van Ryckegem in sod., 2007). Pri navadnem trstu lahko faza razgradnje stoječe rastline traja od nekaj tednov do več mesecev in je lahko precejšnja (Gessner, 2000; Kuehn in sod., 1999). V tem času imajo glavno vlogo glive (Bärlocher, 1997). Mikrobni kolonizaciji rastlinskega materiala sledi drobljenje (fragmentacija) zaradi delovanja mehanskih procesov, valovanja in premeščanja (Wallis in Raulings, 2011). Pri drobljenju razkrajajočega opada imajo pomembno vlogo tudi veliki nevretenčarji, ki se hranijo z listi, koloniziranimi z mikrobi (Webster in Benfield, 1986). V procesu razgradnje mikrobna združba izrablja organski ogljik in oddaja ogljikov dioksid oziroma metan, če so razmere anoksične, dušik (N) in fosfor (P) pa se vežeta v mikrobno biomaso. Mikrobne združbe hranila pridobivajo tudi iz okolice, saj so za njihovo rast koncentracije N in P v rastlinskem opadu premajhne. To zaznamo kot dvig koncentracije hranil v razkrajajočem se materialu (Bridgham in Lamberti, 2009). Do hitrega zmanjšanja mase pride že v prvih 24 urah (Webster in Benfield, 1986). V prvi fazi razgradnje se izlužijo vodotopne spojine, kot so sladkorji in aminokisline, v drugi pa huminske in fulvo kisline (proces humifikacije), ki vplivajo na sproščanje kovin iz sedimentov (Wang in Mulligan, 2009). Večja količina kovin in njihovih ionov lahko zavira rast mikrobne združbe. Nekateri mikroorganizmi kovine in njihove ione tudi kopičijo (Purchase in sod., 2009), kar lahko vodi v veliko koncentracijo kovin v razkrajajočem se rastlinskem materialu (Schaller in sod., 2011).

Proces razgradnje se večinoma proučuje z uporabo mrežastih vrečk iz različnih materialov in različnih velikosti odprtín (litter bag metoda), ki so napolnjene s suhim rastlinskim opadom (Webster in Benfield, 1986). Iz razlike suhe mase pred in po razgradnji se s pomočjo eksponentnega modela izračuna konstanto stopnje razgradnje k (Jenny in sod., 1949) in razpolovni čas razgradnje. Vrednosti k opada navadnega trsta so zelo različne, od 0,045 do 0,153 (Gessner, 2000; Lopes in sod., 2011). Na Cerknškem jezeru sta bili s pomočjo mrežastih vrečk izvedeni dve večji raziskavi razgradnje (preglednica 1). V prvi so navadni trst (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) izpostavili na pretežno suhi, prehodni in pretežno poplavljeni lokaciji in spremljali stopnjo razgradnje ter razmere na lokacijah, izmerili pa so tudi vsebnost nekaterih kovin pred in po 4 mesecih razgradnje (Dolinar, 2013; Dolinar in sod., 2016). Raziskava je trajala 334

dni. Raziskava je bila izvedena tudi s togim šašem (*Carex elata* All.), vendar le na pretežno suhi lokaciji. V okviru druge, kratkotrajnejše raziskave (45 dni), so proučevali vpliv starosti in izvora listnega opada ter kraja izpostavljenosti (suho, poplavljeno) na stopnjo razgradnje (Grašič in sod., 2022; Likar in sod., 2022).

Preglednica 1: Opis poskusov razgradnje navadnega trsta in togega šaša.

Trajanje poskusa	Razmere izpostavitve	Vrsta opada	Lokacija vira opada	Vir
Od 21.12.2006 do 29.11.2007	suho	listi/stebila trsta	Gorenje Jezero	Dolinar, 2013 Dolinar in sod., 2016
	voda – kopno	listi/stebila trsta	Gorenje Jezero	
	poplavljeno	listi/stebila trsta	Gorenje Jezero	
	suho	listi togega šaša	Gorenje Jezero	
Od 10.09. do 25.10.2019	suho	stari/mladi listi navadnega trsta	Gorenje Jezero Zadnji kraj	Grašič in sod., 2022
	poplavljeno	stari/mladi listi navadnega trsta	Gorenje Jezero Zadnji kraj	

Stopnja razgradnje, ki je posledica razlik v kakovosti opada in okoljskih razmer med njegovo izpostavljenostjo, vpliva na ekosistemske procese, vključno s tokovi ogljika (Gregorich in sod., 2017; Petraglia in sod., 2019), kar je še posebej pomembno v luči podnebnih sprememb.

Razgradnja opada

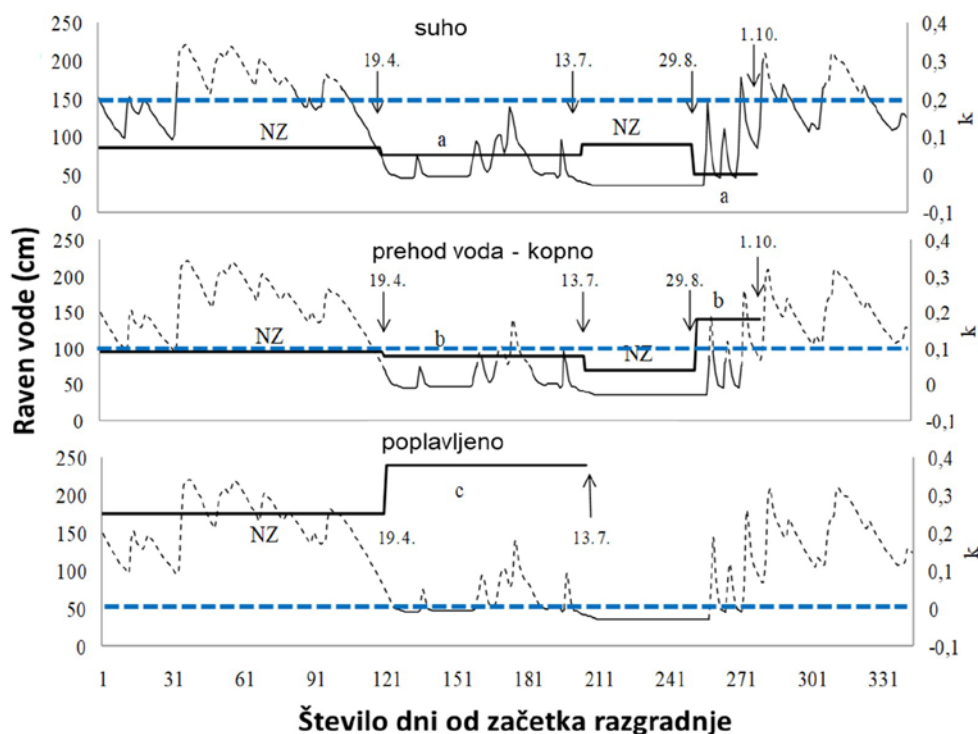
Razgradnja opada navadnega trsta se začne že v zraku, saj po zaključku vegetacijske sezone odmrle rastline še dolgo časa ostanejo pokonci (slika 1).



Slika 1: Rastline navadnega trsta lahko še dolgo po zaključku vegetacijske sezone ostanejo pokonci. Takrat se že začnejo razgradni procesi. Pogled na trstišča Cerkniškega jezera izven vegetacijske sezone (foto: Alenka Gaberščik).

Razgradnja stebel in listov navadnega trsta poteka različno hitro. Pri razgradnji na zraku prevladujejo predvsem glivne združbe (Kuehn in sod., 1999), razgradnja pa je počasnejša kot v primeru, ko je material v stiku s tlemi (Hietz, 1992). Razgradnja listov zaradi morfoloških in fizioloških lastnosti, kot so razmerje hranil C : N : P, veliko število listnih rež in majhen delež opornega tkiva, poteka hitro (Webster in Benfield, 1986), saj se večina listov razgradi prej kot v enem letu. Vodostaj značilno vpliva na razgradnjo navadnega trsta. V poskusu razgradnje listov in stebel navadnega trsta na Cerkniškem jezeru je bil opad trsta izpostavljen na suhem, na prehodu voda – kopno in v vodi. Razgradnja je najhitreje potekala v vodnih in najpočasneje v suhih razmerah (slika 2). Tudi v drugih raziskavah razgradnje v mokriščih so ugotovili, da je razgradnja v vodi najhitrejša, če so razmere oksične (Ryder in Horwitz, 1995). Ugodne razmere predstavlja tudi izmenjujoče se vodno in kopno okolje, kljub temu, da se mikrobne in nevretenčarske združbe težje vzpostavijo.

Konstante stopenj razgradnje (k) navadnega trsta na Cerkniškem jezeru so primerljive s predhodnimi raziskavami, čeprav se malo raziskav osredotoča na razlike v razgradnji stebel in listov navadnega trsta. Razgradnja stebel navadnega trsta je mnogo počasnejša od razgradnje listov in se intenzivneje začne šele približno 6 mesecev po tem, ko stebela padejo na tla in nevretenčarji lahko pridejo do parenhima v steblu (Gessner, 2000). Zamik razgradnje stebel v primerjavi z listi je bil viden tudi v raziskavah na Cerkniškem jezeru. Po prvih 250 dneh razgradnje se je masa opada stebel na poplavljeni lokaciji zmanjšala za okrog 20 %, v naslednjih 85 dneh pa še za dodatnih 20 % (Dolinar, 2013) (slika 2).



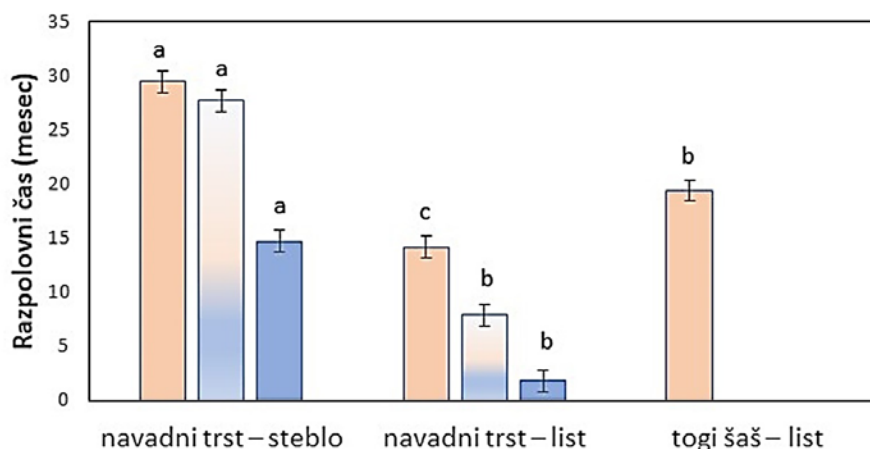
Slika 2: Spremembe v konstanti stopnje razgradnje (k) listov navadnega trsta na suhi (zgornja slika), prehodni (srednja slika) in poplavljeni (spodnja slika) lokaciji glede na raven vode. Neprekinjena odebeljena črta predstavlja k , medtem ko tanka črta predstavlja vodostaj. Ob vodostajih nad modro črtkano črto so bili vzorci v vodi (povzeto po Dolinar, 2013).

Raziskava razgradnje opada togega šaša, ki je potekala na pretežno suhi lokaciji, je pokazala precej počasnejšo razgradnjo, saj se je po 334 dnevih razgradilo le približno 70 % opada (slika 3).



Slika 3: Spremembe v konstanti stopnje razgradnje listov togega šaša na pretežno suhi lokaciji glede na raven vode. Neprekinjena odebeljena črta predstavlja k , medtem ko tanka črta predstavlja vodostaj. Ob vodostajih nad modro črtkano črto so bili vzorci v vodi (povzeto po Dolinar, 2013).

Zaradi velike spremenljivosti vodne gladine so bili vzorci na vseh treh mikrolokacijah občasno izpostavljeni tako poplavam kot tudi suši. Ko smo hitrost razgradnje povezali s številom dni, ko so bili vzorci poplavljeni, so rezultati pokazali pomembno linearno korelacijo med razgradnjo opada in trajanjem potopitve vzorcev. Hitrost razgradnje smo povezali tudi s povprečno mesečno temperaturo pred vzorčenjem in ugotovili, da je bil vpliv temperature manj pomemben (Dolinar in sod., 2016). Izračun razpolovnega časa (časa, v katerem se razgradi polovica opada) kaže velike razlike med listi in stebli trsta. Listi togega šaša potrebujejo za razgradnjo na suhi lokaciji nekoliko dlje časa kot listi trsta (Dolinar, 2013). Pri razgradnji na suhem je razpolovni čas za stebela trsta večji – od enega leta oziroma celo skoraj tri leta za suho lokacijo (sliki 4 in 5). To pomeni, da se v določenem trenutku na območju jezera nahaja opad tudi do deset let starih rastlin trsta (Dolinar in sod., 2016). Razlog za počasno razgradnjo stebel navadnega trsta so verjetno vodoodbojne diafragme v nodijih med posameznimi internodiji ter debela voščena kutikula na stebli (Armstrong in Armstrong, 1988), zaradi česar voda v notranjost trsta prodre šele več mesecev po namočitvi (Gessner, 2000).



Slika 4: Razpolovni čas rastlinskega opada trsta in šaša. Različne črke označujejo statistično značilne razlike med vzorci na isti lokaciji. Rjavo – suho, modro-rjavo – prehod voda – kopno, modro – poplavljeno. Črke nad stolpci prikazujejo značilne razlike med različnimi opadi na različnih lokacijah ($p < 0,05$).

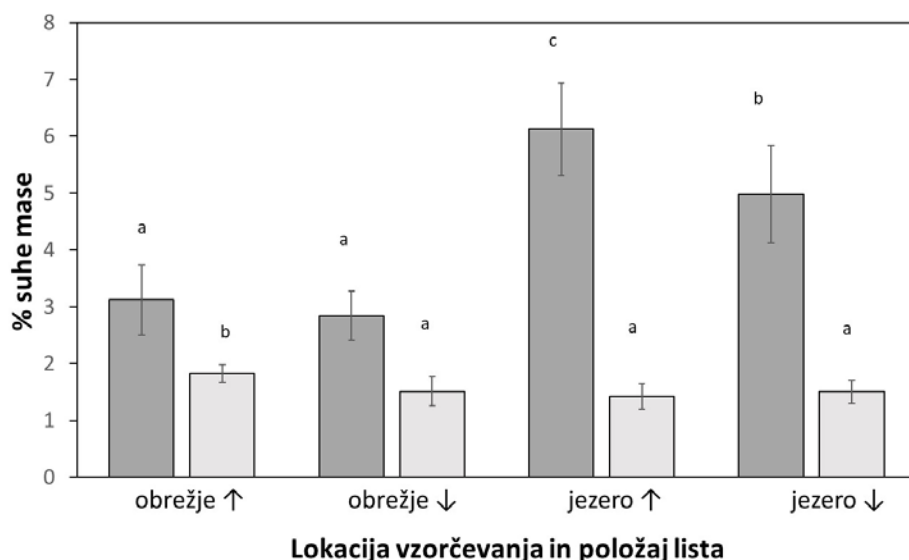
Model razgradnje navadnega trsta, ki so ga izdelali Asaeda in sod. (Asaeda in sod., 2002) predvideva, da se v enem letu razgradi od 33 % do 48 % letne nadzemne proizvodnje navadnega trsta. V našem poskusu z listi navadnega trsta se je v 45 dneh razgradilo od 30 % do 36 % opada na poplavljeni in od 13 % do 21 % na suhi lokaciji, kar je razmeroma veliko (Grašič in sod., 2022).



Slika 5: Razgradnja stebel navadnega trsta lahko traja več let, kar povzroči kopičenje opada v ekosistemu. Stebla, ki jih je odložila umikajoča voda v spomladanskem času (foto: Alenka Gaberščik).

Vpliv različne elementne sestave opada na hitrost razgradnje

Na globalni ravni hitrost razgradnje najboljše pojasnjujejo podnebni parametri, medtem ko ima elementna sestava opada veliko manjšo napovedno vrednost (Aerts, 1997). Na lokalni ravni pa je vpliv različen glede na posamezen element (Debusk in Reddy, 2005). Na Cerkniškem jezeru so potekale raziskave hitrosti razgradnje listnega opada zgornjih in spodnjih listov trsta zraslih na jezerski in obrežni lokaciji, ki smo jih izpostavili poplavljenju in suhim razmeram. Na hitrost razgradnje opada in vsebnost elementov v opadu so pomembno vplivali mesto vzorčenja, kraj izpostavljenosti in starost listov. Listi so imeli glede na starost lista in lokacijo nekoliko različno vsebnost fosforja (P), žvepla (S), klora (Cl), kalija (K), kalcija (Ca) in titana (Ti) ter zelo različno vsebnost silicija (Si) (Grašič in sod., 2022) (slika 6). Navadni trst sodi med akumulatorje Si. Si se nalaga na površini listov, kjer lahko tvori debelo plast, zato smo predvidevali, da bi lahko vplival na hitrost razgradnje listnega opada. Kljub velikim razlikam v vsebnosti Si v listnem opadu raziskave na Cerkniškem jezeru niso pokazale povezave med razgradnjo in vsebnostjo Si v listih, kar so ugotovili tudi Nakamura in sod. (2020). V primeru opada akumulatorske vrste njivske preslice (*Equisetum arvense* L.) je bilo sproščanje Si sprva hitro (več kot 60 % Si v 2–3 dneh), nato pa se je postopoma upočasnjevalo (Alfredsson in sod., 2016). To je lahko posledica vzorca kopičenja Si, ki se odlaga na površino kot silicijeva telesca ali fitoliti, ki so vrstno specifični (Brown, 1984). Fitoliti imajo pomembno funkcijo, saj delujejo kot strukturna podpora, alternativa ligninu ter obramba pred rastlinojedi in patogeni (Strömberg in sod., 2016). Vsebnost S, Cl in Ca v listih je bila pozitivno povezana s hitrostjo razgradnje opada tako na suhi kot tudi na poplavljeni lokaciji. Raziskave pa so pokazale pozitiven vpliv vsebnosti P v listih na hitrost razgradnje opada, vendar le na suhi lokaciji, kar je verjetno povezano z večjo razpoložljivostjo P v vodi (Grašič in sod., 2022).



Slika 6: Delež silicija (temno sivo) in kalcija (svetlo sivo) v listih različnih starosti in z različnih lokacij (puščica navzgor – zgornji listi, puščica navzdol – spodnji listi). Črke nad stolpci prikazujejo značilne razlike v vsebnosti določenega elementa pri različno starih listih na različnih lokacijah ($p < 0,05$).

Koncentracije kovin v opadu navadnega trsta

Pri proučevanju koncentracij kovin (K, Ca, Mn, Fe, Cr, Zn, Br in Sr) v opadu navadnega trsta na Cerkniškem jezeru so se v času razgradnje kopičile kovine. Najmanjše kopičenje so ugotovili v vzorcih opada v vodi. Vsebnosti nekaterih toksičnih kovin so bile precej velike in primerljive z bolj obremenjenimi mokrišči (Dolinar, 2013). V 6-mesečni raziskavi je prišlo do 10-kratnega povečanja koncentracije Fe, podvojene koncentracije Mn in Ca, 5-kratne koncentracije Zn, koncentracija K pa je ostala na isti ravni. Do kopičenja kovin med razgradnjo pride zaradi odlaganja finih delcev sedimenta na rastlinski material (Zawislanski in sod., 2001), zaradi biološke aktivnosti mikroorganizmov, ki jih kopičijo (Purchase in sod., 2009), ali pa izločajo eksopolisaharide, ki lahko elemente imobilizirajo, zato pride do kopičenja predvsem v biofilmu mikrobne združbe (Schaller in sod., 2011). Kljub razlikam v glivnih združbah je imela elementna sestava rastlinskega opada podoben vzorec kopičenja elementov, predvsem zaradi razgradnje organske matrice (Likar in sod., 2018).

Zaključek

Poznavanje stopnje razgradnje opada nam omogoča oceno kopičenja organskih snovi v ekosistemu in vrednotenje funkcije ekosistema. Na razgradnjo opada vplivajo številni okoljski dejavniki, predvsem temperatura, vodni režim in sestava rastlinskega materiala. Razgradnja opada navadnega trsta je najhitreje potekala v vodnih in najpočasneje v suhih razmerah. Stopnja razgradnje listov je bila višja v primerjavi s stopnjo razgradnje stebel zaradi razlik v kemičnih in morfoloških lastnostih obeh struktur. Razgradnja stebel trsta lahko traja več let in povzroči kopičenje opada v ekosistemu, čemur smo priča tudi na Cerkniškem jezeru. Dinamika razgradnje togega šaša je bila podobna razgradnji opada listov trsta. Si, ki se nalaga na površini listov navadnega trsta, ni vplival na hitrost razgradnje. Raziskave so pokazale pozitiven vpliv vsebno-

sti P v listih na hitrost razgradnje opada, vendar le na suhi lokaciji. Proučevanje koncentracij kovin (K, Ca, Mn, Fe, Cr, Zn, Br in Sr) v opadu navadnega trsta na Cerkniškem jezeru je pokazalo kopičenje kovin v času razgradnje.

Summary

Decomposition of plant litter at the intermittent lake

Decomposition of plant litter consists of a set of physical, chemical, and biological processes by which plant litter decomposes into carbon dioxide (or methane in anoxic conditions), water, and mineral nutrients, and is therefore key to the global cycling of carbon and other macro- and micro-nutrients. Decomposition is influenced by many environmental factors, such as temperature, water regime and chemical composition of the plant material. High temperatures and intermittent hydrological regime accelerate decomposition, as they increase the activity of microorganisms. As decomposition significantly affects carbon fluxes, the knowledge on decomposition rate is particularly relevant in the light of climate change.

The decomposition process is mostly studied using plastic litter bags of different materials with pores of different sizes filled with dry plant litter. Two major decomposition surveys were carried out at Lake Cerknica; in the first one, common reed (*Phragmites australis*) was exposed in a predominantly dry, transitional, and predominantly flooded location and the decomposition rate and site conditions were monitored, and the content of some metals was measured before and after 4 months of decomposition. The study lasted 334 days. In addition, the survey with sedge (*Carex elata*) was carried out at predominantly dry location only. In the second, 45 days long study, the effect of leaf age, leaf litter origin and the location of exposure (dry, flooded) on the decomposition rate was studied.

The decomposition rate of common reed leaves was higher in comparison to the decomposition rate of stems, due to differences in the chemical and morphological properties of both structures. Decomposition was fastest in water and slowest in dry conditions. Leaf litter was decomposed in less than one year at the flooded location. Decomposition of common reed stems may take several years and became more intensive only about 250 days after exposure. Slow stems' decomposition results in accumulation of stem litter in the ecosystem.

Leaf litter decomposition rate and its element content were significantly influenced by sampling site, location of exposure and leaf age. Leaves of different origin had slightly different phosphorus (P), sulphur (S), chlorine (Cl), potassium (K), calcium (Ca) and titanium (Ti) contents and very different silicon (Si) contents that depended on leaf age and source location. Common reed is a Si accumulator. Even though Si is deposited at the leaf surface where it can form a thick layer, the Si layer did not affect the rate of leaf litter decomposition. However, studies showed a positive effect of leaf P content on leaf litter decomposition rate, but only at the dry location, which is probably related to the higher availability of P in water. The study of metal concentrations (K, Ca, Mn, Fe, Cr, Zn, Br and Sr) in the common reed leaf litter at Lake Cerknica showed accumulation of metals during decomposition process, including some toxic metals. According to the literature accumulation of metals occurs either due to deposition of fine sediment particles on the plant material, due to the process of accumulation in microorganisms, or due to their secretion of exopolysaccharides that can immobilise these elements.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212, preko financiranja mladih raziskovalcev 28500 in 39096 ter projekta eLTER – European Long-Term Ecosystem and Socio-Ecological Research Infrastructure, ki ga delno financira Evropska komisija.

Viri

- Aerts, R. 1997. Climate, Leaf Litter Chemistry and Leaf Litter Decomposition in Terrestrial Ecosystems: A Triangular Relationship. *Oikos*, 79(3), 439. <https://doi.org/10.2307/3546886>
- Alfredsson, H., Clymans, W., Stadmark, J., Conley, D., Rousk, J. 2016. Bacterial and fungal colonization and decomposition of submerged plant litter: consequences for biogenic silica dissolution. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(3), fiw011. <https://doi.org/10.1093/femsec/fiw011>
- Armstrong, J. Armstrong, W. 1988. *Phragmites australis* - A preliminary study of soil-oxidizing sites and internal gas transport pathways. *New Phytologist*, 108(4), 373–382. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1988.tb04177.x>
- Asaeda, T., Nam, L. H., Hietz, P., Tanaka, N., Karunaratne, S. 2002. Seasonal fluctuations in live and dead biomass of *Phragmites australis* as described by a growth and decomposition model: implications of duration of aerobic conditions for litter mineralization and sedimentation. *Aquatic Botany*, 73(3), 223–239. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(02\)00027-X](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(02)00027-X)
- Bärlocher, F. 1997. Pitfalls of traditional techniques when studying decomposition of vascular plant remains in aquatic habitats. *Limnetica*, 13(2), 1–11. <https://doi.org/10.23818/limn.13.10>
- Battle, J. M., Golladay, S. W. 2001. Hydroperiod influence on breakdown of leaf litter in cypress-gum wetlands. *The American Midland Naturalist*, 146, 128–145.
- Bedford, A. P. 2005. Decomposition of *Phragmites australis* litter in seasonally flooded and exposed areas of a managed reedbed. *Wetlands*, 25(3), 713–730.
- Bridgham, S. D., Lamberti, G. A. 2009. Ecological dynamics III: Decomposition in wetlands. V E. Maltby, T. Barker (ur.), *The Wetlands Handbook*, 1st edition, str. 326–345). Chichester. Blackwell Publishing Ltd.
- Brinson, M. M., Lugo, A. E., Brown, S. 1981. Primary productivity, decomposition and consumer activity in freshwater wetlands. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 12(1), 123–161. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.12.110181.001011>
- Brown, D. A. 1984. Prospects and limits of a phytolith key for grasses in the central United States. *Journal of Archaeological Science*, 11(4), 345–368. [https://doi.org/10.1016/0305-4403\(84\)90016-5](https://doi.org/10.1016/0305-4403(84)90016-5)
- Cronk, J. K., Fennessy, M. S. 2001. *Wetland plants* (1st edition). Boca Raton. CRC Press. 482 str. <https://doi.org/10.1201/9781420032925>
- Debusk, W. F., Reddy, K. R. 2005. Litter decomposition and nutrient dynamics in a phosphorus enriched everglades marsh. *Biogeochemistry*, 75(2), 217–240. <https://doi.org/10.1007/s10533-004-7113-0>
- Dolinar, N. 2013. Primarna proizvodnja, razgradnja in glivna kolonizacija izbranih rastlinskih vrst na presihajočem Cerkniškem jezeru : doktorska disertacija [Doctoral dissertation]. Ljubljana. Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta. 102 str.
- Dolinar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>

- Fennessy, M. S., Rokosch, A., Mack, J. J. 2008. Patterns of plant decomposition and nutrient cycling in natural and created wetlands. *Wetlands*, 28(2), 300–310. <https://doi.org/10.1672/06-97.1>
- Gessner, M. O. 2000. Breakdown and nutrient dynamics of submerged *Phragmites* shoots in the littoral zone of a temperate hardwater lake. *Aquatic Botany*, 66(1), 9–20. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00022-4](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00022-4)
- Grašič, M., Likar, M., Vogel-Mikuš, K., Samardžić, T., Gaberščik, A. 2022. Decomposition rate of common reed leaves depends on litter origin and exposure location characteristics. *Aquatic Botany*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103513>
- Gregorich, E. G., Janzen, H., Ellert, B. H., Helgason, B. L., Qian, B., Zebbarth, B. J., Angers, D. A., Beyaert, R. P., Drury, C. F., Duguid, S. D., May, W. E., McConkey, B. G., Dyck, M. F. 2017. Litter decay controlled by temperature, not soil properties, affecting future soil carbon. *Global Change Biology*, 23(4), 1725–1734. <https://doi.org/10.1111/gcb.13502>
- Hietz, P. 1992. Decomposition and nutrient dynamics of reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) litter in Lake Neusiedl, Austria. *Aquatic Botany*, 43(3), 211–230. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(92\)-90068-T](https://doi.org/10.1016/0304-3770(92)-90068-T)
- Jenny, H., Gessel, S. P., Bingham, F. T. 1949. Comparative study of decomposition rates of organic matter in temperate and tropical regions. *Soil Science*, 68(6), 419–432.
- Kuehn, K. A., Gessner, M. O., Wetzel, R. G., Suberkropp, K. 1999. Decomposition and CO₂ evolution from standing litter of the emergent macrophyte *Erianthus giganteus*. *Microbial Ecology*, 38(1), 50–57. <https://doi.org/10.1007/s002489900154>
- Lambers, H., Chapin, F. S., Pons, T. L. 2008. *Plant physiological ecology* (2nd edition). New York. Springer. 604 str.
- Likar, M., Dolinar, N., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A., Regvar, M. 2018. Elemental composition and fungal colonisation of decomposing *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. litter at different water regimes. *Acta Biologica Slovenica*, 61(2), 71–84. <https://doi.org/10.14720/abs.61.2.15896>
- Likar, M., Grašič, M., Stres, B., Regvar, M., Gaberščik, A. 2022. Original leaf colonisers shape fungal decomposer communities of *Phragmites australis* in intermittent habitats. *Journal of Fungi*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/jof8030284>
- Longhi, D., Bartoli, M., Viaroli, P. 2008. Decomposition of four macrophytes in wetland sediments: Organic matter and nutrient decay and associated benthic processes. *Aquatic Botany*, 89(3), 303–310. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2008.03.004>
- Lopes, M. L., Martins, P., Ricardo, F., Rodrigues, A. M., Quintino, V. 2011. In situ experimental decomposition studies in estuaries: A comparison of *Phragmites australis* and *Fucus vesiculosus*. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(4), 573–580. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2011.02.014>
- Nakamura, R., Cornelis, J.-T., de Tombeur, F., Yoshinaga, A., Nakagawa, M., Kitajima, K. 2020. Diversity of silicon release rates among tropical tree species during leaf-litter decomposition. *Geoderma*, 368, 114288. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114288>
- Petraglia, A., Cacciatori, C., Chelli, S., Fenu, G., Calderisi, G., Gargano, D., Abeli, T., Orsenigo, S., Carbog-nani, M. 2019. Litter decomposition: effects of temperature driven by soil moisture and vegetation type. *Plant and Soil*, 435(1–2), 187–200. <https://doi.org/10.1007/s11104-018-3889-x>
- Purchase, D., Scholes, L. N. L., Revitt, D. M., Shutes, R. B. E. 2009. Effects of temperature on metal tolerance and the accumulation of Zn and Pb by metal-tolerant fungi isolated from urban runoff treatment wetlands. *Journal of Applied Microbiology*, 106(4), 1163–1174. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2672.2008.04082.x>

- Ryder, D., Horwitz, P. 1995. Seasonal water regimes and leaf litter processing in a wetland on the Swan Coastal Plain, Western Australia. *Marine and Freshwater Research*, 46(7), 1077. <https://doi.org/10.1071/MF9951077>
- Schaller, J., Brackhage, C., Mkandawire, M., Dudel, E. G. 2011. Metal/metalloid accumulation/remobilization during aquatic litter decomposition in freshwater: A review. *Science of The Total Environment*, 409(23), 4891–4898. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.08.006>
- Strömberg, C. A. E., Di Stilio, V. S., Song, Z. 2016. Functions of phytoliths in vascular plants: an evolutionary perspective. *Functional Ecology*, 30(8), 1286–1297. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.12692>
- Van Ryckegem, G., Gessner, M. O., Verbeken, A. 2007. Fungi on leaf blades of *Phragmites australis* in a brackish tidal marsh: Diversity, Succession, and Leaf Decomposition. *Microbial Ecology*, 53(4), 600–611. <https://doi.org/10.1007/s00248-006-9132-y>
- Wallis, E., Raulings, E. 2011. Relationship between water regime and hummock-building by *Melaleuca ericifolia* and *Phragmites australis* in a brackish wetland. *Aquatic Botany*, 95(3), 182–188. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.05.006>
- Wang, S., Mulligan, C. N. 2009. Enhanced mobilization of arsenic and heavy metals from mine tailings by humic acid. *Chemosphere*, 74(2), 274–279. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.09.040>
- Webster, J. R., Benfield, E. F. 1986. Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1), 567–594. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.003031>
- Zawislanski, P. T., Chau, S., Mountford, H., Wong, H. C., Sears, T. C. 2001. Accumulation of selenium and trace metals on plant litter in a tidal marsh. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(5), 589–603. <https://doi.org/10.1006/ecss.2001.0772>

Mikrobne združbe na opadu navadnega trsta v različnih razmerah

Matevž Likar, Mateja Grašič, Alenka Gaberščik

Uvod

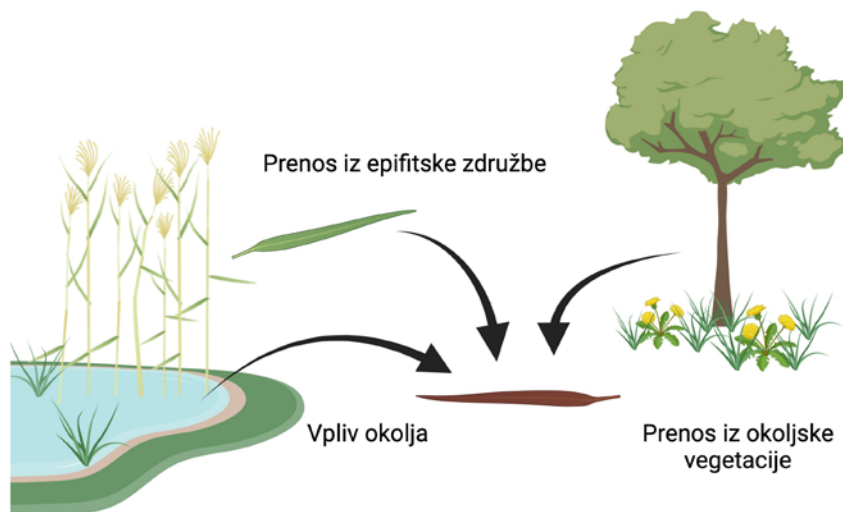
Navadni trst (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) po zaključku vegetacijske sezone pomembno pripeva h količini opada v ekosistemu. K opadu prispevajo vsi organi: koreninski sistem, stebela, listi, listne nožnice in socvetja. Raziskave so pokazale, da je hitrost razgradnje stebel in listov različna, saj opad stebel lahko na območju jezera ostaja več let, medtem ko se listi razgradijo v manj kot enem letu (Dolinar in sod., 2016). Hitrost razgradnje je odvisna od značilnosti lokacije, kjer poteka razgradnja. V presihajočih mokriščih je to količina vode (Bedford, 2005; Grašič in sod., 2022), ki lahko vpliva na razpoložljivost kisika in vlage, ki sta potrebna za aerobno razgradnjo. Zato sta najpomembnejša dejavnika, ki vplivata na proces razgradnje, pogostost in trajanje poplavljanja (Langhans Tockner, 2006; Dolinar in sod., 2016). Na bolj suhih lokacijah, kjer je kisika dovolj, poplavljanje pospeši razgradnjo, medtem ko daljša potopitev opada ustvari anoksične razmere, ki lahko močno upočasnijo razgradnjo (Neckles in Neill, 1994). Velika pogostost poplav prav tako poveča hitrost razgradnje, saj ugodno vpliva na združbe gliv, ki naseljujejo rastlinski opad (Capps in sod., 2011).

Značilnosti združb razkrojevalcev in njihova vloga pri razgradnji opada so še neraziskane, čeprav imajo te združbe ključno vlogo pri kroženju ogljika in nastajanju tal v ekosistemu. Raziskave so pokazale pomembno vlogo tako bakterij kot tudi gliv v vseh fazah razgradnje (Da Boer in sod., 2010). Glive pogosto izrabljajo bolj kompleksne vire ogljika, medtem ko se bakterije hitro odzovejo na povečano razpoložljivost virov in izrabljajo lahko dostopne, labilne ogljikove vire (Brant in sod., 2006; Reischke in sod., 2014).

Mikrobna kolonizacija močvirskih rastlin se začne, ko so listi še na rastlinah, ki stojijo pokonci (Van Rycekgem in Verbeken, 2005; Kuehn in sod., 2011). Spremembe v mikrobni kolonizaciji in njihovi aktivnosti se pojavijo, ko se rastlinski material nabira na tleh, predvsem zaradi sprememb okoljskih dejavnikov, in sicer razpoložljivosti kisika, vlage, temperature in biotskih interakcij, ki določajo razvoj mikrobne skupnosti in se bistveno spreminjajo (Bedford, 2005). Na razvoj mikrobne združbe na opadu poleg okoljskih razmer vplivajo tudi združbe, ki so prisotne na svežih listih in na okoljski vegetaciji (slika 1).

Za napovedovanje dinamike razgradnje opada navadnega trsta v presihajočih jezerih je zelo pomembno poznavanje vpliva različnih okoljskih razmer na bogastvo in raznolikost združb na svežih listih in opadu. Cerkniško jezero je zaradi spremenljivih razmer izjemen sistem za proučevanje različnih medsebojnih vplivov med različnimi skupinami razkrojevalcev in okoljem. Na Cerkniškem jezeru sta potekala dva poskusa razgradnje. V prvem poskusu je bil opad izpostavljen na hidrološkem gradientu (suhi, prehodni in vodni lokaciji). Glivne združbe so bile karakterizirane s pomnoževanjem ITS rDNA in elektroforezo v temperaturnem gradientu (TTGE, angl. *temporal temperature gel electrophoresis*) pred in 7 mesecev po izpostavitvi (Dolinar in sod., 2016). V drugem poskusu je bil opad 45 dni izpostavljen suhim in vodnim razmeram. Glivne in bakterijske združbe, ki so bile prisotne na izvirnem (svežem) materialu listov in na razkrajajočem se listnem opadu različno starih listov z različnih lokacij, so bile karakterizirane z metodo naključnega hi-

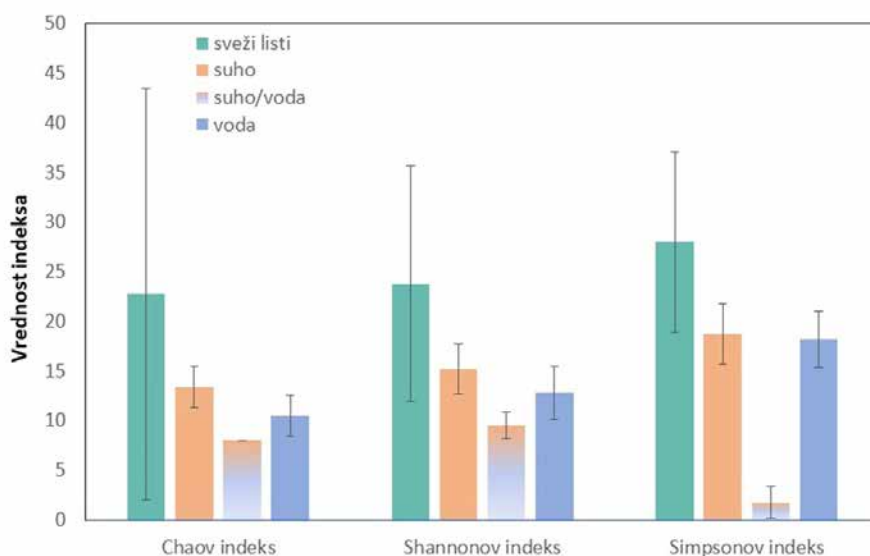
trega sekvenciranja (angl. *shotgun sequencing*) (Likar in sod., 2022; 2023). Glavni cilji raziskav mikrobnih združb na opadu navadnega trsta na Cerkniškem jezeru so bili oceniti vpliv vodnega režima na mikrobne združbe, predvsem na raznolikost, zgradbo in funkcionalnost združb, opisati interakcije med taksoni v združbah ter določiti indikatorske in ključne taksoni, ki lahko v različnih okoljskih razmerah vplivajo na raznolikost mikrobnih združb med procesom razgradnje.



Slika 1: Shematski prikaz dejavnikov, ki vplivajo na oblikovanje mikrobne združbe razkrojevalcev na opadu.

Glivne združbe opada na hidrološkem gradientu

Ocene bogastva in raznolikosti glivnih združb glede na aktivne taksonomske enote (OTU, angl. *operational taxonomic units*) so pokazale največje bogastvo in raznovrstnost OTU v izvornem materialu navadnega trsta. Oba parametra sta se zmanjšala med procesom razgradnje na vseh lokacijah hidrološkega gradienta (slika 2) (Dolinar in sod., 2016).



Slika 2: Vrsta pestrost (Chaov indeks) ter indeksa pestrosti za glivne združbe na svežih listih navadnega trsta (*Phragmites australis*) in njihovega opada po sedmih mesecih razgradnje na različnih lokacijah.

Nekatere OTU, ki niso bile prisotne v izvornem rastlinskem materialu, so bile kasneje z veliko zastopanostjo najdene v vseh vzorcih. Prav tako nekatere OTU niso bile najdene v vzorcih v popolnoma potopljenih ali prehodnih razmerah. Ena OTU je bila najdena le v začetnem materialu (Likar in sod., 2018). Razlike v združbah gliv zaradi spremembe presnovnih procesov lahko povzročijo spremembe v hitrosti razgradnje (Webster in Benfield, 1986). To kažejo tudi raziskave Dolinarjeve in sod. (2016), ki so ugotovili, da je bila hitrost razgradnje listov hitrejša v vodi v primerjavi s prehodnimi razmerami. Kuehn s sodelavci (Kuehn in sod., 2014) ugotavljajo, da lahko v vodnem okolju perifronske alge, ki se naselijo na opadu, stimulirajo mikrobne heterotrofe, še posebej glive, kar se lahko odraža v hitrejši razgradnji. Poleg tega je pomembna tudi dostopnost hranil. Mikrobi lahko pridobivajo hranila tako iz organskega substrata kot iz vode. Hranila v vodi so v neorganski obliki, zato mikrobi potrebujejo manj energije za njihov privzem (Gulis in Suberkropp, 2003). Različne lastnosti mesta izpostavljenosti vplivajo na tekmovalna razmerja med glivami, kar se lahko odraža v deležih posameznih taksonov.

Glivne združbe glede na lokacijo, starost in habitatne razmere

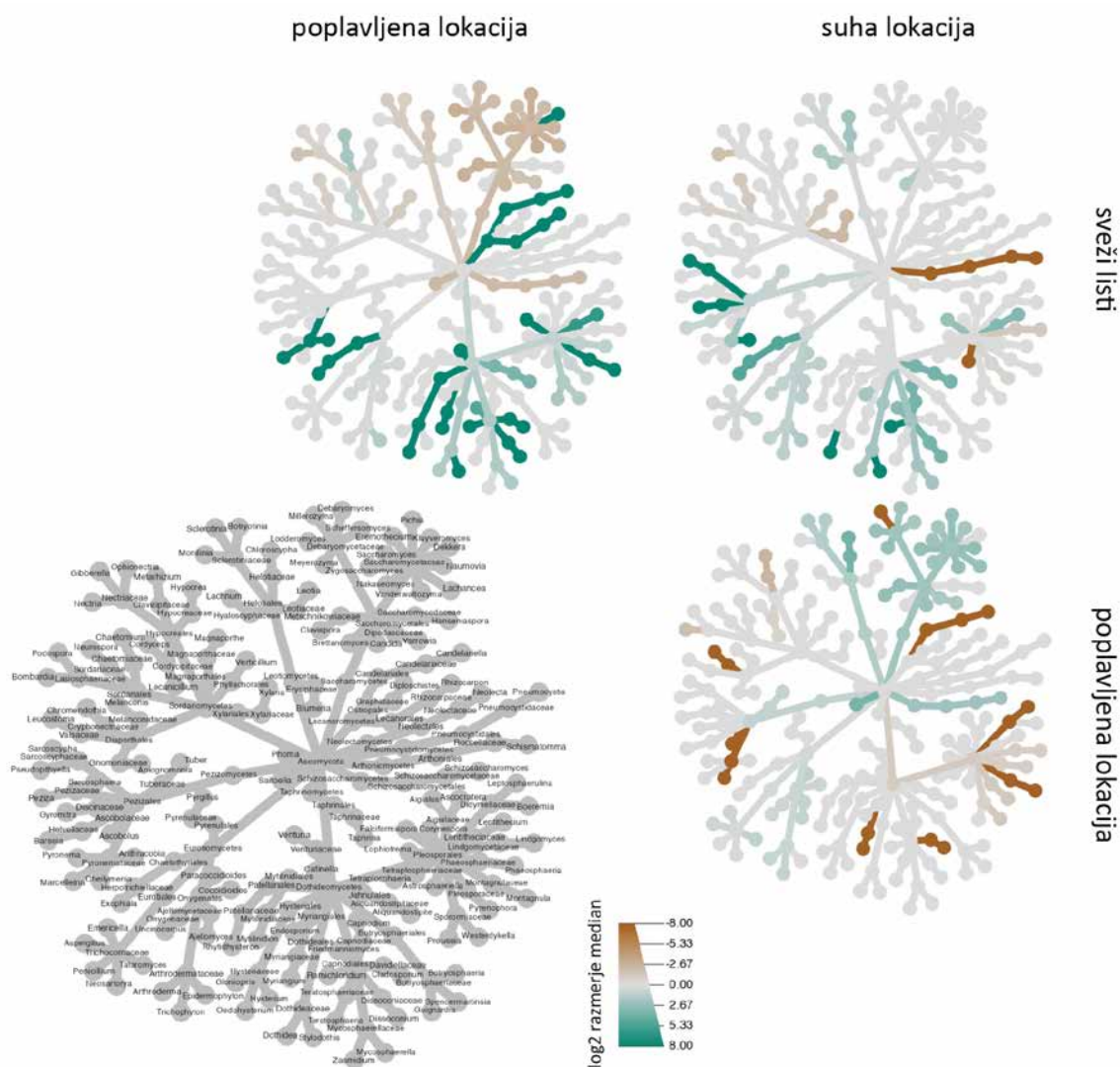
Analiza glivne združbe glede na lokacijo, starost in habitatne razmere je pokazala, da izvorna lokacija rastlin, ki so bile nabrane na območju osrednjega dela jezera (Zadnji kraj) in ob Strženu (Gorenje Jezero), ter položaj listov na rastlini in s tem njihova starost niso vplivali na sestavo združbe gliv. Hkrati pa so se združbe gliv iz svežih listov in listov, ki so se razgrajevali v vodnih in suhih razmerah, med seboj razlikovale (Likar in sod., 2022). Kazalniki raznolikosti in bogastva so pokazali manjšo raznolikost glivnih združb opada v vodnih razmerah. V primeru svežih listov in opada, izpostavljenega suhim razmeram, pa sta bili raznolikost in bogastvo združb gliv podobni. Listi navadnega trsta so vsebovali vsaj pet različnih debel gliv, med katerimi so prevladovali predstavniki iz debla Ascomycota (95,7 %) in manj zastopani predstavniki debla Basidiomycota (4,1 %). Po 45 dneh razgradnje so kazalniki raznolikosti in bogastva glivnih združb pokazali manjšo raznolikost na listih, ki so se razgrajevali v poplavljenih razmerah (Likar in sod., 2022). Glivne združbe so bile bolj raznolike v stabilnejših razmerah (suhih ali poplavljenih) v primerjavi s spreminjajočimi se razmerami (Likar in sod., 2018). Glive so pripadale različnim ekološkim skupinam; največ je bilo saprotrofov (48,6 %), sledili pa so patotrofi (22,5 %) in simbiotrofi (12,6 %).

Bazidiomicete proizvajajo encime, potrebne za razgradnjo kompleksnih polimerov, in so zato pomembne v procesu pozne razgradnje opada (Baldrian in Valášková, 2008). Med štirimi indikatorskimi rodovi na svežih listih sta bila poleg patotrofov iz rodov *Chrysomyxa* in *Exophiala* identificirana dva rodova saprotrofov, *Capnodium* in *Neosartorya* (Likar in sod., 2022). Rod *Capnodium* je bil tudi indikatorski rod za opad, ki je izhajal iz jezerske lokacije (Zadnji kraj), kjer je trst pogosto izpostavljen dolgotrajnim sušnim obdobjem, ki zmanjšajo njegovo vitalnost in povečajo ranljivost za patogene (Dolinar in sod., 2016). V poplavljenem habitatu je verjetno zaradi prisotnosti patogenov prišlo do premika indikatorskih rodov gliv k nekrotrofom (*Sclerotinia* in *Botryotinia*). Pri primerjavi razgradnje opada na suhem oziroma v vodi (Likar in sod., 2022) smo opazili razlike v sestavi združbe od ravni rodu pa vse do ravni razreda (sliki 3 in 4). Med razgradnjo listnega opada trsta poteka sukcesija glivnih združb, ki si sledijo skozi različne stopnje razgradnje (Vivelo in Bhatnagar, 2019). Večja pogostost pojavljanja razlik lahko povzroči motnje v procesu oblikovanja glivnih združb in posledično upočasnijo razgradnjo listnega opada.

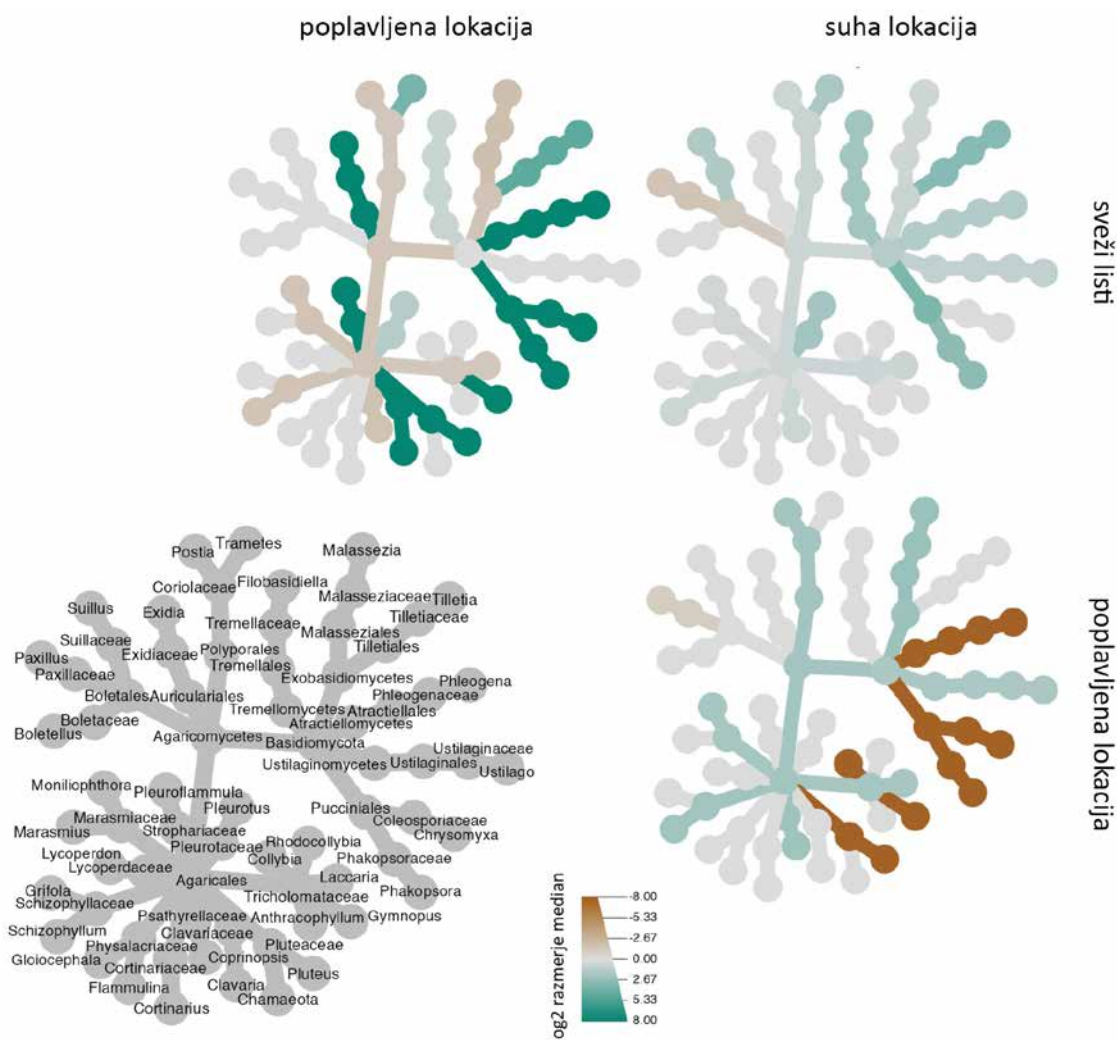
Pet OTU je bilo izbranih za ključne v mreži povezav med glivnimi predstavniki na svežih listih in deset OTU na opadu v vodnem habitatu. Nasprotno pa je bila v mreži povezav v opadu v suhem

habitatu opredeljena le ena ključna OTU. Rod *Talaromyces* je bil v vseh omrežjih opredeljen kot ključna vrsta. Drugih devet ključnih OTU je bilo občutljivih na specifične razmere v vodnem habitatu, kar kaže, da habitat močno vpliva na oblikovanje združb gliv prav preko ključnih rodov (Likar in sod., 2022). Rodova *Talaromyces* in *Uncinocarpus* – ključna OTU na svežih listih – sta bila prav tako opredeljena kot ključna OTU v listih, ki so se razgrajevali v vodnem habitatu. Vsi identificirani ključni rodovi so pomembni za razgradnjo celuloze (Fujii in sod., 2014).

Večina korelacij med OTU gliv v svežih in razkrajajočih se listih navadnega trsta je odražala sočasno pojavljanje (pozitivne korelacije) (Likar in sod., 2022). Prevlada pozitivnih povezav kaže na to, da lahko večina rodov gliv deluje sinergistično ali si deli podobne ekološke niše (Zhang in sod., 2018).



Slika 3: Primerjava povečanja ali zmanjšanja zastopanosti posameznih glivnih taksonov bazidiomicet na svežih listih trsta (*Phragmites australis*) in listih, izpostavljenih razgradnji v poplavljenem in suhem habitatu. Zelena barva označuje zmanjšanje abundance taksonov, rjava pa povečanje njihove abundance v primerjavi med obravnavanji. V spodnjem levem kotu so veje dreves označene z ustrezno taksonomsko skupino, ki jo predstavljajo.



Slika 4: Primerjava povečanja ali zmanjšanja zastopanosti posameznih glivnih taksonov askomicet na svežih listih trst (*Phragmites australis*) in listih, izpostavljenih razgradnji v poplavljenem in suhem habitatu. Zelena barva označuje zmanjšanje abundance taksonov, rjava pa povečanje njihove abundance v primerjavi med obravnavanji. V spodnjem levem kotu so veje dreves označene z ustrezno taksonomsko skupino, ki jo predstavljajo.

Analiza (Likar in sod., 2023a), ki je zajela tako glivne kot bakterijske taksone, kaže, da je večina mikrobnih taksonov v proučevanem sistemu ekosistem/rastlinski gostitelj nevtravno razporejenih in so se v združbi pojavili naključno zaradi njihove številčnosti v okoliški metaskupnosti in izvornem bazenu. To pa ne pomeni, da so taksoni funkcionalno nepomembni, kar se je pokazalo pri analizi metabolnih funkcij v mikrobnih združbah.

Vpliv habitata razgradnje na funkcionalne poteze mikrobnih združb opada

Primerjava bakterijskih združb je pokazala, da se je funkcionalna α -diverziteta med združbami na svežih listih in združbami na razkrajajočih se listih v različnih habitatih bistveno razlikovala in je bila najmanjša v primeru združb na svežih listih. Pri glivnih združbah ni bilo opaziti razlik v funkcionalni α -diverziteti med svežimi listi in opadom, izpostavljenem v vodnem habitatu. Največjo funkcionalno raznolikost so kazale združbe gliv na opadu v suhem habitatu, ki so se

značilno razlikovale od združb v vodnem habitatu in na svežih listih. Bakterijske in glivne združbe so v času razgradnje (od svežih listov do opada po 45 dneh) povečale funkcionalno α -diverzitetu, razen združb gliv na opadu v vodnem habitatu (Likar in sod., 2023b). Ferreira in sod. (2016) so dokazali, da se s postopnim staranjem variabilnost mikrobov v fitosferi postopoma povečuje.

V primeru analize bakterijskih združb je bilo največje število odčitkov zabeleženo pri presnovi beljakovin, ogljikovih hidratov ter aminokislin in njihovih derivatov. To velja tako za sveže liste kot za opad. Kljub podobnim splošnim vzorcem med obravnavami se je številčnost posameznih funkcionalnih razredov v razkrajajočih se listih (v primerjavi s svežimi) povečala ali zmanjšala. Največje zmanjšanje v vodnem habitatu je bilo opaženo pri funkcionalni kategoriji fotosinteza, največje povečanje pa pri funkcionalni kategoriji presnova dušika. Metabolizem dušika se je še bolj povečal v suhem habitatu. V primeru glivnih združb redundantna analiza ni pokazala ločitve funkcionalnih združb na svežih listih in opadu. Največje število odčitkov na svežih listih je bilo opaženo za funkcionalno kategorijo dihanje, pri opadu pa za presnovo ogljikovih hidratov (Likar in sod., 2023b). Manjše razlike med različnimi okolji pri glivah so lahko posledica različnega odziva glivnih in bakterijskih združb na okoljske dejavnike in njihove interakcije (Habtewold in sod., 2020) ali vpliva okoliške vegetacije, ki poveča razširjanje gliv in tako poenoti združbe, ne glede na obravnavo (Redondo in sod., 2020). Čeprav dolgotrajna potopitev negativno vpliva na več funkcionalnih lastnosti v združbi gliv, to ni vplivalo na hitrost razgradnje. Funkcionalni kazalniki za ogljikove hidrate ter presnovo beljakovin, aminokislin in njihovih derivatov kažejo na povečano vlaganje mikroorganizmov v razgradnjo opada ter v asimilacijo snovi v mikrobni združbah.

Zaključek

Mikrobna kolonizacija močvirskih rastlin se začne, ko so listi še na rastlinah, ki stojijo pokonci. Viri gradnikov mikrobne združbe razkrojevalcev na opadu so okolje, izvorna rastlinska vrsta in druga vegetacija na območju. Ocene bogastva in raznolikosti glivnih združb glede na aktivne taksonomske enote so pokazale največje bogastvo in raznovrstnost združb na svežih listih navadnega trsta. Oba parametra sta se zmanjšala med procesom razgradnje na vseh lokacijah hidrološkega gradienta. Hitrost razgradnje listov je večja v vodi v primerjavi s prehodnimi razmerami. Izvorna lokacija rastlin ter položaj listov na rastlini in s tem njihova starost niso vplivali na sestavo združbe gliv. Večina korelacij med aktivnimi taksonomskimi enotami gliv v svežih in razkrajajočih se listih navadnega trsta je odražala sočasno pojavljanje. Prevlada pozitivnih povezav kaže na to, da lahko večina rodov gliv deluje sinergistično ali si deli podobne ekološke niše. Pri bakterijskih skupnostih je bila funkcionalna α -diverziteta najmanjša pri svežih listih. Bakterijske in glivne združbe so v času razgradnje povečale funkcionalno α -diverzitetu, razen združb gliv v vodnem habitatu. V primeru bakterijskih združb je bilo največje število odčitkov zabeleženo pri funkcionalnih kategorijah presnova beljakovin, ogljikovih hidratov ter aminokislin in njihovih derivatov. V primeru glivnih združb je bilo največje število odčitkov na svežih listih opaženo za funkcionalno kategorijo dihanje, pri opadu pa za funkcionalno kategorijo presnova ogljikovih hidratov.

Summary

Microbial communities on common reed under different conditions

Two decomposition experiments have been carried out on Lake Cerknica. In the first experiment, plant litter was exposed on a hydrological gradient. Fungal communities were characte-

rised by ITS rDNA amplification and temporal temperature gradient gel electrophoresis (TTGE) before and 7 months after exposure. In the second experiment, plant litter was exposed to dry and aquatic habitat conditions for 45 days. Fungal and bacterial communities present on the original (fresh) leaf material and on the decomposing leaf litter of different ages from different locations were characterised by shotgun sequencing.

Assessments of richness and diversity of fungal communities based on operational taxonomic units showed the highest richness and diversity of the community that developed on fresh leaves, which decreased during the decomposition process at all locations along the hydrological gradient. Differences in fungal communities cause changes in metabolic processes that affect decomposition rates. The rate of leaf decomposition was faster under wet conditions compared to transitional conditions since in water, periphyton algae colonising leaf litter may stimulate microbial heterotrophs, and microbes may obtain nutrients from organic substrate and water.

The second survey revealed that the original location of plant material and leaf age did not influence the composition of fungal community. Fungal communities from fresh leaves and litter decomposing in aquatic and dry conditions differed from each other. Diversity and richness indices showed a lower diversity of fungal communities of litter in water, while the community that developed on fresh leaves and leaf litter exposed to dry conditions showed similar diversity and richness. Fungal communities were dominated by members of the phylum Ascomycota. The fungi belonged to different ecological groups: saprotrophs (48.6%), pathotrophs (22.5%), and symbiotrophs (12.6%). Basidiomycete species produce enzymes that are necessary for the degradation of complex polymers and are important in the later stages of decomposition. Among the four indicator genera on fresh leaves, two saprotrophic genera, *Capnodium* and *Neosartorya*, were identified in addition to pathotrophs from the genera *Chrysomyxa* and *Exophiala*. *Capnodium* was an indicator genus for the community that developed on the litter that originated from a lacustrine site (Zadnji kraj), where reed is often exposed to prolonged periods of drought, which reduce its vigour. Only one key operational taxonomic unit has been identified in the network of linkages in the dry habitat. The genus *Talaromyces* was identified as a key genus in all microbial networks. The other nine key operational taxonomic units were sensitive to specific conditions in the aquatic habitat, indicating that habitat strongly influences the formation of fungal communities specifically through key taxa. All the key taxa identified are able to degrade cellulose.

In the bacterial communities, functional α -diversity differed significantly between the community that developed on fresh leaves and the leaves growing in different habitats and was lowest in the community of fresh leaves. For fungal communities, no differences in functional α -diversity were observed between the fresh leaves and litter exposed to the aquatic conditions. The highest functional diversity was found in fungal communities on the litter from the dry habitat, which were significantly different from those in the aquatic habitat and fresh leaves. Bacterial and fungal communities increased functional α -diversity during the decomposition period, except for the fungal communities in aquatic habitat. In the bacterial communities, the highest number of readings in all samples was recorded for the functional categories metabolism of proteins, carbohydrates, and amino acids and their derivatives. The largest decrease in readings of litter from the aquatic habitat was observed for the functional category photosynthesis, while the largest increase was observed for the functional category nitrogen metabolism. In the case of fungal communities, redundancy analysis showed no separation of functional communities of fresh leaves and litter. The highest number of readings on the fresh leaves was observed for the functional category respiration, while the highest number of rea-

dings for the functional category carbohydrate metabolism was observed in leaf litter. Although long-term submergence negatively affected several functional traits in the fungal assemblage, the rate of decomposition was not affected.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212.

Viri

- Baldrian, P., Valášková, V. 2008. Degradation of cellulose by basidiomycetous fungi. *FEMS Microbiology Reviews*, 32(3), 501–521. <https://doi.org/10.1111/j.1574-6976.2008.00106.x>
- Bedford, A. P. 2005. Decomposition of *Phragmites australis* litter in seasonally flooded and exposed areas of a managed reedbed. *Wetlands*, 25(3), 713–730.
- Brant, J. B., Sulzman, E. W., Myrold, D. D. 2006. Microbial community utilization of added carbon substrates in response to long-term carbon input manipulation. *Soil Biology and Biochemistry*, 38(8), 2219–2232. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2006.01.022>
- Capps, K. A., Graça, M. A. S., Encalada, A. C., Flecker, A. S. 2011. Leaf-litter decomposition across three flooding regimes in a seasonally flooded Amazonian watershed. *Journal of Tropical Ecology*, 27(2), 205–210. <https://doi.org/10.1017/S0266467410000635>
- Da Boer, W., Folman, L. B., Klein Gunnewiek, P. J. A., Svensson, T., Bastviken, D., Öberg, G., del Rio, J. C., Boddy, L. 2010. Mechanism of antibacterial activity of the white-rot fungus *Hypholoma fasciculare* colonizing wood. *Canadian Journal of Microbiology*, 56, 380–388.
- Dolinar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>
- Ferreira, V., Raposeiro, P. M., Pereira, A., Cruz, A. M., Costa, A. C., Graça, M. A. S., Gonçalves, V. 2016. Leaf litter decomposition in remote oceanic island streams is driven by microbes and depends on litter quality and environmental conditions. *Freshwater Biology*, 61(5), 783–799. <https://doi.org/10.1111/fwb.12749>
- Fujii, T., Hoshino, T., Inoue, H., Yano, S. 2014. Taxonomic revision of the cellulose-degrading fungus *Acremonium cellulolyticus* nomen nudum to *Talaromyces* based on phylogenetic analysis. *FEMS Microbiology Letters*, 351(1), 32–41. <https://doi.org/10.1111/1574-6968.12352>
- Grašič, M., Likar, M., Vogel-Mikuš, K., Samardžić, T., Gaberščik, A. 2022. Decomposition rate of common reed leaves depends on litter origin and exposure location characteristics. *Aquatic Botany*, 179. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2022.103513>
- Gulis, V., Suberkropp, K. 2003. Leaf litter decomposition and microbial activity in nutrient-enriched and unaltered reaches of a headwater stream. *Freshwater Biology*, 48(1), 123–134. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2003.00985.x>
- Habtewold, J. Z., Helgason, B. L., Yanni, S. F., Janzen, H. H., Ellert, B. H., Gregorich, E. G. 2020. Litter composition has stronger influence on the structure of soil fungal than bacterial communities. *European Journal of Soil Biology*, 98, 103190. <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2020.103190>
- Kuehn, K. A., Francoeur, S. N., Findlay, R. H., Neely, R. K. 2014. Priming in the microbial landscape: periphytic algal stimulation of litter-associated microbial decomposers. *Ecology*, 95(3), 749–762. <https://doi.org/10.1890/13-0430.1>

- Kuehn, K. A., Ohsowski, B. M., Francoeur, S. N., Neely, R. K. 2011. Contributions of fungi to carbon flow and nutrient cycling from standing dead *Typha angustifolia* leaf litter in a temperate freshwater marsh. *Limnology and Oceanography*, 56(2), 529–539. <https://doi.org/10.4319/lo.2011.56.2.0529>
- Langhans, S. D., Tockner, K. 2006. The role of timing, duration, and frequency of inundation in controlling leaf litter decomposition in a river-floodplain ecosystem (Tagliamento, northeastern Italy). *Oecologia*, 147(3), 501–509. <https://doi.org/10.1007/s00442-005-0282-2>
- Likar, M., Dolinar, N., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A., Regvar, M. 2018. Elemental composition and fungal colonisation of decomposing *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. litter at different water regimes. *Acta Biologica Slovenica*, 61(2), 71–84. <https://doi.org/10.14720/abs.61.2.15896>
- Likar, M., Grašič, M., Stres, B., Regvar, M., Gaberščik, A. 2022. Original leaf colonisers shape fungal decomposer communities of *Phragmites australis* in intermittent habitats. *Journal of Fungi*, 8(3). <https://doi.org/10.3390/jof8030284>
- Likar, M., Grašič, M., Gaberščik, A. 2023a. Contribution of neutral processes to the assembly of microbial communities on *Phragmites australis* leaf litter. *Acta Biologica Slovenica*, 66(2), 16–25.
- Likar, M., Grašič, M., Stres, B., Regvar, M., Gaberščik, A. 2023b. Metagenomics reveals effects of fluctuating water conditions on functional pathways in plant litter microbial community. *Scientific Reports*, 13(1), 21741. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-49044-x>
- Neckles, H. A., Neill, C. 1994. Hydrologic control of litter decomposition in seasonally flooded prairie marshes. *Hydrobiologia*, 286(3), 155–165. <https://doi.org/10.1007/BF00006247>
- Ojdanič, N., Holcar, M., Golob, A., Gaberščik, A. 2023. Environmental extremes affect productivity and habitus of common reed in intermittent wetland. *Ecological Engineering*, 189, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106911>
- Redondo, M. A., Berlin, A., Boberg, J., Oliva, J. 2020. Vegetation type determines spore deposition within a forest-agricultural mosaic landscape. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(6). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa082>
- Reischke, S., Rousk, J., Bååth, E. 2014. The effects of glucose loading rates on bacterial and fungal growth in soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 70, 88–95. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.011>
- Van Rycekgem, G., Verbeken, A. 2005. Fungal ecology and succession on *Phragmites australis* in a brackish tidal marsh. *Fungal Divers*, 19, 157–187.
- Vivelo, S., Bhatnagar, J. M. 2019. An evolutionary signal to fungal succession during plant litter decay. *FEMS Microbiology Ecology*, 95(10). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiz145>
- Webster, J. R., Benfield, E. F. 1986. Vascular plant breakdown in freshwater ecosystems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 17(1), 567–594. <https://doi.org/10.1146/annurev.es.17.110186.003031>
- Zhang, B., Zhang, J., Liu, Y., Shi, P., Wei, G. 2018. Co-occurrence patterns of soybean rhizosphere microbiome at a continental scale. *Soil Biology and Biochemistry*, 118, 178–186. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.12.011>

Optične lastnosti rastlin – od vrste do ekosistema

Nik Ojdanič, Katja Klančnik, Primož Gnezda, Igor Zelnik, Aleksandra Golob, Alenka Gaberščik

Sončevo sevanje omogoča delovanje večine ekosistemov, vključno z mokrišči, saj predstavlja primarni vir energije, ki ga rastline kopičijo v procesu fotosinteze. Obenem predstavlja vir toplote, je pomemben vir informacij o okolju, lahko pa deluje tudi kot stresor. Usoda sevanja v ekosistemu je odvisna od zgradbe ekosistema, predvsem od celovitosti rastlinske združbe. V ekosistemi, kjer je pokritost tal z rastlinami 100 %, večino sevanja absorbirajo različni rastlinski organi, medtem ko del sevanja lahko prodre skozi sesto ali pa se odbije od rastlinske površine, le majhen delež pa doseže tla sestoja (Ustin in Gamon, 2010). Lastnosti vrst in listov so tesno povezane z okoljskimi razmerami v habitatu in rastlini omogočajo optimizacijo rabe virov in sončeve energije ter preprečujejo poškodbe zaradi prekomernega sevanja (Larcher, 2003). V nekaterih ekosistemi, kot je na primer Cerkniško jezero, imajo nekatere rastline veliko fenotipsko plastičnost in lahko svoje morfološke, anatomske, biokemijske in funkcionalne lastnosti razvijejo glede na trenutne okoljske razmere (Robe in Griffiths, 2000; Klančnik in sod., 2012). Posebej zanimive so amfibijske rastline, ki zaradi izjemne fenotipske plastičnosti in spreminjanja okolja v katerem živijo (v vodi in na kopnem), predstavljajo odličen modelni sistem za opazovanje različnih odzivov in prilagoditev, tudi tistih povezanih s prestrezanjem sevanja (Klančnik in sod., 2014a).

Naloga listov je, da prestrežejo kar največ fotosintezno aktivnega sevanja, in ob tem ne utrpijo poškodb zaradi prekomernega vidnega sevanja in škodljivega kratkovalovnega sevanja. Usoda fotonov ob stiku z listno površino je odvisna od njihove valovne dolžine, anatomske in biokemijske značilnosti lista ter vsebnosti vode v tkivih (Woolley, 1971; Yoshimura in sod., 2010; Buschmann in sod., 2012; Klančnik in sod., 2014a; Klančnik in sod., 2014b). Rezultat lastnosti lista so odbojnost/refleksivnost $\rho(\lambda)$, absorptivnost $\alpha(\lambda)$ in prepustnost/transmisivnost $\tau(\lambda)$, ki predstavljajo optične lastnosti lista. Razmerje med komponentami optičnih lastnosti opisuje enačba:

$$\rho(\lambda) + \tau(\lambda) + \alpha(\lambda) = 1, \quad \dots(1)$$

kjer velja da sta odbojnost in prepustnost obratno sorazmerni z absorptivnostjo (Liew in sod., 2008). Rastline večino kratkovalovnega ultravijoličnega (UV) sevanja absorbirajo. Voskasta kutikula, zunanje plasti povrhnjice s suberinom in fenolne substance prisotne v celicah povrhnjice, prestrezajo UV sevanje, tako da največ 2–5 %, navadno pa manj kot 1 % UV sevanja doseže globlje plasti lista (Reiderer in Müller, 2006). Zaradi velike absorpcije v zgornji plasti, je prepustnost kratkovalovnega UV sevanja (prehajanje skozi list) majhna, kar preprečuje poškodbe listne sredice. Majhna je tudi odbojnost, ki redko presega 10 %, prepustnost pa je praktično zanemarljiva (Yoshimura in sod., 2010). Absorpcija je navadno največja v modrem (z viškom okrog 450 nm) in rdečem delu spektra (z viškom okrog 680 nm), najmanjša pa v zelenem delu spektra (z viškom okrog 550 nm) (Klančnik in sod., 2012; Klančnik in sod., 2014a). Velika absorpcija v rdečem in modrem delu je odvisna predvsem od vsebnosti klorofilov (*a* in *b*), ksantofilov in karotenov (Baltzer in Thomas, 2005). K absorpciji sevanja v modrem delu spektra delno prispevajo tudi antocianini, ki pa znatno povečajo absorpcijo sevanja v zelenem in rumenem delu spektra (Neill in Gould, 2003). V splošnem listi odbijejo le 5–15 % fotosintezno aktivnega dela sevanja (PAR) (Reiderer in Müller, 2006). Z daljšanjem valovnih dolžin, se v infrardečem (IR) delu spektra absorpcija sevanja znatno spremeni. V bližnjem IR delu spektra (700–1300 nm), se absorpcija

sevanja zmanjša na le nekaj odstotkov, na drugi strani se odbojnost in prepustnost povečata in skupaj približata 100 % (Knippling, 1970). Pri valovnih dolžinah okoli 1000 in 1200 nm, se odbojnost in prepustnost nekoliko zmanjšata na račun povečane absorpcije v vodnih molekulah v listih (Gao in Goetz, 1995). Ostale sestavine tkiv, kot so celuloza, lignin in proteini, pa absorbirajo pri valovnih dolžinah daljših od 1500 nm (DuBois in sod., 2018). Razlike v vsebnosti vode in zgradbi mezofila navadno povzročajo največje razlike med spektralnimi krivuljami različnih listov v predelu IR sevanja (Artigas in Yang, 2005).

Sevanje, ki se odbija od rastlin, oz. rastlinskih sestojev, je lahko osnova za razumevanje njihove vitalnosti in delovanja (Asner in Martin, 2008). Informacija o odbojnosti določenih valovnih dolžin odraža fotosintezno dejavnost in energijske bilance listov, njihovih biokemijskih lastnosti ter vsebnosti hranil in vode (Baltzer in Thomas, 2005; Levizou in sod., 2005; Castro in Sanchez-Azofeifa, 2008), lahko služi kot orodje za ugotavljanje stresa (Gitelson in sod., 2002), v nekaterih primerih pa omogoča tudi prepoznavanje vrst (Ullah in sod., 2012).

Spremljanje odbojnih spektrov lahko poteka na različnih ravneh, z neposrednimi meritvami odbojnosti in presevnosti listov ali z daljinskim zaznavanjem. Daljinsko zaznavanje vključuje dve vrsti spektroskopije: „terenska spektroskopija“ (angl. *field spectroscopy*), ki temelji na meritvah v sestoju ali v njegovi bližini (Klančnik in sod., 2015a), in „slikovna spektroskopija“ (angl. *imaging spectroscopy*), ki je zaznavanje spektrov na daljavo (npr. z letal ali satelitov) (Gao in sod., 2009). V primerjavi z neposrednimi meritvami optičnih lastnosti listov in sestojev, ki so razmeroma zahtevne, daljinsko zaznavanje omogoča raziskovanje in spremljanje razmeroma velikih pa tudi nedostopnih območij, kot so mokrišča, ter primerjavo podatkov v času in prostoru (Ollinger, 2011). Za interpretacijo teh podatkov pa je neobhodno potrebno poznavanje optičnih lastnosti, nižjih ravni sistemov od spektralnih podpisov listov različnih vrst rastlin do spektralnih podpisov sestojev. Obenem je treba vzpostaviti tako imenovane „spektralne knjižnice“ oziroma baze podatkov. Zaradi celovitosti in občasne nedostopnosti različnih območij, pa tudi zaradi različnih znanstvenih ciljev, so raziskave na Cerkniskem jezeru vključevale različne ravni merjenja optičnih lastnosti rastlin (npr. Klančnik in sod., 2012, 2015a; Ojdanič in sod., 2023a). Meritve na ravni lista so obsegale različne skupine rastlin, značilnih za Cerknisko jezero (Klančnik in Gaberšček, 2016), od nekaterih šašev in trav (Klančnik in sod., 2014b, 2014c), do različnih močvirskih, amfibijskih (Klančnik in sod., 2012; Klančnik in sod., 2014a) in vodnih rastlin (Klančnik in sod., 2015b; Klančnik in sod., 2018). Meritve odbojnih spektrov sestojev pa so obsegale različne sestoeje, od enovrstnih sestojev do mešanih sestojev, pa tudi zaznavanje njihovih sprememb v času. Meritve odbojnosti so bile narejene v območju valovnih dolžin od 290 do 800 nm s prenosnim spektrofotometrom in optičnim kablom, in v primeru listov tudi integracijske sfere.

Cerkniško jezero kot raznolik sistem, ki se spreminja v času in prostoru, je raziskovalcem omogočil odgovore na različna raziskovalna vprašanja o optičnih lastnostih rastlin. Kako in zakaj se razlikujejo optične lastnosti različnih ekoloških skupin rastlin? Kakšna je raznolikost med vrstami in znotraj vrste, pri fenotipsko plastičnih amfibijskih rastlinah, kako se odbojnost sevanja na ravni lista razlikuje od odbojnosti na ravni sestojev in kakšne so spremembe odbojnosti v času ter kaj nam o Cerkniskem jezeru povedo različni indeksi, ki so rezultat zaznavanja odbojnih spektrov na daljavo?

Spektralne lastnosti vodnih in plavajočih listov

V vodnem okolju so bile predmet raziskav predvsem potopljene vrste in vrste s plavajočimi listi. Sevalne razmere v vodnem okolju so močno spremenjene v primerjavi s kopnim. Svetlobni

spekter se v vodi spreminja kakovostno in količinsko. Sevanje, ki doseže vodno površino, se deloma odbije. Odboj sevanja je odvisen od vpadnega kota sončnih žarkov, od vzvalovanosti vodne površine in nadmorske višine (Cronk in Fennessy, 2001). Zaradi odboja od vodne površine, so listi, ki plavajo na površini vode, kot na primer pri rumenem blatniku (*Nuphar luteum* (L.) Sibth. & Sm.), v nasprotju s potopljenimi listi izpostavljeni celo večjim jakostim sevanja kot kopenske rastline. Delež sevanja, ki prehaja v vodo se odbija ali pa absorbira na vodnih molekulah, raztopljenih organskih in anorganskih snoveh ter suspendiranih delcih (Holmes in Klein, 1987). Potopljeni listi navadno vsebujejo manjše koncentracije klorofilov in karotenoidov na enoto površine, razmerje med klorofili in karotenoidi pa je večje. Na primer primerjava potopljenih in plavajočih listov rumenega blatnika (*Nuphar luteum*) je pokazala prilagoditve celotnega fotosinteznega aparata potopljenih listov na šibkejšo jakost sevanja, kar jim zagotavlja učinkovit potek fotosinteze tudi v slabših svetlobnih razmerah v primerjavi s plavajočimi in zračnimi listi (Kordyum in Klimenko, 2013).

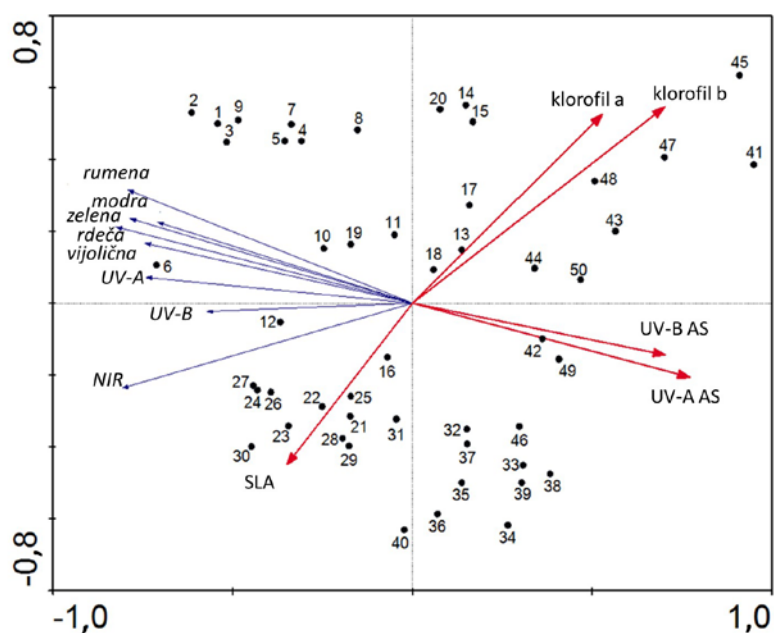
Raziskave vodnih rastlin z območja Cerkniškega jezera so razkrile številne novosti o spektralnih lastnostih teh rastlin. Raziskava optičnih lastnosti rumenega blatnika in vodne dresni (*Polygonum amphibium* L.) in še nekaterih drugih vrst z drugih območij je pokazala pomemben vpliv plavajočih listov na prehajanje svetlobe v vodni stolpec. Največje zmanjšanje jakosti sevanja v vodi je v UV območju pa tudi v modrem in rdečem delu spektra (Klančnik in sod., 2018), kar močno poslabša razmere za uspevanje potopljenih vodnih vrst.

Vodni listi različnih rastlinskih vrst nemalokrat služijo kot habitat za perifiton (združbo obrasti), oziroma epifiton (združba obrasti na rastlinah), ki predstavlja prvo plast na listu in tako vpliva na optične lastnosti lista. Epifiton s prevladujočimi kremenastimi algami ima izjemne optične lastnosti, saj njihove kremenaste frustule (eksoskelet) absorbirajo predvsem v UV-A, vijoličnem in modrem delu spektra (Yamanaka in sod., 2008). Kremenaste frustule so zelo porozne (Cox, 2011). Svetloba, ki vstopa v pore frustul, se razprši, kar poveča verjetnost absorpcije fotonov (Yamanaka in sod., 2008). Pri vrsti kremenaste alge *Coscinodiscus wailesii* Gran in Angst, 1931 so dokazali, da frustule omogočajo celo fokusiranje sevanja v listno sredico (De Stefano in sod., 2007). Raziskava optičnih lastnosti potopljenih listov bleščečega dristavca (*Potamogeton lucens* L.), preraslostnega dristavca (*Potamogeton perfoliatus* L.) in navadne strelušice (*Sagittaria sagittifolia* L.) z epifitonom v katerim so prevladoval kremenaste alge vrste *Cocconeis placentula* Ehrenberg, 1838 je pokazala pomembno vlogo kremenastih alg pri uravnavanju prejetega sevanja. Optične lastnosti so bile izmerjene na listih z epifitonom, in tistih s katerih je bil ta odstranjen. Vpliv epifitona kot selektivnega filtra za prehajanje sevanja je bil največji v UV, vijoličnem in modrem delu spektra, kar kaže na pomemben prispevek epifitona s prevladujočimi kremenastimi algami na absorpcijo sevanja krajših valovnih dolžin, ne pa tudi vpliva na koristno fotosintezno aktivno sevanje (Klančnik in sod., 2015b).

Spektralne lastnosti rastlin z amfibijskim značajem

Rastlinske vrste z amfibijskim značajem so tiste vrste, ki razvijejo asimilacijske površine v povsem različnih okoljih, v vodi in v zraku, kar jim daje pomembno tekmovalno prednost v spremenljivih okoljih (Enríquez in Sand-Jensen, 2003; Capon in Brock, 2006), kot je območje Cerkniškega jezera. Amfibijske vrste rastlin predstavljajo zanimiv modelni sistem tudi za opazovanje spreminjanja optičnih lastnosti listov, saj lahko pri isti rastlinski vrsti proučujemo različne oblike listov in rastne oblike, ki se razvijejo v različnih okoljskih razmerah (Braendle in Crawford, 1999). Svetlobne razmere v vodnem okolju so močno spremenjene v primerjavi s kopnim. Svetlobni

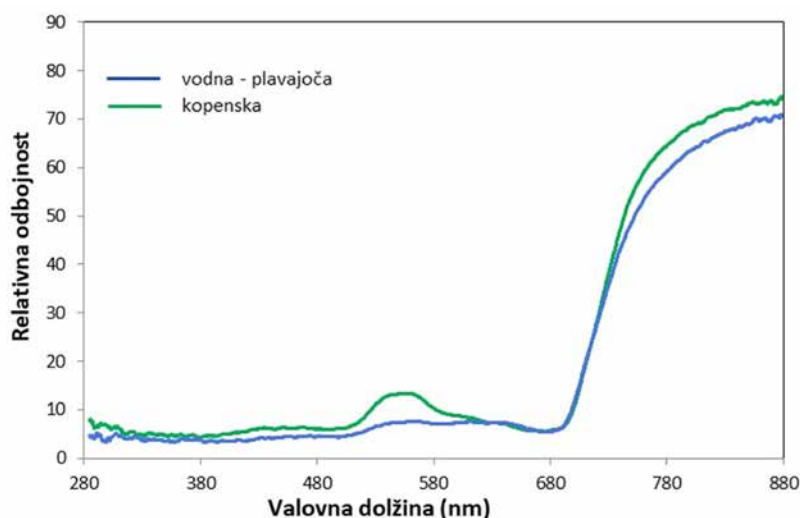
spekter se v vodi spremeni kakovostno in količinsko (Cronk in Fennessy, 2001). Primerjava različnih tipov listov dveh vrst z amfibijskim značajem, navadne streluše (*Sagittaria sagittifolia*) in velike zlatice (*Ranunculus lingua* L.), na Cerkniškem jezeru je pokazala razlike v anatomskih in biokemijskih lastnostih, ki so se odražale tudi v različnih optičnih lastnostih listov razvitih v vodi in na kopnem. Na optične lastnosti niso vplivale le drugačne značilnosti habitata, temveč tudi evolucijska starost vrste, ki je povezana s proizvodnjo sekundarnih metabolitov (predvsem spojin, ki absorbirajo UV žarke), ki je bila pri veliki zlatici precej manjša kot pri streluši. Rozema in sodelavci (2002) poročajo, da je količina in celovitost snovi, ki absorbirajo UV žarke, v rastlinah med evolucijo rastlin naraščala. Ker je rod *Ranunculus* evolucijsko veliko starejši v primerjavi z rodom *Sagittaria*, se zdi, da je razlika v količini snovi, ki absorbirajo UV žarke, ob primerjavi istega tipa listov bolj evolucijska kot okoljska. Redundantna analiza izmerjenih podatkov je pokazala, da so biokemijske lastnosti listov vplivale na spektre odbojnosti (slika 1). Najbolj vplivni parameter je bila vsebnost snovi, ki absorbirajo UV-A sevanje, ki je pojasnila 33 % variabilnosti spektrov, snovi, ki absorbirajo UV-B sevanje in obe vrsti klorofila (a in b) so skupaj pojasnili še dodatnih 22 %, medtem ko je specifična listna površina (SLA) pojasnila le 5 % variabilnosti spektrov. Na spektre prepustnosti sevanja so vplivale predvsem anatomske lastnosti listov. Zanimiva je tudi ugotovitev, da prisotnost aerenhima v listih ni statistično pomembno vplivala na absorpcijo svetlobe listov (Klančnik in sod., 2014c). Medvrstna primerjava listov je pokazala večje razlike med listi razvitimi na kopnem, kot med listi razvitimi v vodi. Pri odbojnih spektrih vidne svetlobe potopljenih listov je opaziti manj izrazit vrh v zelenem delu spektra. Listi razviti na kopnem, pa so prepuščali več sevanja v območju zelenega in NIR dela spektra. Na razlike pri odbojnih spektrih so imele večji vpliv biokemijske lastnosti listov, pri presevnih spektrih pa anatomske lastnosti (specifična listna površina, debelina stebričastega tkiva in debelina povrhnjic) (Klančnik in sod., 2014a). Zanimivo je tudi združevanje vzorcev posamezni tipov listov v skupine.



Slika 1: Graf RDA, ki prikazuje povezanost med anatomskimi in biokemijskim parametri ter različnimi območji spektrov odbojnosti. Številke predstavljajo analizirane vrste listov: 1–10 kopenski in 11–20 potopljeni listi velike zlatice (*Ranunculus lingua*) ter 21–30 potopljeni listi, 31–40 plavajoči listi in 41–50 kopenski listov navadne streluše (*Sagittaria sagittifolia*). Okrajšave za rastlinske lastnosti so naslednje: UV-A AS, spojine, ki absorbirajo UV-A, UV-B AS spojine, ki absorbirajo UV-B sevanje. Barvila in UV AS so izražene na površino lista. Povzeto po Klančnik in sod., 2014c.

Meritve optičnih lastnosti listov dveh heterofilnih vrst vodne dresni (*Polygonum amphibium*) in rumenega blatnika (*Nuphar luteum*), so pokazale velike razlike med različnimi tipi listov znotraj ene vrste, in veliko podobnost med optičnimi lastnostmi plavajočih listov obeh vrst (Klančnik in sod., 2012). Pri obeh vrstah različne poteze, ki se razvijajo pri različnih tipih listov, optimizirajo njihovo delovanje v spreminjajočem se okolju (Šraj Kržič in Gaberščik, 2005), kar vpliva tudi na odbojnost sevanja. Različne študije so pokazale izjemno fenotipsko plastičnost vodne dresni (Gaberščik in Martinčič, 1992; Gaberščik, 1993; Klančnik in sod., 2012). Razlike so manjše v biokemijski sestavi različnih tipov listov, kar je verjetno posledica njihove zgradbe, saj imajo vsi tipi listov dobro zaščito površine, bodisi debelo voščeno kutikulo pri plavajočih listih, bodisi trihome pri kopenskih listih, kar vpliva na prehajanje sevanja v listno sredico (Holmes in Keiller, 2002). Korelacijska analiza je pokazala, da je odbojnost sevanja močno povezana s povprečno dolžino in skupno dolžino trihomov na zgornji povrhnjici (Klančnik in sod., 2012). Rumeni blatnik v juvenilni fazi razvije potopljene liste, kasneje pa se razvijajo veliki plavajoči listi (Fox, 1992). Potopljeni listi imajo večjo relativno odbojnost v vidnem spektru, kar je posledica manjše vsebnosti barvil na površino, predvsem antocianinov (Klančnik in sod., 2012).

Odbojnost listov vodnih in kopenskih primerkov plavajoče sladike (*Glyceria fluitans* (L.) R.Br.) s Cerknškega jezera je pokazala, da imajo plavajoči listi vodnih primerkov izravnano krivuljo odbojnosti v vidnem delu spektra, medtem ko imajo kopenski listi izrazit višek v zelenem delu spektra (slika 2). Kopenski listi imajo večje vsebnosti celotnega klorofila in večje razmerje klorofilov a/b, več karotenoidov in manj UV absorbirajočih snovi, poleg tega pa so v povprečju 2,6–krat tanjši z znatno manj aerenhima.

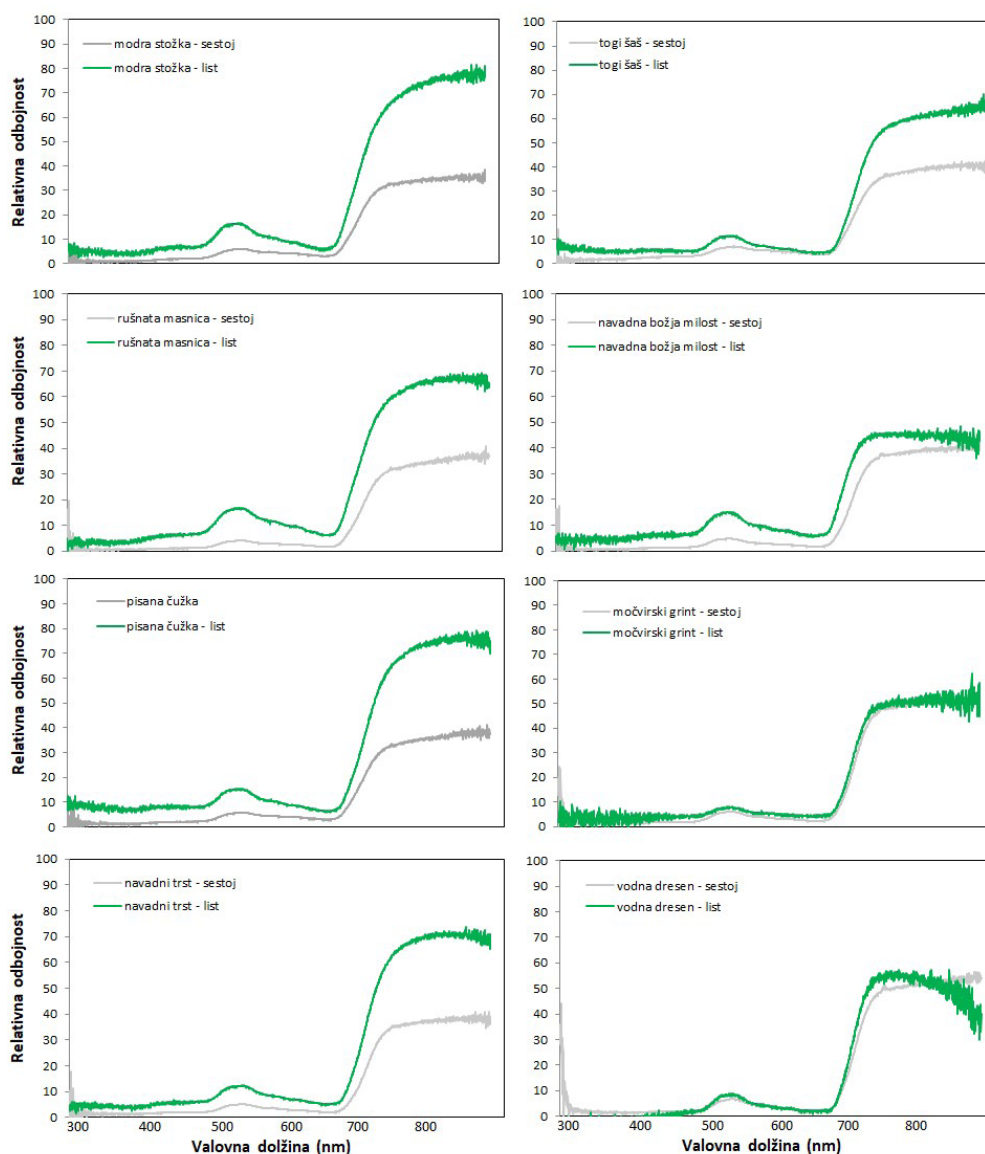


Slika 2: Odbojnost listov vodne in kopenske oblike plavajoče sladike (*Glyceria fluitans*).

Spektralne lastnosti vrst in sestojev

Optične lastnosti rastlinskih sestojev niso odvisne le od lastnosti listov, temveč tudi od zgradbe rastline, oziroma sestoja (Yoder in Pettigrew-Crosby, 1995), vključno s pokritostjo tal z rastlinami (Gao in Zhang, 2006). Zgradba rastline zajema njene biokemijske in morfološke lastnosti ter njeno velikost in obliko (razraslost). Zaradi hkratnih vplivov mnogih lastnosti, so interakcije med sevanjem in rastlinskimi sestoji lahko zelo kompleksne. Gosti rastlinski sestoji absorbirajo 60–90 % sevanja, 10–30 % ga odbijejo, le 5–10 % sončevega sevanja pa prehaja skozi sestoj do tal (Lar-

cher, 2003). Od celotne količine absorbiranega sevanja, ga 80–90 % absorbirajo listi, preostalo pa drugi nadzemni rastlinski organi. Pri tem ima pomembno vlogo orientacija in naklon listov, njihova oblika in velikost ter optične lastnosti listov (Asner, 1998). Spektralne meritve sestojev v naravi se večinoma nanašajo na merjenje njihovih odbojnih spektrov. Odboj sevanja v UV delu spektra je v sestoji navadno majhen (< 10 %) (Gates in sod., 1965). Prav tako je v vidnem delu spektra odbojnost vitalnega sestoja majhna in ne presega 20 % (Gilmore in sod., 2008). Povečan odboj v vidnem delu spektra lahko kaže na prisotnost stresa pri rastlinah (Imanishi in sod., 2004), prav tako je povečan odboj in poenotenje odboja v tem delu spektra lahko posledica senescence sestoja (Gao in Zhang, 2006). V predelu NIR in IR se od rastlin odbije okoli 60 % vpadnega sevanja (Gilmore in sod., 2008). Poleg meritev optičnih lastnosti listov rastlin v laboratoriju so v naravnem okolju na Cerkniškem jezeru potekale tudi meritve odbojnih spektrov sestojev (slika 3).



Slika 3: Odbojni spektri različnih vrst in njihovih enovrstnih sestojev (zastopanost po Braun–Blanquet 5) modre stožke – *Molinia caerulea* (L.) Moench., rušnate masnice – *Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv., pisane čužke – *Phalaris arundinacea* L., navadnega trsta – *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud., togega šaša – *Carex elata* All., navadne božje milosti – *Gratiola officinalis* L., močvirskega grinta – *Senecio paludosus* L. in vodne dresni – *Polygonum amphibium*.

Slika prikazuje primerjavo med odbojnostjo nekaterih vrst in odbojnostjo njihovih enovrstnih sestojev na Cerkniškem jezeru. Odbojnost sestojev je bistveno manjša v primerjavi z listi, prav zaradi heterogenosti, plastovitosti in celovitosti njihove zgradbe (Larcher, 2003). Najmanjše so razlike med kopenskimi primerki in kopenskimi sestoji vodne dresni, kjer listni trihomi (dlačice) predstavljajo prvo interakcijo s svetlobo in močno vplivajo na odbojnost sevanja (Klančnik in sod., 2012).

Klančnik in sod. (2014c) so proučevali odnos med spektri odbojnosti enovrstnih (monospecifičnih) sestojev ter biokemijskimi in anatomskimi lastnostmi listov vrst, ki so tvorile te sestoeje. Količina skupne pojasnjene variance je znašala 76 %, kar kaže na razmeroma velik vpliv lastnosti prevladujočih vrst na odbojne spektre sestojev. Največji delež odbojnosti sta pojasnila parametra dolžina bodičk (32 %) in gostota trihomov (18 %). V analizah mešanih (večvrstnih) sestojev so bile vključene večinoma dvokaličnice in njihove biokemične lastnosti so se izkazale za pomembnejše od lastnosti njihove zgradbe, saj so skupaj pojasnile 38 % variabilnosti mešanih sestojev. Raziskave na Cerkniškem jezeru kažejo, da na podlagi spektrov odbojnosti vrste lahko sklepamo o lastnostih enovrstnih sestojev, medtem ko je za večvrstne sestoeje takšno sklepanje lahko zavajajoče.

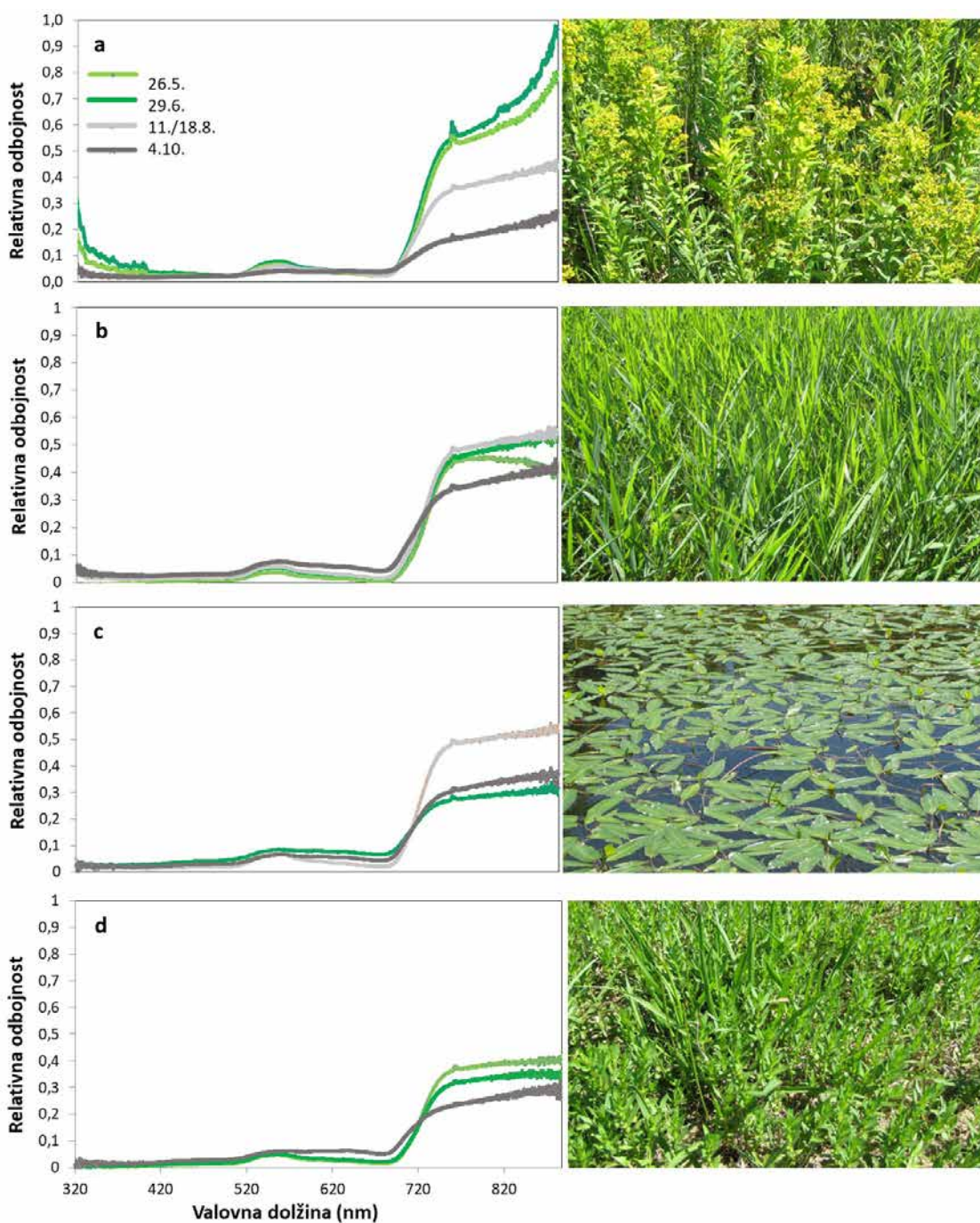
Sezonske spremembe spektralnih lastnosti sestojev

Na odbojne spektre vrst in sestojev vpliva tudi njihova fenološka faza in razmere v okolju, zato se tekom sezone spreminjajo (slika 4).



Slika 4. Pogled na Rešeto ob terenskem snemanju spektrov različnih sestojev v letu 2011; a – 26.6., b – 29.6., c – 11.8., d – 4.10. (foto: Primož Gnezda).

Raziskave različnih sestojev so pokazale spremembe predvsem NIR, v rumenem in v rdečem delu spektra. V UV območju so vidne razlike predvsem pri sestoji bleščečega mlečka. Jakost UV odboja se je glede na mesec maj v juniju še povečala (slika 5).

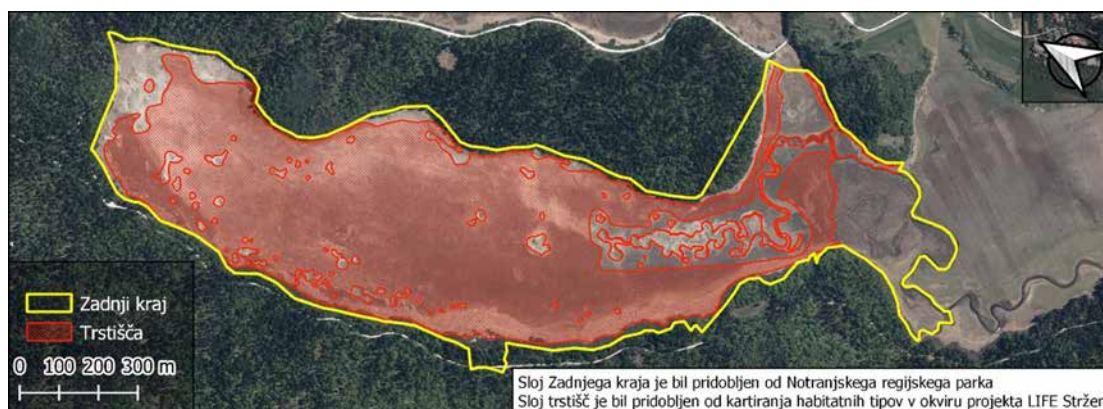


Slika 5. Sezonska dinamika odbojnih spektrov monosestojev različnih vrst in fotografije posnete v juniju; (a) bleščeči mleček – *Euphorbia lucida* – Waldst. & Kit., (b) pisana čužka – *Phalaris arundinacea*, (c) vodna dresen – *Polygonum amphibium*, (d) navadna božja milost – *Gratiola officinalis* (v družbi z visokim trpotcem – *Plantago altissima* L.) (foto: Primož Gnezda).

Kot smo že omenili je odbojnost v UV delu navadno majhna (Yoshimura in sod., 2010). Izjeme so lahko listi z voski na površini, ki jim dajejo zeleno-modrikast videz, kakršnega imajo tudi številni mlečki. Takšni listi lahko odbijejo tudi med 20 in 35 % prejetega UV sevanja (Holmes in Keiller, 2002), kar je bilo ugotovljeno tudi za sestoj bleščečega mlečka. Voski na povrhnjici lista so v vidnem in NIR območju skoraj prozorni (Knippling, 1970). Voski na površini listov sukulentskih rastlin, ki imajo nesvetleče površine, prav tako prispevajo k povečanemu odboju UV sevanja, hkrati pa lahko zmanjšajo absorpcijo sevanja v vidnem delu spektra (Barker in sod., 1997). Na povečan odboj UV sevanja lahko vpliva tudi prisotnost trihomov na listni površini, v kolikor ti ne vsebujejo UV absorbirajočih substanc (Robberecht in sod., 1980). Na koncu sezone se količina odbite svetlobe zmanjša, krivulje pa se izravnavajo. Poenotenje ravni odboja v vidnem delu spektra je lahko posledica senescence sestoja (Gao in Zhang, 2006). Vzrok je lahko tudi spreminjanje okoljskih razmer, ki vplivajo na biokemijske lastnosti asimilacijskih površin (vsebnost fotosinteznih in drugih barvil) in vsebnost vode, ki pa ima vpliv pri nekoliko večjih valovnih dolžinah NIR (Sims in Gamon, 2002).

Spremembe spektralnih lastnosti trstič Zadnjega kraja v 40-letnem obdobju

Tehnike daljinskega zaznavanja nam omogočajo lažje pridobivanje podatkov o rastlinskih sestojih, predvsem na območjih, kjer so razmere takšne, da je izvedba terenskih meritev otežena (Kumar in Mutanga, 2017). Pomanjkljivost daljinskega zaznavanja vegetacije je v natančnosti pridobljenih podatkov, ki je v veliki meri pogojena z ločljivostjo senzorjev. Hkrati večina senzorjev, ki so nameščeni na satelite, letala ali brezpilotne letalnice (UAV) zbira podatke le v določenih valovnih dolžinah, medtem ko lahko instrumenti, ki se uporabljajo *in situ*, zajamejo širše spektre in tako tudi več podatkov. Ne glede na pomanjkljivosti, je pglavilna prednost uporabe daljinskega zaznavanja vegetacije ta, da so na voljo prosto dostopne zbirke podatkov, ki segajo več desetletij v preteklost in se še vedno redno obnavljajo. Primer takšne zbirke podatkov so satelitski posnetki serije Landsat, ki vključuje več različnih satelitov, izmed katerih je prvi pričel zbirati podatke leta 1972 (Williams in sod., 2006). Na Cerkniškem jezeru je omogočen vpogled v preteklost vegetacije ter hkrati raziskovanje vplivov na spremembe vegetacije, saj so poleg satelitskih posnetkov na voljo tudi dolgoletni podatki o vodostaju (merilni postaji pri Dolenjem in Gorenjem Jezeru) in temperaturi (najbližje merilno mesto je v Postojni), ki jih meri Agencija Republike Slovenije za okolje (ARSO). Predmet preliminarne raziskave na območju Cerkniškega jezera so trstiča, ki se nahajajo na območju Zadnjega kraja (sliki 6 in 7).



Slika 6: Območje trstič, ki se nahajajo znotraj Zadnjega kraja. Podatki o prostorski razširjenosti trstič so bili ustvarjeni v okviru kartiranja habitatnih tipov v projektu LIFE Stržen leta 2009.

Tukaj prevladuje jezerski tip trstičja, ki je za razliko od obrežnih trstičšč izpostavljen skrajnejšim razmeram (Ojdanič in sod., 2023b). Zaradi topografije območja ter oddaljenosti od Stržena, se jezerska trstičšča razlikujejo od obrežnih tudi v dinamiki vodostaja. Spremembe vodostaja na območju Zadnjega kraja najboljše opiše merilno mesto pri Dolenjem Jezeru kjer je potrebno upoštevati, da ob spremembah vodostaja Stržena, ista sprememba vodostaja v Zadnjem kraju nastopi z zamikom (Ojdanič in sod., 2023a).

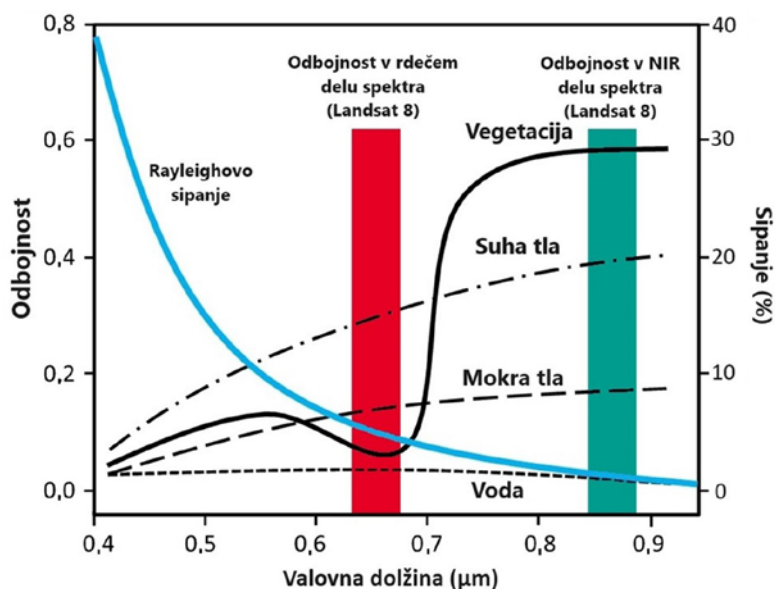


Slika 7: Pogled na trstišča v Zadnjem kraju, na predelu, kjer se Mrzlik izliva v Kotel (foto: Matej Blatnik).

Za območje Zadnjega kraja smo tako zbrali 40-letno podatkovno serijo multispektralnih posnetkov od leta 1984 do 2023. Vir multispektralnih posnetkov so bili sateliti serije Landsat, in sicer Landsat 4-5 TM (od leta 1984 do 2011), Landsat 7 TM (leto 2012) in Landsat 8 OLI (od leta 2013 do 2023). V vsakem letu smo pridobili satelitski posnetek znotraj vrhunca rastne sezone (idealno med 15.07 in 10.08, odvisno od oblačnosti). Iz multispektralnih posnetkov smo tako izračunali povprečen letni normaliziran vegetacijski indeks (NDVI) trstičšč Zadnjega kraja po enačbi:

$$NDVI = \frac{(\rho_{NIR} - \rho_R)}{(\rho_{NIR} + \rho_R)} \quad \dots(2)$$

kjer je R odbita vidna rdeča svetloba, ki je ključna za fotosintezo, NIR pa odbita bližnja infrardeča svetloba. Vrednosti rezultatov enačbe so med -1 in 1 pri čemer višje vrednosti predstavljajo gosto in vitalno vegetacijo, medtem ko vrednosti pod 0 navadno predstavljajo vodno površino. NDVI tako omogoča tudi zaznavanje različnih tipov podlag, kot so vegetacija v stresnem stanju, vitalna vegetacija, suha tla, vlažna tla, vodna površina (slika 8), saj imajo različni tipi podlage edinstven spektralni podpis, oziroma spektralni odziv (Huang in sod., 2021). Za usklajevanje mejnih vrednosti za določanje različnih tipov podlage so sicer še vedno potrebne terenske meritve.



Slika 8: Prikaz spektralnega odziva različnih tipov podlage in spektralna širina senzorjev satelita Landsat 8 pri merjenju odbojnosti v rdečem in bližnje infrardečem (NIR) delu spektra (povzeto po Huang in sod., 2021).

Uporabnost NDVI je široka ampak, v splošnem indeks posredno poda informacijo o zelenosti, ki je pri vitalni vegetaciji večja (Chávez in sod., 2016; Vicente-Serrano in sod., 2016). Glavno vlogo pri absorpciji sevanja imajo barvila, predvsem klorofili, karotenoidi in antocianini. Pri nekaterih vrstah so razlike v zelenosti lahko posledica njihove elementne sestave. Na primer pri navadnem trstu se lahko vsebnost silicija (Si) v listih močno spreminja (na Cerkniškem jezeru smo zabeležili razpon deleža Si v listih med 2,2 do 7,2 %), kar vpliva na optične lastnosti listov, vključno z odbojnostjo, saj se Si nalaga predvsem na površini lista (Klančnik in sod., 2014b; Klančnik in sod., 2014c). Največji vpliv imajo bodičke (okremenjeni trihomi) na površini lista. Količina Si v listih pa ni odvisna samo od stopnje ontogeneznega razvoja in razpoložljivosti Si na rastišču, ampak tudi od hidroloških razmer, ki vplivajo na transpiracijski tok skozi rastline in posledično tudi na prehajanje Si po rastlini (Grašič in sod, 2019a; Grašič in sod., 2019b).

Ker se območje Zadnjega kraja med leti razlikuje glede pokrovnosti in zastopanosti rastlinskih vrst, smo poleg NDVI še dodatno izračunali MSAVI indeks (Modified soil adjusted vegetation index) po enačbi:

$$MSAVI = \rho_{NIR} + 1 - \frac{\sqrt{((2 * \rho_{NIR} + 1)^2 - 8 * (\rho_{NIR} - \rho_R))}}{2} \quad \dots(3)$$

kjer je R odbita vidna rdeča svetloba, NIR pa odbita bližnja infrardeča svetloba. MSAVI je bil načrtno razvit z namenom zmanjšanja vpliva odbojnosti tal, saj tla predstavljajo šum, kadar nas izključno zanima stanje rastlinstva (Q_i in sod., 1994). Letne vrednosti NDVI in MSAVI smo nato pojasnili z okoljskimi razmerami (podatki o vodostaju in temperaturi v pomladnem in poletnem času). Kot podatke o vodostaju, smo uporabili podatke merilne postaje Dolenje jezero (ARSO), saj ta boljše predstavi dinamiko vodostaja na predelu Zadnjega kraja kot merilna postaja Gorenje Jezero. Podatke o temperaturi smo pridobili od merilne postaje v Postojni (ARSO). Vpliv okoljskih razmer smo ugotavljali z uporabo algoritma za podatkovno rudarjenje »Model 5 with pruning« (M5P), katerega rezultat so linearni modeli ter odločitveno drevo s pravili, ki temeljijo na mejnih vrednostih razlagalnih spremenljivk (Alsultanny, 2020).

Preliminarno podatkovno rudarjenje je pokazalo, da so modeli na območju Zadnjega kraja, ki napovedujejo vrednost MSAVI bolj natančni kot modeli, ki napovedujejo vrednost NDVI. Z algoritmom podatkovnega rudarjenja smo dobili 7 linearnih modelov (LM), ki napovedujejo vrednosti MSAVI glede na okoljske razmere (preglednica 1).

Preglednica 1: Linearni modeli pridobljeni z uporabo M5P algoritma ter število napovedi za posamezen model. Za vsak model je dodatno prikazana še realni razpon vrednosti MSAVI in napovedni razpon vrednosti MSAVI.

Linearni model		LM1	LM2	LM3	LM4	LM5	LM6	LM7
Število napovedi		8	7	4	3	7	6	5
Napovedne vrednosti	Min	0,504	0,540	0,543	0,537	0,544	0,440	0,463
	Max	0,530	0,557	0,557	0,592	0,568	0,485	0,472
Realne vrednosti	Min	0,356	0,430	0,430	0,446	0,443	0,230	0,192
	Max	0,499	0,500	0,491	0,476	0,536	0,411	0,610

Modeli od LM1 do LM5 napovedujejo vrednosti MSAVI, ki presegajo vrednost 0,500. LM5 napoveduje največje vrednosti z največjo vrednostjo 0,592. Modela LM6 in LM7 napovedujeta vrednosti MSAVI, ki so pod vrednostjo 0,500. Najmanjše vrednosti tako napoveduje model LM6, kjer je minimum napovedanega MSAVI 0,440. Razpon realnih vrednosti MSAVI se razlikuje od napovednih. Vsi modeli so precenili vrednosti MSAVI. Kljub temu je iz preliminarne podatkovnega rudarjenja razvidno, da modela LM6 in LM7 pravilno napovedujeta manjše vrednosti MSAVI, medtem ko ostali modeli napovedujejo povprečne vrednosti oziroma večje od povprečja. 40-letno povprečje MSAVI vrednosti za Zadnji kraj je bilo 0,435. Skupen korelacijski koeficient algoritma (R^2) je bil 0,52.

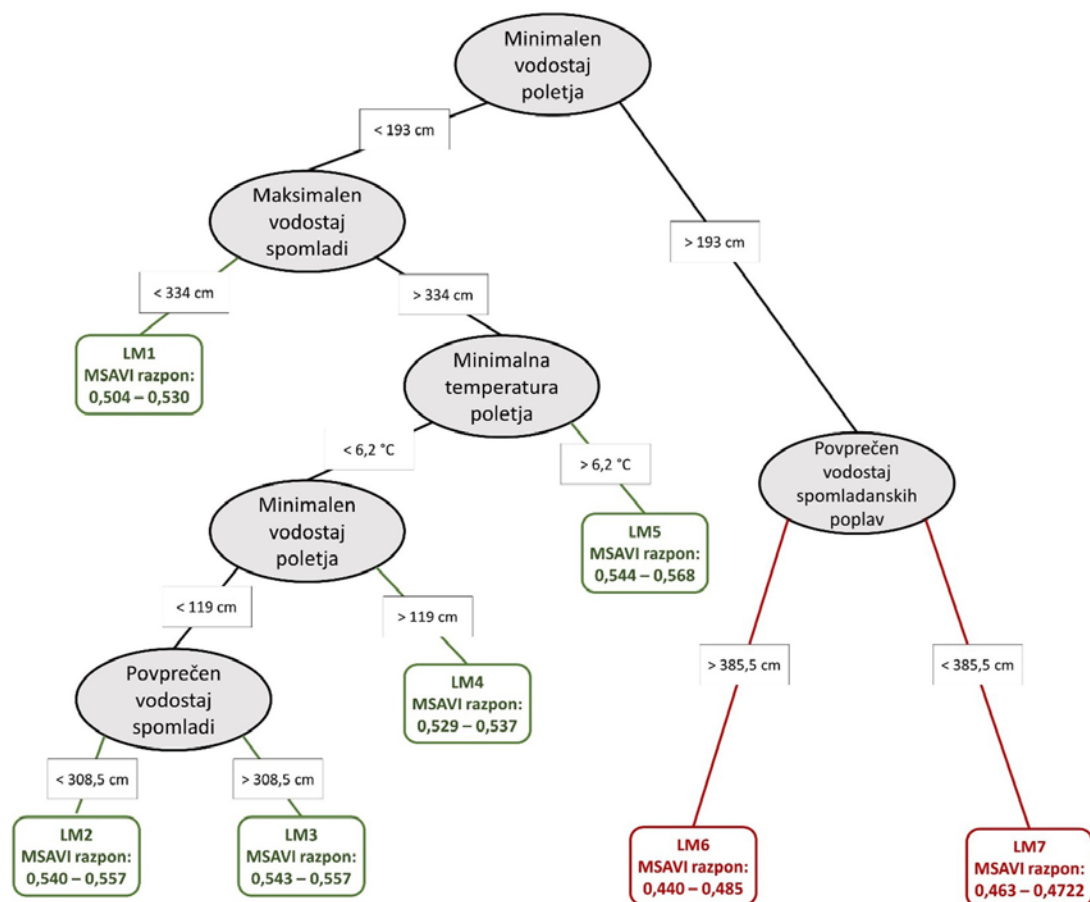
Odločitveno drevo je za najbolj pomemben dejavnik pokazalo minimalen vodostaj (na merilni postaji Dolenje Jezero) v poletju, pri čemer je mejna vrednost 193 cm (slika 9). V primeru, da je minimalen vodostaj poletja višji od 193 cm, je na naslednji odločitveni ravni pomemben povprečen vodostaj spomladanskih poplav. Kot spomladanske poplave so označena obdobja, kjer vodostaj preseže višino 350 cm za vsaj 7 dni (Ojdanič in sod., 2023b). Končni veji v obeh primerih napovedujeta manjše MSAVI vrednosti (LM6 in LM7) kot ostali modeli. Če je minimalen vodostaj poletja visok, je to indikator, da se območje v začetku poletja še ni popolnoma izsušilo. Posredno to pomeni, da je bil vodostaj v začetnem delu rastne sezone visok. Visok vodostaj v začetku rastne sezone in v obdobju intenzivne rasti negativno vpliva na vitalnost navadnega trsta (Ojdanič in sod., 2023a), zato so pričakovane vrednosti MSAVI manjše. To dodatno potrди naslednja odločitvena veja, saj so vrednosti MSAVI v primeru visokega povprečnega vodostaja spomladanskih poplav, najmanjše.

V primeru, da je minimalen vodostaj poletja nižji od 193 cm, kar nakazuje na to, da je pritisk visokega vodostaja v času intenzivne rasti navadnega trsta manjši, je drugi najpomembnejši dejavnik maksimalen vodostaj spomladi z mejno vrednostjo 334 cm. Če je maksimalen vodostaj spomladi manjši od 334 cm, kar nakazuje na bolj suho pomlad, so napovedne vrednosti modela LM1, v primerjavi z modeli, kjer vrednosti presegajo 0,500, najmanjše. V primeru, da maksimalen vodostaj spomladi presega 334 cm, in je hkrati minimalna temperatura poletja višja od 6,2 °C, potem so napovedne vrednosti modela LM5 največje v primerjavi z ostalimi modeli, ki napovedujejo vrednosti nad 0,500. V nasprotnem primeru, ko je minimalna temperatura poletja nižja od 6,2 °C, so na naslednjih odločitvenih nivojih ponovno pomembni vodostaji v poletnem

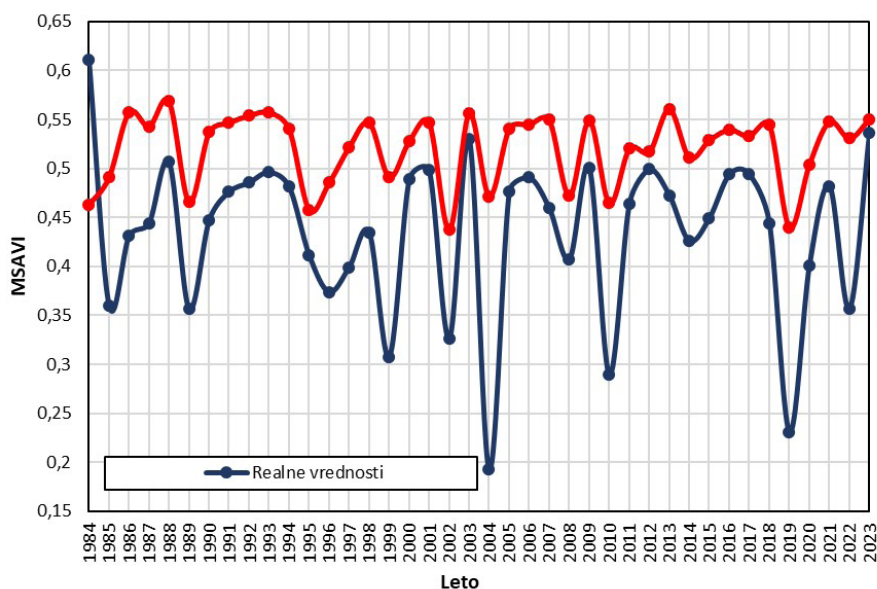
in spomladnem času. Napovedi končnih vej v teh primerih so med seboj primerljive (LM2, LM3 in LM4). V nadaljnjih raziskavah bo potrebno ugotoviti kako boljše razčleniti oziroma združiti modele LM2, LM3 in LM4 ter izboljšati uravnoteženost odločitvenega drevesa. Poleg tega, bo potrebno izboljšati obdelavo podatkov, kot tudi izbor okoljskih dejavnikov, saj so napovedne vrednosti modela v vseh primerih večje od realnih.

Odločitveno drevo jasno opredeli pomembnost vodostaja za trstišča Zadnjega kraja. Kot potencialna napovedna spremenljivka, ki bi lahko izboljšala napovedi in odpravila neskladnosti, bi lahko bila košnja oziroma obseg košnje v predhodni rastni sezoni saj je to za vitalnost trstišč nezanemarljiv antropogen dejavnik (Kulik in sod., 2023). Ker teh podatkov ni, bi bilo potrebno predhodno ustvariti metodo za zanesljivo določanje košnje na podlagi satelitskih posnetkov.

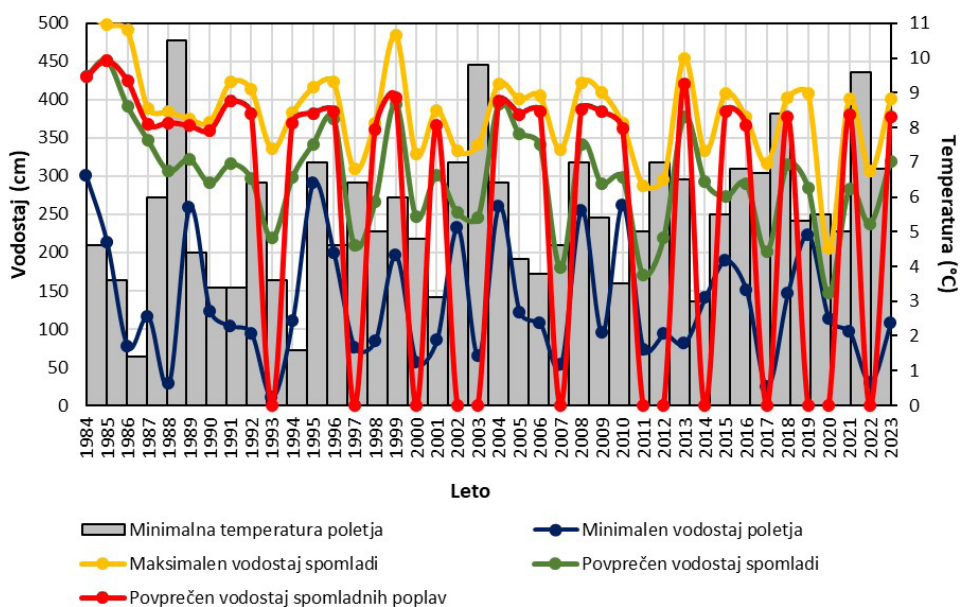
Spremembe MSAVI trstišč na območju Zadnjega kraja nakazujejo, da ekstremni pojavi sledijo vzorcu. Če gledamo območje Zadnjega kraja za obdobje enega leta, dobimo vtis, da razmere nikoli niso stalne. Če pa območje pogledamo na daljšem časovnem obdobju, opazimo cikličnost visokih in nizkih okoljskih ekstremov, kot tudi stanja trstišča (sliki 10 in 11). Z analizo večje količine podatkov trstišč iz drugih območij Cerkniškega jezera, pričakujemo, da bomo dobili še bolj jasno sliko tako o cikličnosti ekstremnih pojavov kot tudi o stanju trstišč.



Slika 9: Odločitveno drevo, ter mejne vrednosti najbolj pomembnih spremenljivk pri napovedi letne MSAVI vrednosti. Končne veje predstavljajo linearne modele (LM) ter njihov razpon napovednih vrednosti MSAVI. Zelena veja – MSAVI napoved nad 0,500. Rdeča veja – MSAVI napoved pod 0,500.



Slika 10: Letne spremembe realnih in modelnih MSAVI vrednosti trstič na Zadnjem kraju.



Slika 11: Letne vrednosti najbolj pomembnih okoljskih spremenljivk glede na MSP algoritem (Minimalna temperatura poletja, maksimalen vodostaj spomladi, povprečen vodostaj spomladanskih poplav, minimalen vodostaj poletja in povprečen vodostaj spomladi). Predstavljeni so vodostaji z merilne postaje Dolenje jezero in temperature z merilne postaje v Postojni (vir: <https://www.arso.gov.si>).

Zaključek

Cerkniško jezero je raznolik sistem, ki raziskovalcem omogoča raziskave različnih vidikov optičnih lastnosti rastlin. Raziskava optičnih lastnosti vrst *Nuphar luteum* in *Polygonum amphibium* je pokazala pomemben vpliv njunih plavajočih listov na prehajanje sevanja v vodni stolpec predvsem v UV (ultra vijolično) ter modrem in rdečem delu spektra, kar vpliva na uspevanje

spodaj rastočih vodnih vrst. Vodni listi različnih rastlinskih vrst služijo kot habitat za epifiton s prevladujočimi kremenastimi algami. Raziskava optičnih lastnosti potopljenih listov vrst *Potamogeton lucens* in *Potamogeton perfoliatus* in *Sagittaria sagittifolia* z epifitonom, v katerim so prevladovala kremenaste alge (in listov brez epifitona) je pokazala pomembno vlogo kremenastih alg pri absorpciji UV sevanja, ne pa tudi vpliva na koristno fotosintezno aktivno sevanje. Medvrstna primerjava optičnih lastnosti listov rastlin z amfibijskim značajem je pokazala večje razlike med listi razvitimi na kopnem, kot med listi razvitimi v vodi. Meritve optičnih lastnosti listov dveh heterofilnih vrst *Polygonum amphibium* in *Nuphar luteum* so pokazale velike razlike med različnimi tipi listov znotraj ene vrste, in veliko podobnost med optičnimi lastnostmi plavajočih listov obeh vrst. Primerjava med odbojnostjo nekaterih vrst in njihovih enovrstnih sestojev je pokazala, da je odbojnost sestoja bistveno manjša v primerjavi z odbojnostjo listov, prav zaradi heterogenosti, plastovitosti in celovitosti njihove zgradbe. Najmanjše so bile razlike med kopenskimi primerki in kopenskimi sestoji vrste *Polygonum amphibium*, kjer listni trihomi predstavljajo prvo interakcijo s sevanjem in močno vplivajo na odbojnost sevanja. Na podlagi spektrov odbojnosti vrste lahko sklepamo o lastnostih enovrstnih sestojev, medtem ko je za mešane sestoe takšno sklepanje lahko zavajajoče. Na odbojne spektre vrst in sestojev pa vpliva tudi njihova fenološka faza in razmere v okolju zato se v času sezone spreminjajo. Raziskave različnih sestojev so pokazale spremembe predvsem NIR (bližnje infra rdeče sevanje), v rumenem in v rdečem delu spektra. Tehnike daljinskega zaznavanja nam omogočajo lažje pridobivanje podatkov o rastlinskih sestojih, predvsem na območjih, kjer so razmere takšne, da je pridobivanje terenskih meritev izvedbeno oteženo. Za območje Zadnjega kraja smo zbrali 40-letni podatkovni niz multispektralnih posnetkov satelitov serije Landsat od leta 1984 do 2023. Iz posnetkov smo izračunali povprečen letni normiran vegetacijski indeks (NDVI) in modificiran indeks MSAVI trstič Zadnjega kraja. Letne vrednosti smo nato razložili s podatki o vodostaju in temperaturi v pomladnem in poletnem času. MSAVI je bolj primeren indeks kot NDVI za spremljanje trstič Zadnjega kraja. Najbolj pomemben dejavnik je bil minimalni vodo-staj v poletju, pri čemer je mejna vrednost 193 cm (na merilni postaji Dolenje jezero). Vrednosti (MSAVI) trstič na območju Zadnjega kraja nakazujejo, da so ekstremni pojavi, kot tudi stanje trstiča, ciklični.

Summary

Plant optical properties: from species to ecosystem

In ecosystems with 100% plant cover, most of the radiation is absorbed by the various plant organs, some of it penetrates the stand or is reflected off the plant surface, and only a small fraction reaches the ground. The properties of species and leaves are closely related to the environmental conditions in their habitat, allowing the optimised use of solar energy and preventing damage from excessive radiation. Lake Cerknica, as a diverse system that changes in time and space, offer the opportunity to address different research questions. Lake Cerknica, as a diverse system that changes in time and space, offers the opportunity to address different research questions.

A study of the optical properties of *Nuphar luteum* and *Polygonum amphibium* showed that their natant leaves significantly affected the transmission of radiation into the water column. The greatest reduction was found in the UV region, the blue and red parts of the spectrum, which greatly impairs the conditions for submerged aquatic species to thrive.

Aquatic leaves from various plant species frequently function as a habitat for epiphyton, forming the primary layer on the leaf and thereby influencing its optical properties. When dominated by diatoms, epiphyton exhibits exceptional optical characteristics, with silica frustules primarily absorbing UV-A, violet, and blue portions of the spectrum. In a study exploring the optical properties of submerged leaves from *Potamogeton lucens*, *Potamogeton perfoliatus*, and *Sagittaria sagittifolia*, with epiphyton dominated by *Cocconeis placentula* (and without epiphyton), it was revealed that diatoms played a crucial role. They acted as a selective filter for UV radiation, while leaving beneficial photosynthetically active radiation unaffected.

Amphibious plant species exhibit adaptive strategies by developing assimilative surfaces in both aquatic and terrestrial environments, conferring a significant competitive advantage in dynamic settings. In a cross-species comparison of the optical properties of leaves, it was observed that greater variations existed among leaves developed on land than among leaves developed in water. Measurements of the optical properties of the leaves of two heterophilous species, *Polygonum amphibium* and *Nuphar luteum*, showed large differences between the different leaf types within a species, and a high similarity between the optical properties of the floating leaves of the two species. In both species, the different traits developed in the different leaf types optimise their performance in a changing environment, which also affects the reflectance of radiation.

The reflectance of leaves of aquatic and terrestrial specimens of *Glyceria fluitans* showed that the floating leaves of aquatic specimens have a flattened reflectance curve in the visible part of the spectrum, while the leaves of terrestrial species have a pronounced green peak.

The optical properties of the plant stands depend not only on the properties of the leaves, but also on the structure of the plant or stand. A comparison between the reflectance of some species and their monospecific stands showed that the reflectance of the stand is significantly lower than that of the leaves, precisely because of the heterogeneity, layering and integrity of the structure. The smallest differences were between terrestrial specimens and terrestrial stands of *Polygonum amphibium*, where the leaf trichomes represent the first interaction with light and strongly influence the reflectance of radiation. Studies of different stands on Lake Cerknica have shown that the reflectance spectra of a species can be used to infer the properties of single species stands, whereas such inferences can be misleading for mixed stands.

The reflectance spectra of both individual plant species and stands are subject to fluctuations based on their phenological phase and prevailing environmental conditions, resulting in seasonal variations. Investigations into various stands have identified prominent changes, particularly in the Near-Infrared (NIR), yellow, and red segments of the spectrum. Notably, shifts in the ultraviolet (UV) range are distinctly observable, with significant differences evident, especially in the stand of *Euphorbia lucida*. These findings underscore the dynamic nature of reflectance spectra, emphasizing the need to account for seasonal and environmental factors when analysing and interpreting spectral data in ecological studies.

Remote sensing techniques provide a valuable means to gather information on vegetation stands, particularly in areas where field measurements may be challenging due to environmental conditions. In the Zadnji kraj area, we compiled a 40-year multispectral data series spanning from 1984 to 2023. The multispectral imagery was sourced from Landsat satellites, specifically Landsat 4–5 TM, Landsat 7 TM, and Landsat 8 OLI. Each year, satellite imagery was acquired during the peak growing season. Using the multispectral imagery, we computed the mean annual Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), as well as the modified soil adjusted vegetation

index (MSAVI) of the reed stands at Zadnji kraj. Annual values of both indices were then explained with water level and temperature data during spring and summer. Through decision tree analysis, we identified that the most influential factor was the minimum water level in summer, with a critical threshold set at 193 cm. We also found that the MSAVI is better suited for monitoring reed stands of Zadnji kraj than NDVI. The observed changes in the MSAVI of reed stands at Zadnji kraj acquired with this preliminary analysis suggest a discernable pattern. Extreme events, marked by increases and decreases in MSAVI, tend to alternate, with minimal changes occurring between these events.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 ter preko financiranja mladih raziskovalcev 33135 in 55856.

Viri

- Alsultanny, Y. 2020. Machine learning by data mining REPTree and M5P for predicating novel information for PM10. *Cloud Computing and Data Science*, 40–48. <https://doi.org/10.37256/ccds.112020418>
- Artigas, F. J., Yang, J. S. 2005. Hyperspectral remote sensing of marsh species and plant vigour gradient in the New Jersey Meadowlands. *International Journal of Remote Sensing*, 26(23), 5209–5220. <https://doi.org/10.1080/01431160500218952>
- Asner, G., Martin, R. 2008. Spectral and chemical analysis of tropical forests: Scaling from leaf to canopy levels. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3958–3970. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.003>
- Asner, G. P. 1998. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 64(3), 234–253. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00014-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00014-5)
- Baltzer, J. L., Thomas, S. C. 2005. Leaf optical responses to light and soil nutrient availability in temperate deciduous trees. *American Journal of Botany*, 92(2), 214–223. <https://doi.org/10.3732/ajb.92.2.214>
- Barker, D. H., Seaton, G. G. R., Robinson, S. A. 1997. Internal and external photoprotection in developing leaves of the CAM plant *Cotyledon orbiculata*. *Plant, Cell & Environment*, 20(5), 617–624. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1997.00078.x>
- Braendle, R., Crawford, R. M. M. 1999. Plants as amphibians. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, 2(1), 56–78. <https://doi.org/10.1078/1433-8319-00065>
- Buschmann, C., Lenk, S., Lichtenthaler, H. K. 2012. Reflectance spectra and images of green leaves with different tissue structure and chlorophyll content. *Israel Journal of Plant Sciences*, 60(1), 49–64. <https://doi.org/10.1560/IJPS.60.1-2.49>
- Capon, S. J., Brock, M. A. 2006. Flooding, soil seed bank dynamics and vegetation resilience of a hydrologically variable desert floodplain. *Freshwater Biology*, 51(2), 206–223. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2427.2005.01484.x>
- Castro, K., Sanchez-Azofeifa, G. 2008. Changes in spectral properties, chlorophyll content and internal mesophyll structure of senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* leaves. *Sensors*, 8(1), 51–69. <https://doi.org/10.3390/s8010051>
- Chávez, R. O., Clevers, J. G. P. W., Decuyper, M., de Bruin, S., Herold, M. 2016. 50 years of water extraction in the Pampa del Tamarugal basin: Can *Prosopis tamarugo* trees survive in the hyper-arid Atacama Desert (Northern Chile)? *Journal of Arid Environments*, 124, 292–303. <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2015.09.007>

- Cox, E. J. 2011. Morphology, cell wall, cytology, ultrastructure and morphogenetic studies. V J. Sekbach in J. P. Kociolek (ur.), The diatom world. Cellular origin, life in extreme habitats and astrobiology: Vol. 19 (str. 21–45). Dordrecht. Springer. https://doi.org/10.1007/978-94-007-1327-7_2
- Cronk, J. K., Fennessy, M. S. 2001. Wetland plants (1st edition). Boca Raton. CRC Press. 482 str. <https://doi.org/10.1201/9781420032925>
- De Stefano, L., Rea, I., Rendina, I., De Stefano, M., Moretti, L. 2007. Lensless light focusing with the centric marine diatom *Coscinodiscus walesii*. Optics Express, 15(26), 18082. <https://doi.org/10.1364/OE.15.018082>
- DuBois, S., Desai, A. R., Singh, A., Serbin, S. P., Goulden, M. L., Baldocchi, D. D., Ma, S., Oechel, W. C., Wharton, S., Kruger, E. L., Townsend, P. A. 2018. Using imaging spectroscopy to detect variation in terrestrial ecosystem productivity across a water-stressed landscape. Ecological Applications, 28(5), 1313–1324. <https://doi.org/10.1002/eap.1733>
- Enríquez, S., Sand-Jensen, K. 2003. Variation in light absorption properties of *Mentha aquatica* L. as a function of leaf form: Implications for plant growth. International Journal of Plant Sciences, 164(1), 125–136. <https://doi.org/10.1086/344759>
- Fox, A. M. 1992. Macrophytes. V P. Calow in G. E. Petts (ur.), The rivers handbook. Hydrological and ecological principles: Vol. 1 (str. 216–233). Oxford. Blackwell Science.
- Gaberščik, A. 1993. Measurements of apparent CO₂ flux in amphibious plant *Polygonum amphibium* L. growing over environmental gradient. Photosyntetica, 29(3), 159–168.
- Gaberščik, A., Martinčič, A. 1992. Spreminjanje lastnosti listov vodne dresni (*Polygonum amphibium* L.) v gradientu kopno/voda. Biološki Vestnik: Glasilo Slovenskih Biologov, 40(1), 1–11.
- Gao, B.-C., Goetz, A. F. H. 1995. Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. Remote Sensing of Environment, 52(3), 155–162. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00039-4](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00039-4)
- Gao, B.-C., Montes, M. J., Davis, C. O., Goetz, A. F. H. 2009. Atmospheric correction algorithms for hyperspectral remote sensing data of land and ocean. Remote Sensing of Environment, 113, S17–S24. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.015>
- Gao, Z. G., Zhang, L. Q. 2006. Multi-seasonal spectral characteristics analysis of coastal salt marsh vegetation in Shanghai, China. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 69(1–2), 217–224. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2006.04.016>
- Gates, D. M., Keegan, H. J., Schleter, J. C., Weidner, V. R. 1965. Spectral properties of plants. Applied Optics, 4(1), 11. <https://doi.org/10.1364/AO.4.000011>
- Gilmore, M. S., Wilson, E. H., Barrett, N., Civco, D. L., Prisloe, S., Hurd, J. D., Chadwick, C. 2008. Integrating multi-temporal spectral and structural information to map wetland vegetation in a lower Connecticut River tidal marsh. Remote Sensing of Environment, 112(11), 4048–4060. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.05.020>
- Gitelson, A. A., Kaufman, Y. J., Stark, R., Rundquist, D. 2002. Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. Remote Sensing of Environment, 80(1), 76–87. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00289-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00289-9)
- Gran, H. H., Angst, E. C. 1931. Plantkon diatoms of Pudget Sound. University of Washington Press. 103 str.
- Grašič, M., Dobravec, M., Golob, A., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A. 2019a. Water shortage reduces silicon uptake in barley leaves. Agricultural Water Management, 217, 47–56. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.02.030>
- Grašič, M., Malovrh, U., Golob, A., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A. 2019b. Effects of water availability and UV radiation on silicon accumulation in the C₄ crop proso millet. Photochemical in Photobiological Sci-

- ences, 18(2), 375–386. <https://doi.org/10.1039/c8pp00517f>
- Holmes, M. G., Keiller, D. R. 2002. Effects of pubescence and waxes on the reflectance of leaves in the ultraviolet and photosynthetic wavebands: a comparison of a range of species. *Plant, Cell in Environment*, 25(1), 85–93. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2002.00779.x>
- Holmes, M. G., Klein, W. H. 1987. The light and temperature environments. V R. M. M. Crawford (ur.), *Plant Life in Aquatic and Amphibious Habitats* (str. 3–22). Oxford. Blackwell Scientific Publications.
- Huang, S., Tang, L., Hupy, J. P., Wang, Y., Shao, G. 2021. A commentary review on the use of normalized difference vegetation index (NDVI) in the era of popular remote sensing. *Journal of Forestry Research*, 32(1), 1–6. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01155-1>
- Imanishi, J., Sugimoto, K., Morimoto, Y. 2004. Detecting drought status and LAI of two *Quercus* species canopies using derivative spectra. *Computers and Electronics in Agriculture*, 43(2), 109–129. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2003.12.001>
- Klančnik, K., Mlinar, M., Gaberščik, A. 2012. Heterophylly results in a variety of “spectral signatures” in aquatic plant species. *Aquatic Botany*, 98(1), 20–26. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2011.12.004>
- Klančnik, K., Pančič, M., Gaberščik, A. 2014a. Leaf optical properties in amphibious plant species are affected by multiple leaf traits. *Hydrobiologia*, 737(1), 121–130. <https://doi.org/10.1007/s10750-013-1646-y>
- Klančnik, K., Vogel-Mikuš, K., Gaberščik, A. 2014b. Silicified structures affect leaf optical properties in grasses and sedge. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 130, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2013.10.011>
- Klančnik, K., Vogel-Mikuš, K., Kelemen, M., Vavpetič, P., Pelicon, P., Kump, P., Jezeršek, D., Gianoncelli, A., Gaberščik, A. 2014c. Leaf optical properties are affected by the location and type of deposited biominerals. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 140, 276–285. <https://doi.org/10.1016/j.jphotobiol.2014.08.010>
- Klančnik, K., Zelnik, I., Gnezda, P., Gaberščik, A. 2015a. Do reflectance spectra of different plant stands in wetland indicate species properties? V *The role of natural and constructed wetlands in nutrient cycling and retention on the landscape* (str. 73–86). Cham. Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08177-9_6
- Klančnik, K., Gradinjan, D., Gaberščik, A. 2015b. Epiphyton alters the quantity and quality of radiation captured by leaves in submerged macrophytes. *Aquatic Botany*, 120, 229–235. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.07.007>
- Klančnik, K., Gaberščik, A. 2016. Leaf spectral signatures differ in plant species colonizing habitats along a hydrological gradient. *Journal of Plant Ecology*, 9(4), 442–450. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtv068>
- Klančnik, K., Iskra, I., Gradinjan, D., Gaberščik, A. 2018. The quality and quantity of light in the water column are altered by the optical properties of natant plant species. *Hydrobiologia*, 812(1), 203–212. <https://doi.org/10.1007/s10750-017-3148-9>
- Knipling, E. B. 1970. Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 1(3), 155–159. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(70\)80021-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(70)80021-9)
- Kordyum, E., Klimenko, E. 2013. Chloroplast ultrastructure and chlorophyll performance in the leaves of heterophyllous *Nuphar lutea* (L.) Smith. plants. *Aquatic Botany*, 110, 84–91. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2013.05.013>
- Kulik, M., Sender, J., Bochniak, A., Jaźwa, M., Ciesielski, D. 2023. The influence of mowing frequency on the growth and development of *Phragmites australis*. *Journal for Nature Conservation*, 76, 126492. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126492>

- Kumar, L., Mutanga, O. 2017. Remote sensing of above-ground biomass. *Remote Sensing*, 9(9), 935. <https://doi.org/10.3390/rs9090935>
- Larcher, W. 2003. *Physiological plant ecology: ecophysiology and stress physiology of functional groups* (4th edition). Berlin. Springer. 514 str.
- Levizou, E., Drilias, P., Psaras, G. K., Manetas, Y. 2005. Nondestructive assessment of leaf chemistry and physiology through spectral reflectance measurements may be misleading when changes in trichome density co-occur. *New Phytologist*, 165(2), 463–472. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2004.01250.x>
- Liew, O., Chong, P., Li, B., Asundi, A. 2008. Signature optical cues: Emerging technologies for monitoring plant health. *Sensors*, 8(5), 3205–3239. <https://doi.org/10.3390/s8053205>
- Neill, S. O., Gould, K. S. 2003. Anthocyanins in leaves: light attenuators or antioxidants? *Functional Plant Biology*, 30(8), 865. <https://doi.org/10.1071/FP03118>
- Ojdanič, N., Zelnik, I., Holcar, M., Gaberščik, A., Golob, A. 2023a. Contrasting dynamics of littoral and riparian reed stands within a wetland complex of Lake Cerknica. *Plants*, 12(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/plants12051006>
- Ojdanič, N., Holcar, M., Golob, A., Gaberščik, A. 2023b. Environmental extremes affect productivity and habitus of common reed in intermittent wetland. *Ecological Engineering*, 189, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106911>
- Ollinger, S. V. 2011. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. *New Phytologist*, 189(2), 375–394. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03536.x>
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete, A. R., Kerr, Y. H., Sorooshian, S. 1994. A modified soil adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 119–126. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90134-1](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90134-1)
- Reiderer, M., Müller, C. 2006. *Biology of the Plant Cuticle*. Oxford. Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470988718>
- Robberecht, R., Caldwell, M. M., Billings, W. D. 1980. Leaf ultraviolet optical properties along a latitudinal gradient in the arctic-alpine life zone. *Ecology*, 61(3), 612–619. <https://doi.org/10.2307/1937427>
- Robe, W. E., Griffiths, H. 2000. Physiological and photosynthetic plasticity in the amphibious, freshwater plant, *Littorella uniflora*, during the transition from aquatic to dry terrestrial environments. *Plant, Cell in Environment*, 23(10), 1041–1054. <https://doi.org/10.1046/j.1365-3040.2000.00615.x>
- Rozema, J., Björn, L. O., Bornman, J. F., Gaberščik, A., Häder, D.-P., Trošt, T., Germ, M., Klisch, M., Gröninger, A., Sinha, R. P., Lebert, M., He, Y.-Y., Buffoni-Hall, R., de Bakker, N. V. J., van de Staaij, J., Meijkamp, B. B. 2002. The role of UV-B radiation in aquatic and terrestrial ecosystems—an experimental and functional analysis of the evolution of UV-absorbing compounds. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology*, 66(1), 2–12. [https://doi.org/10.1016/S1011-1344\(01\)00269-X](https://doi.org/10.1016/S1011-1344(01)00269-X)
- Sims, D. A., Gamon, J. A. 2002. Relationships between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. *Remote Sensing of Environment*, 81(2–3), 337–354. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00010-X](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00010-X)
- Šraj Kržič, N., Gaberščik, A. 2005. Photochemical efficiency of amphibious plants in an intermittent lake. *Aquatic Botany*, 83(4), 281–288. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2005.05.012>
- Ullah, S., Schlerf, M., Skidmore, A. K., Hecker, C. 2012. Identifying plant species using mid-wave infrared (2.5–6µm) and thermal infrared (8–14µm) emissivity spectra. *Remote Sensing of Environment*, 118, 95–102. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.008>
- Ustin, S. L., Gamon, J. A. 2010. Remote sensing of plant functional types. *New Phytologist*, 186(4), 795–816. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03284.x>
- Vicente-Serrano, S. M., Camarero, J. J., Olano, J. M., Martín-Hernández, N., Peña-Gallardo, M., Tomás-Burguera, M., Gazol, A., Azorin-Molina, C., Bhuyan, U., El Kenawy, A. 2016. Diverse relationships between

en forest growth and the Normalized Difference Vegetation Index at a global scale. *Remote Sensing of Environment*, 187, 14–29. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.001>

Williams, D. L., Goward, S., Arvidson, T. 2006. Landsat. *Photogrammetric Engineering in Remote Sensing*, 72(10), 1171–1178. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.10.1171>

Woolley, J. T. 1971. Reflectance and transmittance of light by leaves. *Plant Physiology*, 47(5), 656–662. <https://doi.org/10.1104/pp.47.5.656>

Yamanaka, S., Yano, R., Usami, H., Hayashida, N., Ohguchi, M., Takeda, H., Yoshino, K. 2008. Optical properties of diatom silica frustule with special reference to blue light. *Journal of Applied Physics*, 103(7). <https://doi.org/10.1063/1.2903342>

Yoder, B. J., Pettigrew-Crosby, R. E. 1995. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400–2500 nm) at leaf and canopy scales. *Remote Sensing of Environment*, 53(3), 199–211. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(95\)00135-N](https://doi.org/10.1016/0034-4257(95)00135-N)

Yoshimura, H., Zhu, H., Wu, Y., Ma, R. 2010. Spectral properties of plant leaves pertaining to urban landscape design of broad-spectrum solar ultraviolet radiation reduction. *International Journal of Biometeorology*, 54(2), 179–191. <https://doi.org/10.1007/s00484-009-0267-7>

Vpliv košnje na trstišča Cerkniškega jezera

Nik Ojdanič, Mateja Germ, Matej Holcar, Igor Zelnik, Aleksandra Golob

Uvod

Cerkniško jezero je presihajoči ekosistem, ki se nahaja na dnu Cerkniškega polja. Glavna značilnost takšnega ekosistema je menjavanje suhega in mokrega obdobja (Dolinar in sod., 2010). Območje je v povprečju poplavljenno 9 mesecev letno (Kranjc, 2002). V juniju ali juliju, ob zadostnem pomanjkanju padavin, se Cerkniško jezero v poletnih obdobjih izsuši vse do jeseni, ko višek padavin ponovno napolni večji del območja. Proces sušenja in polnjenja jezera lahko v posameznih letih močno odstopa od povprečja, saj je pogojen z letno razporeditvijo ter količino padavin (Dolinar in sod., 2016). Obseg, globina in dolžina trajanja zalitega obdobja so vodilni dejavniki za edinstveno prostorsko razporeditev in veliko pestrost rastlinskih združb. Rastlinske vrste, ki niso prilagojene na poplavljanje, se v takšnih ekosistemih z vidika višinskega gradienta, navadno pojavljajo na višje ležečih območjih, kjer je vpliv vode manjši (Luo in sod., 2008). Rastlinske vrste, prilagojene na visok vodostaj, pa se navadno pojavljajo na nižjih območjih. Vrstna pestrost na nižjih območjih je prav tako manjša v primerjavi z višjimi, bolj suhimi območji (Dwire in sod., 2004; Gaberščik in sod., 2018). Pomemben dejavnik, ki vpliva na prostorsko razporeditev rastlinskih združb, je tudi košnja. Robni in nekoliko dvignjeni predeli Cerkniškega jezera bi v odsotnosti košnje sledili procesu sukcesije in se zarasli z grmičevjem in drevesnimi vrstami. Košnja tako predstavlja fizično motnjo, ki zavira proces sukcesije in v primeru ustreznega upravljanja, ohranja vrstno pestrost rastlinskih vrst, ki se pojavljajo v mokriščih (Cattin in sod., 2003). V osrednjem delu jezera, kjer so spremembe vodostaja velike, proces sukcesije zavira daljša vodna faza, ki preprečuje razvoj lesnatih vrst.

Velik del Cerkniškega jezera poraščajo močvirske združbe. Najobsežnejše sestoje tvorijo navadni trst (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.), pisana čužka (*Phalaris arundinacea* L.) in togi šaš (*Carex elata* All.) (Martinčič in Leskovar, 2003). V letih z visokim vodostajem tvori velike sestoje tudi jezerski biček (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla). Navadni trst je kozmopolitska vrsta. Primarno se širi vegetativno s podzemnimi rizomi, iz katerih izraščajo genetsko enaka stebila, kar omogoča hitro širjenje. Spolno razmnoževanje preko semen je prav tako prisotno, vendar manj pogosto. Navadni trst odcveti jeseni, ko posamezne rastline tvorijo veliko količino semen (Avers in sod., 2014). Glavni vektorji prenosa semen so veter, voda in ptice (Haslam, 1972). Semena navadno kalijo na odkritih vlažnih tleh spomladi, ko temperature presežejo 10 °C (Fofonoff in sod., 2018). Navadni trst ima široko ekološko valenco, kar mu omogoča, da raste tudi v slanih in anoksičnih tleh. Prav tako je prilagojen na širok razpon pH (od 3,9 do 8,6) tal (Fofonoff in sod., 2018). Kar se tiče temperature ima trst širok razpon uspevanja z izjemo nizkih temperatur v začetku vegetacijske sezone, ki povzročajo zmrzal (Haslam, 1972). Ob optimalnih razmerah tvori goste in visoke ter izjemno produktivne enovrstne sestoje (Den Hartog in sod., 1989).

Na Cerkniškem jezeru je navadni trst pomembna rastlinska vrsta, saj zagotavlja številne ekosistemske storitve. Privzema in skladišči minerale, anorganski ogljik ter pripomore k učinkovitemu delovanju mikrobne združbe v tleh (Kiviat, 2013). Kljub temu, da navadni trst negativno vpliva na rast ostalih rastlinskih vrst, trstišča višajo biotsko pestrost, saj predstavljajo habitat različnim žuželkam, dvoživkam in pticam. Na Cerkniškem jezeru so trstišča predvsem pomembna za specialiste, kot so mali ponirek (*Tachybaptus ruficollis* Pallas), liska (*Fulica atra* L.), srpična trstnica

(*Acrocephalus scirpaceus* Hermann), rakar (*Acrocephalus arundinaceus* L.) in mokož (*Rallus aquaticus* L.) (Kmecl in sod., 2022). Zaradi teh razlogov je v tem letno spreminjajočem se ekosistemu pomembno razumeti kako košnja, v kombinaciji s spremembami vodostaja, vpliva na trstišča.

Vpliv košnje na navadni trst

Dosedanje raziskave o vplivu košnje na navadni trst so v veliki meri povezane s širjenjem navadnega trsta v ekosisteme, kjer navadni trst zaradi svoje široke ekološke valence in visoke kompeticijske sposobnosti izpodriva ostale rastlinske vrste (Čížková in sod., 2023). V tovrstnih raziskavah gre primarno za iskanje metod omejevanja rasti evropskega genotipa navadnega trsta v različnih mokriščnih ekosistemih. Zaradi tega so raziskave, katerih cilj je način upravljanja ter ohranjanja navadnega trsta v avtohtonih habitatih, manj pogoste. Košnja je pogosto uporabljen ukrep za omejevanje širjenja navadnega trsta, uspešnost omejevanja pa je odvisna od časa košnje in števila zaporednih košenj. Vpliv košnje na trstišča je možno spremljati z meritvami znakov vitalnosti trsta, kot so številčnost, širina bazalnega premera, višina stebel, biomasa in viabilnost rizomov.

Velik poudarek v raziskavah za omejevanje rasti trsta je predvsem določitev optimalnega časa za košnjo. Kulik in sod. (2023) so v večletni študiji raziskali vpliv različnega režima košnje na sestoje trsta znotraj mokrotnega travnika. Znotraj teh ekosistemov so sestoji trsta nezaželeni, saj izpodrivajo številne vrste trav in šašev, ki tam uspevajo. Kulik in sod. (2023) so prikazali, da košnja poveča številčnost stebel, ampak se hkrati z vsakoletno košnjo višina stebel manjša. Višina stebel je indikator vitalnosti navadnega trsta, ki v optimalnih razmerah lahko zraste tudi več kot 4 m (Tóth in Szabó, 2012), kar nakazuje na to, da vsakoletna košnja negativno vpliva na trstišča, saj onemogoča ustvarjanje zaloga v koreninah. Večkratna zaporedna košnja v istem letu prepreči cvetenje, medtem ko enkratna košnja izvedena v septembru vzpodbuja tvorbo socvetij v naslednji sezoni. Navadni trst se v optimalnih razmerah razmnožuje vegetativno, košnja kot motnja, pa spodbudi spolno razmnoževanje preko povečanega števila semen zaradi tvorbe socvetij (Tóth in Szabó, 2012). Güsewell (2000) v primeru zimske košnje v rotacijski shemi treh let na nizkih barjih, ni zaznal sprememb v številu, višini in bazalnem premeru poganjkov. V takšnih ekosistemih košnja, ki se ne izvaja letno, zavira proces sukcesije in hkrati ohranja vitalna trstišča. V primeru vsakoletne košnje poleti ali pozimi, je košnja dolgoročno negativno vplivala na število poganjkov in na širino bazalnega premera, dvakratna košnja v istem letu junija in septembra pa je povečala številčnost poganjkov ob sočasnem zmanjšanju bazalnega premera (Güsewell, 2000). Enkratna vsakoletna košnja v septembru je dolgoročno zmanjšala število poganjkov, višino poganjkov ter njihovo biomaso. Takšen režim košnje je hkrati najbolj podoben režimu košnje na Cerkniškem jezeru na določenih območjih. Do podobnega zaključka je prišel tudi Derr (2008) v poskusu, kjer so trstišča kosili in uporabljali različne herbicide z namenom zatiranja trsta. Ob večkratni košnji v istem letu je zabeležil 55 % zmanjšanje v biomasi trsta v naslednji sezoni. Ob uporabi herbicida, ki predstavlja dodaten stresor, se je biomasa zmanjšala za 90 %. Večkratna košnja v isti rastni sezoni izčrpa zaloge v rizomih kar posledično zmanjša uspešnost rasti nadzemnih delov v naslednji rastni sezoni (Güsewell, 2003). Izčrpanost rizomov v kombinaciji z dodatnimi stresorji, v tem primeru herbicidi, naknadno oslabi oziroma onemogoči rast. Neko-liko drugačen pristop spremljanja vpliva košnje so izbrali Tiškus in sod. (2023), ki so z uporabo tehnik daljinskega zaznavanja uspešno ločili jezerske sestoje trsta od proste vode na satelitskih posnetkih Sentinel-2. V večletnem spremljanju vpliva vsakoletne košnje na jezeru Plateliai v Litvi so zaznali očitno krčenje trstišč.

Večina raziskav vpliva košnje na trst je vezana na mokrišča, ki niso, oziroma so le deloma primerljiva s sistemom na Cerkniškem jezeru, kjer je potrebno upoštevati tudi vpliv povišanega vodostaja, predvsem v obdobju po izvedeni košnji in v začetku rastne sezone. Pri normalnih razmerah ob koncu vegetacijske sezone navadni trst premešča energijske rezerve iz nadzemnih delov rastline v rizome, medtem ko listi v procesu senescence odpadejo, kar mu omogoča uspešno prezimovanje. Hkrati se celične stene celic v steblih odebelijo in lignificirajo (Nikolajevskij, 1971). Lignificirana stebela delujejo kot prevodna tkiva, ki v procesu Venturijeve konvekcije zaradi tlačnih razlik med zunanostjo in notranostjo stebela, dovajajo kisik v rizome (Armstrong in sod., 1996). Dovod kisika v rizome omogoča, da navadni trst preživi v anoksičnih tleh izven vegetacijske sezone (Armstrong in sod., 1992). Na Cerkniškem jezeru košnja jeseni lahko onemogoči dovod kisika v rizome zaradi porezanih stebel, ki jih ob dvigu vodostaja zalije voda (sliki 1 in 2).



Slika 1: Primerjava košenih in nekošenih trstišč ob dvigu vodostaja pri Otoku, Cerkniško jezero (foto: Matej Holcar, 15.07.2023)

Viabilnost rizomov je odvisna od njihove starosti in predhodnih vegetacijskih sezon, kar je primarno povezano s količino rezerv. V času začetne rasti v prihodnji rastni sezoni, ko je navadni trst še pod vodno gladino, tvori adventivne korenine pri internodijih stebela in zračne filme na površini potopljenih listov, ki omogočajo izmenjavo plinov za fotosintezo (Colmer in sod., 2011). V takšnih razmerah je fotosinteza manjša kot nad vodno gladino, zato je navadni trst odvisen od zaloga v rizomih, ki mu omogočijo, da čim hitreje izraste iz vode. Vsakoletna košnja tako postopoma izčrpa rizome ter zmanjša njihovo viabilnost, kar se odraža na vitalnosti nadzemnih delov rastlin trsta (Widin in sod., 2023). Na Cerkniškem jezeru je za trstišča pomembna tudi višina vodne gladine v začetku rastne sezone. Visok vodostaj, ki vztraja dalj časa v začetku rastne sezone, tako onemogoči hiter preboj nadzemnih delov nad vodno gladino, kar se kasneje v rastni sezoni izrazi v obliki oslabiljene vitalnosti rastlin (Ojdanič in sod., 2023a). Vsakoletna košnja ob koncu rastne sezone, ki ji sledijo poplave, ki vztrajajo tudi v času začetne rasti, ima lahko negativen vpliv na vitalnost trsta in povzroča krčenje trstišč (Rolletschek, 2000).

Košnja trstišč nima samo neposrednega vpliva na navadni trst, ampak hkrati posredno vpliva na vrstno pestrost ostalih organizmov, primarno na specialiste, ki so prilagojeni na trstišča. Balčiauskas in Balčiauskiene (2022) sta v večletnem spremljanju populacije majhnih sesalcev v mokrotnem travniku ugotovila izgubo biotske pestrosti po poplavih zaradi košnje trstišč. Posebej prizadeta vrsta je bila pritlikava miš (*Micromys minutus* (Pallas, 1771)), specialist, ki je sicer prilagojen na poplave (Balčiauskas in sod., 2012).



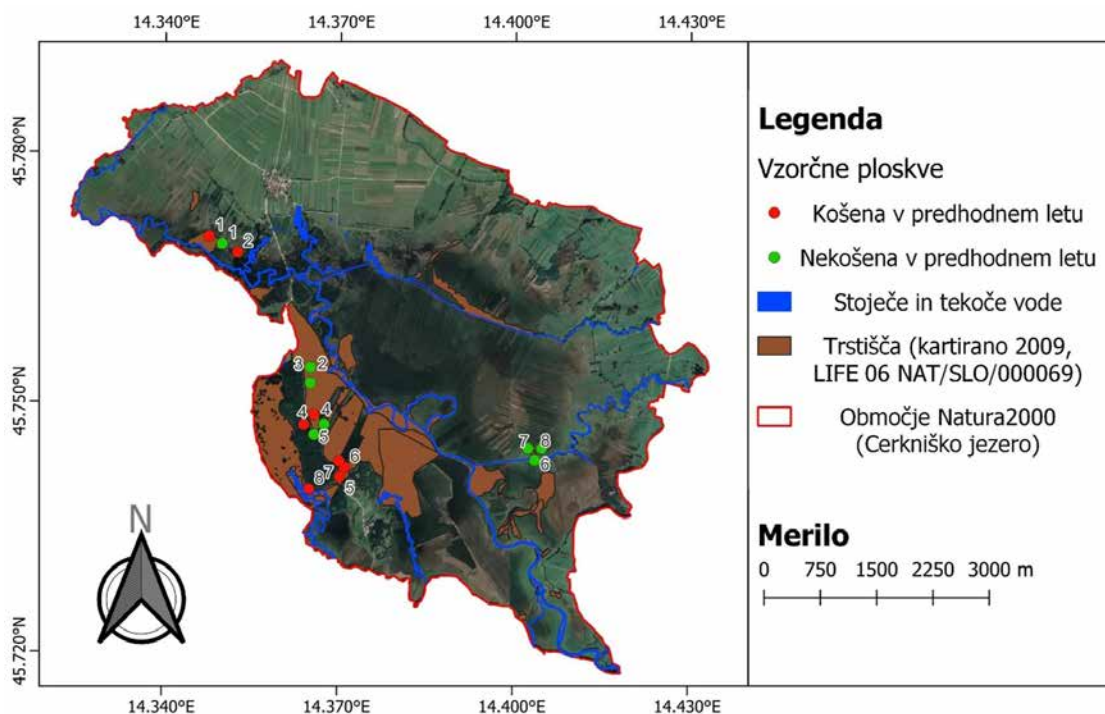
Slika 2: Pogled na trstišča Zadnjega kraja v zimskem času. Bele proge na levem delu slike odkrivajo, da so bila trstišča pokošena (foto: Matej Blatnik).

Populacija pritlikave miši se je znatno zmanjšala zaradi spremembe upravljanja (uveljavljanje redne košnje trstišč), ki je vodila do krčenja trstišč. Košnja trstišč ne vpliva samo na majhne sesalce ampak tudi na številne nevretenčarje. Košnja trstišč znotraj mokrotnih travnikov negativno vpliva na združbo pajkov. Cattin in sod. (2003) poročajo o zmanjšanju številčnosti pajkov, ki so vezani na posušena stebila trsta in na njegov opad. Do podobne ugotovitve so prišli Bogusch in sod. (2020) pri čebelah in osah, ki so neposredno vezane na trstišča, oziroma gnezdi v šiškah trsta, ki jih povzročijo muhe iz rodu *Lipara*. Primer dobre prakse za upravljanje s trstičjem in ohranjanjem vrst, vezanih na trstišča, so mokrišča na območju Grande Cariçaie v Švici. Antoniazza in sod. (2018) so v 30 letnem obdobju spremljali populacije petih ptic (srpična trstnica – *Acrocephalus scirpaceus* (Hermann, J 1804), trstni cvrčalec – *Locustella luscinioides* (Savi, 1824), trstni strnad – *Emberiza schoeniclus* (Linnaeus, 1758), mokož – *Rallus aquaticus* (Linnaeus, 1758), brkata sinica – *Panurus biarmicus* (Linnaeus, 1758)) glede na način upravljanja trstišč. Tri od naštetih vrst se prav tako pojavljajo na območju Cerkniškega jezera (Kmecl in sod., 2022). Vzpostavili so rotacijski sistem košnje, v katerem so izmenjujoče kosili trstišča na takšen način, da so ohranili čim večjo heterogenost z vidika starosti. Opazili so, da se ptice izogibajo trstičjem, ki so bila v predhodni sezoni košena, kar kaže na to, da je potrebno več kot eno leto, da vegetacijska zgradba trstišč doseže optimum za ptice. Trstišča navadno potrebujejo več let

za ponovno vzpostavitev ravnovesja po motnji, kot je košnja (Vadász in sod., 2008). Največja pestrost ptic je bila zabeležena v trstiščih tri oziroma štiri leta po košnji, dolgoletno pa zaradi košnje na rotacijski način niso zaznali trenda upada v številčnosti opazovanih vrst ptic.

Stanje na Cerknškem jezeru 2023

Na območju Cerknškega jezera je bilo v letih 2021 in 2022 ekstremno sušno poletno obdobje. Voda je odtekla pred začetkom poletja in vodotok Stržen je bil v celoti izsušen. Suhe razmere so omogočale povečan obseg košnje trstišč. V rastni sezoni 2023 smo tako lahko primerjali stanje v predhodnem letu košenih trstišč in trstišč, ki niso bila košena. Osredotočili smo se predvsem na litoralne, oziroma jezerske sestoje, ki so bolj oddaljeni od glavnega vira vode kot obrežni sestoji. Na Cerknškem jezeru je večina takšnih sestojev v bližini večjih in manjših depresij, ki se v poletnem obdobju izsušijo. Jezerski sestoji so zaradi tega pod večjim pritiskom stresnih dejavnikov (Ojdanič in sod., 2023b). Največji sestoj jezerskih trstišč je na območju Zadnjega kraja. Glede na oba omenjena načina upravljanja, smo določili 8 vzorčnih ploskev površine 9 m², znotraj katerih smo popisali vrstno pestrost vegetacije po prirejeni metodi Braun-Blanquet (1964) in opravili številne morfološke meritve in meritve produktivnosti trsta (slika 3).



Slika 3: Zemljevid vzorčnih ploskev jezerskih trstišč na območju Cerknškega jezera.

Skupna biomasa rastlin ter biomasa listov se statistično razlikuje med košenimi ploskvami in ploskvami, ki v predhodnem letu niso bile košene, medtem ko je bila biomasa listov le mejno statistično značilna (preglednica 1). Biomasa trsta na nekošenih ploskvah je bila višja in bolj variabilna v primerjavi s košenimi ploskvami. Rezultati so v skladu s podobnimi raziskavami (Derr, 2008; Fogli in sod., 2014; Güsewell, 2000), kar nakazuje, da na Cerknškem jezeru košnja na koncu vegetacijske sezone negativno vpliva na produktivnost navadnega trsta v naslednjem letu. Očitna razlika med ploskvami z različnim načinom upravljanja je bila v številu posameznih rastlin

trsta znotraj ploskve. Povprečno število rastlin navadnega trsta na košenih ploskvah je bilo 85 na kvadratni meter, medtem ko je bilo povprečno število rastlin na nekošenih ploskvah bistveno manjše (preglednica 1). Povečano število rastlin navadnega trsta je lahko rezultat zmanjšane količine organskega ogljika v tleh, saj košnja in odstranjevanje košene biomase zmanjša količino počasi razgradljivih odmrlih stebel, kar posledično omogoča kalitev semen trsta (Cui in sod., 2022). Možno je, da kombinacija pozne košnje ter dviga vodostaja izčrpa obstoječe rizome do takšne mere, da novozrasli poganjki iz rizomov ne uspejo kompeticijsko zatreti kalečih rastlin trsta. Vpliv košnje je viden tudi pri primerjanju določenih morfoloških značilnosti navadnega trsta. Čeprav je bilo na ploskvah, ki predhodno niso bile košene, manj rastlin navadnega trsta, so bile te v povprečju za 67,8 cm višje od rastlin na košenih ploskvah (preglednica 1). Vpliv košnje na višino trsta je na Cerkniškem jezeru podoben kot na mokrotnih travnikih (Kulik in sod., 2023). Višina stebel kot indikator vitalnosti navadnega trsta, dodatno pokaže negativen vpliv košnje na jezerska trstišča Cerkniškega jezera. Pri primerjavi povprečnega števila listov na rastlino, nismo zaznali statistično značilnih razlik med košenimi in nekošenimi ploskvami. Pri primerjavi bazalnega premera stebel je razvidno, da so bila stebila rastlin navadnega trsta na ploskvah, ki niso bile košene, debelejša kar je verjetno prav tako posledica večje viabilnosti rizomov. Zmanjšanje bazalnega premera stebel je pogost odziv na stresne dejavnike pri navadnem trstu (Mook in van der Toorn, 1985). Listni indeks (ALI) je bil v povprečju večji pri navadnem trstu na ploskvah, ki niso bile košene, ampak kljub temu ni bilo statistično značilnih razlik (preglednica 1). Čeprav je bila površina lista večja pri nekošenem trstu, je na košenih ploskvah večje število rastlin navadnega trsta in posledično večje skupno število listov, kar je razlog za primerljiv LAI. Širina bazalnega premera in dolžina listov ter posledično listna površina so pri navadnem trstu v pozitivni korelaciji (Hong in sod., 2019). Podobno kot Kulik in sod. (2023), smo močno izraženo tvorbo socvetij pri trstu zabeležili izključno na ploskvah, ki so bile v predhodnem letu košene. Visoka variabilnost znotraj ploskev, ki predhodno niso bile košene, se lahko pojavi zaradi ekotipskega značaja navadnega trsta ter njegove prilagojenosti na razmere v različnih habitatih (Hanganu in sod., 1999). V tem primeru je glavni dejavnik prilagoditev trsta na spremembe vodostaja, ki se med posameznimi jezerskimi ploskvami razlikuje zaradi različnih topografskih značilnosti, pogojenih z lokacijo. Na večjo variabilnost nekošenih ploskev verjetno vpliva tudi različna starost trsta nekošenih ploskev (različno število let rasti po opuščeni košnji).

Preglednica 1: Povprečne vrednosti in standardne deviacije morfoloških parametrov in parametrov produktivnosti pri košenih in nekošenih ploskvah. Prikazane so p-vrednosti primerjalnih testov (Studentov t-test in Wilcoxon test).

Lastnost	Košeni sestoji	Nekošeni sestoji	p – vrednost
Biomasa listov (g/m ²)	131,3 ± 30,2	200,5 ± 83,2	0,0558
Biomasa stebel (g/m ²)	377,9 ± 69,6	621,9 ± 267,5	0,0373
Skupna biomasa (g/m ²)	509,1 ± 98,3	822,4 ± 347,8	0,0394
Število rastlin (n/m ²)	85 ± 27,6	54,5 ± 17,9	0,0223
Višina stebel (cm)	148,9 ± 18,4	216,7 ± 56,2	0,0274
Število listov (n/rastlino)	10,2 ± 1,1	12,2 ± 2,6	0,0680
Bazalni premer stebel (mm)	5,1 ± 0,6	6,9 ± 0,7	0,0001
Površina lista (cm ²)	17,5 ± 5,6	27,3 ± 8,3	0,0176
Listni indeks (LAI) (m ² /m ²)	1,4 ± 0,3	1,8 ± 1,0	0,2824

Na podlagi rezultatov morfoloških meritev je vidno, da košnja pozno v rastni sezoni negativno vpliva na vitalnost jezerskih sestojev trsta na Cerkniškem jezeru in posledično na njihovo produktivnost. Od morfoloških značilnosti je najbolj izstopala višina trsta. V višini rastlin je bila razlika tako izrazita, da je bilo možno na terenu ločiti parcele, ki so bile v prejšnjem letu košene od tistih, ki niso bile (slika 4).

Prav tako povedni so rezultati popisov vrstne pestrosti in številčnosti. Na košenih ploskvah smo v povprečju zabeležili 9 vrst, medtem ko na nekošenih v povprečju zabeležili le 6 vrst (preglednica 2). Pri košenih ploskvah smo največ vrst zabeležili znotraj prve ploskve, ki se nahaja na osrednjem delu jezera v bližini vodnega zadrževalnika. Pri nekošenih ploskvah smo prav tako zabeležili največ vrst znotraj prve ploskve, ki se prostorsko nahaja na istem območju (slika 2). Najmanj vrst smo zabeležili na nekošenih ploskvah 2 in 3, ki se nahajajo na območju Trščenk v bližini večje depresije znotraj katere zastaja voda. Zastajanje vode je znak, da te ploskve navadno niso košene tudi v ekstremno sušnih letih. Takšna območja je zaradi topografskih značilnosti težje kositi z uporabo mehanizacije.



Slika 4: Ortofoto (levo) in digitalni model površine (desno), ki prikazuje razliko v višini košenega in nekošenega trstišča.

Preglednica 2: Število popisanih vrst znotraj posamezne ploskve glede na način upravljanja.

Ploskev	Število vrst na ploskvah									
	Skupno število	1	2	3	4	5	6	7	8	Povprečje
Košene	24	14	9	9	5	13	8	6	11	9,375
Nekošene	17	12	2	3	5	6	7	8	7	6,25

Rezultati Shannon-Wienerjevega diverzitetnega indeksa, ki poleg števila zabeleženih vrst hkrati upošteva še njihovo številčnost, so podobni rezultatom števila vrst znotraj ploskev. Vrstna pestrost je bila znotraj košenih ploskev večja v primerjavi z nekošenimi ploskvami (preglednica 3). Največja vrstna pestrost znotraj nekošenih ploskev je bila v prvi ploskvi, ki je bolj podobna vsem košenim ploskvam. Indeks vrstne pestrosti pri ostalih nekošenih ploskvah je bil bistveno manjši. Rezultati vrstne pestrosti na prvi nekošeni ploskvi, ki očitno izstopa od ostalih, kažejo, da je bila ta ploskev verjetno nekošena šele drugo rastno sezono. Število vrst ter njihova številčnost sta hkrati dobra pokazatelja vitalnosti trstišč. Navadni trst je izjemno kompetitivna vrsta s široko ekološko valenco in posledično je dobro prilagojena na različne fiziološke stresne dejavnike. Zaradi hitre rasti in visokih nadzemnih in globokih podzemnih delov, kompeticijsko izključuje os-

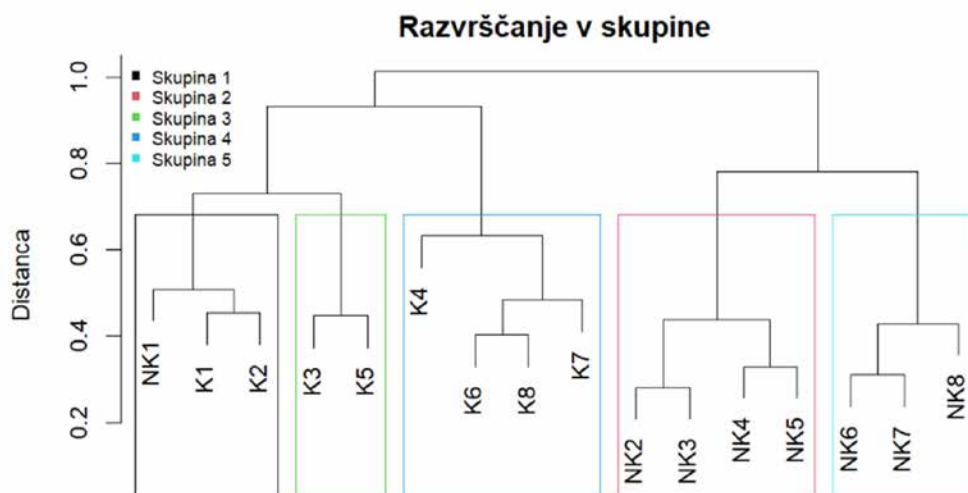
tale rastlinske vrste, saj bolj učinkovito izkorišča dane vire (vodo, minerali in svetlobo) (Ailstock in sod., 2001). V takšnem primeru so vitalna trstišča z vidika rastlinskih vrst manj pestra, saj v njih izrazito prevladuje navadni trst (Burdick in Konisky, 2003). Navadni trst je slabše prilagojen na motnje, ki povzročajo mehanske poškodbe. Tako je zaradi košnje kompeticijska sposobnost navadnega trsta oslABLJENA in do kompeticijskega izključevanja ne prihaja, kar se kaže v večji vrstni pestrosti znotraj košenih ploskev.

Preglednica 3: Shannon – Wiener diverzitetni indeks znotraj posamezne ploskve glede na način upravljanja.

Ploskev	Shannon – Wiener diverzitetni indeks								Povprečje
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Košene	2,02	1,67	1,78	1,05	2,21	1,55	1,27	1,90	1,68
Nekošene	2,01	0,21	0,40	0,83	0,97	1,23	1,44	1,29	1,05

Rezultati primerjave vrstne sestave znotraj posameznih ploskev na najnižji hierarhični ravni razdelijo vzorčne ploskve v dve veji, košene in nekošene (slika 5). Razločna ločitev jasno prikaže, da košnja izrazito vpliva na vrstno sestavo vegetacije znotraj trstišč.

Sprememba habitatne zgradbe neposredno vpliva na vrstno sestavo (Kitazawa in Ohsawa, 2002). Celostno gledano smo ploskve razvrstili v pet različnih skupin. Znotraj košenih ploskev smo določili tri različne skupine pri čemer se je skupina 1 prostorsko ločila od skupin 3 in 4 (slika 1). Znotraj prve skupine je bila prisotna tudi nekošena ploskev 1, kar dodatno nakazuje na to, da se je na tem mestu košnja opustila v letu 2022 in vegetacijska struktura znotraj ploskve še ni stabilna. Pri nekošenih ploskvah smo določili dve skupini, 2 in 5, ki sta prav tako prostorsko ločeni. Skupina 5 vključuje tri vzorčne ploskve, ki se nahajajo v nekdanji, danes neaktivni strugi Lipsenjščice, medtem ko skupina 2 vključuje 4 ploskve, ki se nahajajo na območju Trščenk (slika 1). Razlike v vrstni sestavi znotraj nekošenih ploskev so posledica različnih mikrolokacij in starosti trstišč. Vrstna struktura znotraj trstišča je tesno povezana s starostjo trstišča. Način upravljanja, ki zagotavlja veliko heterogenost z vidika starosti trstišč, zagotavlja največjo vrstno pestrost tako rastlinskih kot živalskih vrst (Andersen in sod., 2021).



Slika 5: Dendrogram vrstne pestrosti košenih (K) in nekošenih (NK) ploskev trstišč (Wardova metoda povezovanja, z Bray-Curtisovim indeksom podobnosti).

Zaključek

Košnja ima pomemben vpliv na trstišča na območju Cerkniškega jezera, podobno kot na mokrotnih travnikih, nizkih barjih in v obrežnem pasu jezer. V jezerskih sestojih navadnega trsta, ki so zaradi večjih sprememb v vlažnosti tal pogosteje izpostavljeni stresnim razmerah kot obrežni sestoji, košnja negativno vpliva na vitalnost trsta, saj vpliva na njegove morfološke lastnosti in zmanjšuje produktivnost. Kljub temu košnja na robnih predelih Cerkniškega jezera ohranja trstišča, saj zavira proces sukcesije in onemogoča prehod v lesnato vegetacijo. Na določenih predelih, kot sta Zadnji kraj in Trščenke, kjer proces sukcesije zavira voda, pa vsakoletna košnja trstišč ni smiselna. Ukrepi oziroma načini upravljanja z navadnim trstom so pogosto povezani z rastlinskimi ali živalskimi vrstami, ki so vezane na trstišča, oziroma jim trstišča predstavljajo neugoden habitat. Upravitelji ekosistemov ravnajo z navadnim trstom glede na tarčne vrste, in način košnje je pogosto takšen, da podpira prisotnost tarčnih vrst. V primeru želje ohranjanja specialistov, ki potrebujejo stabilna trstišča, bi morala biti košnja zelo omejena. V nasprotnem primeru, ko navadni trst omejuje določeno vrsto, je namen košnje pogosto krčenje trstišč. V primeru Cerkniškega jezera, kjer navadni trst zagotavlja številne ekosistemske storitve, bi bilo najbolje zagotoviti mozaičnost trstišč z večjim poudarkom na stabilnih trstiščih, kjer bi se košnja izvajala le po potrebi in ne vsakoletno.

Summary

The influence of mowing on reed stands in Lake Cerknica

Lake Cerknica, situated in the bottom of the karstic polje known as Cerknica Polje, is an intermittent wetland. The distinguishing feature of this ecosystem is the periodic fluctuation of water levels, leading to alternating flooded and dry periods. On average, Lake Cerknica experiences flooding for approximately 9 months each year. The duration of dry and flooded phases may vary, contingent upon the annual distribution and abundance of rainfall. Yearly flooding disrupts the succession process, maintaining the ecosystem in an early and productive state. A significant portion of Lake Cerknica comprises plant species typically thriving in wetlands. Among these, the most prevalent include common reed (*Phragmites australis*), reed canary grass (*Phalaris arundinacea*), tufted sedge (*Carex elata*), and lakeshore bulrush (*Schoenoplectus lacustris*). Common reed holds particular importance at Lake Cerknica, as it provides numerous ecosystem services. This species accumulates minerals and carbon, while also supporting a healthy microbial community in the soil. Despite common reed stands potentially reducing plant biodiversity, they contribute to higher overall diversity by serving as a habitat for numerous other species. Lake Cerknica is also home to several bird specialist species, including the little grebe (*Tachybaptus ruficollis*), the Eurasian coot (*Fulica atra*), the common reed warbler (*Acrocephalus scirpaceus*), and the water rail (*Rallus aquaticus*), all of which depend on healthy reed stands.

A significant portion of the common reed stands at Lake Cerknica undergo annual mowing, typically taking place in late summer or early autumn. The extent of this mowing practice is contingent upon the water levels experienced during the summer months. In wetter years, the extent of mowing is reduced compared to drier years. Given the critical role of common reed in the ecosystem, it is imperative to comprehend how late mowing, in conjunction with water level fluctuations, influences the vitality and growth potential of common reeds in the subsequent vegetation season.

Mowing common reed within wet meadows increases the number of shoots but comes at the expense of their height. Stem height serves as an indicator of common reed vitality, and healthy reed stands may surpass a height of 4 meters. Conducting annual mowing of common reed adversely affects the long-term health of these stands. Mowing once in autumn, however, stimulates the growth of inflorescences in the subsequent vegetation season. Mowing common reed stands within fens also has detrimental effects on common reed health. Seasonal mowing in autumn results in a long-term reduction in the number of shoots, average stem height, basal diameter width, and overall, significantly diminishes biomass. This mowing approach bears similarities to certain parts of Lake Cerknica. Conversely, a rotational mowing scheme (heterogeneously mowing reed stands every three years) in fens shows no long-term negative impacts on common reed stands. In ecosystems where common reed is an invasive species, the application of herbicides, an additional stressor after mowing events, can lead to a biomass loss of up to 90%. Mowing events deplete rhizome reserves, and combining mowing with additional disturbances, such as herbicides, drastically inhibits growth. Yearly mowing also negatively affects other species dependent on healthy reed stands.

Studies investigating the impact of mowing in various fen and meadow types offer only partial comparability to Lake Cerknica, where the abrupt increase in water levels after mowing events must be considered. Under typical conditions, common reed, towards the end of the vegetation season, undergoes specific changes that enhance its survival during winter and early spring. Energy reserves from above-ground parts are allocated to the rhizomes, while leaves undergo senescence. Additionally, the cell walls of stems thicken and lignify. Lignified stems function as conductive tissues, facilitating Venturi convection – a process that provides oxygen to the rhizomes. This oxygen intake enables common reed rhizomes to survive in anoxic soil outside the vegetation season. Mowing events before the water level rise mechanically damage stems and hinder oxygen intake. The viability of rhizomes then relies on their age and the success of previous vegetation seasons, primarily tied to the reserves in rhizomes. Substantial reserves are crucial in the subsequent vegetation season when common reed stands are submerged until the onset of summer. Adequate reserves facilitate the faster emergence of stems through the water surface, optimizing the efficiency of the photosynthesis process. Elevated water levels at the beginning of the vegetation season, coupled with low reserves in rhizomes, negatively impact the overall productivity of common reed. Consequently, annual mowing at the end of the vegetation season followed by high water levels diminishes the vitality of common reed and may induce reed dieback syndrome.

The 2021 and 2022 vegetation seasons at Lake Cerknica were unusually dry, leading to a more extensive mowing of common reed stands. In the subsequent vegetation season of 2023, we conducted multiple measurements of morphological and productivity parameters, along with a plant diversity inventory, comparing previously mown and unmown littoral plots of common reed. The number of shoots per plot, average shoot height, average basal diameter, and average leaf surface, were all found to be statistically significantly different when comparing mown and unmown plots. Mown plots exhibited a higher number of shoots, possibly due to the removal of mown biomass, allowing seeds to sprout in the following season. Unmown plots, on the other hand, were significantly taller but contained fewer shoots. The only statistically non-significant comparison was the average number of leaves per plant. When comparing the average aboveground biomass, unmown plots were considerably more productive than mown plots, although the standard deviation was larger in unmown plots. This variability could be attributed to different microhabitat characteristics between plots, considering that common reed is a highly adaptive plant. Alternatively, variations in the age after the cessation of

mowing between plots may explain the observed differences. Plant biodiversity results revealed that mown plots were significantly more species-rich than unmown plots. The number of species within unmown plots varied, possibly due to differences in plot ages. Common reed, being a highly competitive plant species, tends to form dense stands with low plant diversity. This pattern was not observed in mown plots, as mowing negatively impacted the overall health of reeds, preventing competitive exclusion of other plant species and resulting in higher biodiversity.

Mowing the littoral zone of Lake Cerknica significantly influences common reed stands. Littoral reed stands, already facing substantial environmental pressures, experience a further reduction in vitality and productivity due to mowing. Mowing the lake's edges has a positive impact by hindering the process of succession and preventing the development of woody vegetation. However, mowing the wetter central parts of the lake proves counterproductive, as water level fluctuations suppress the formation of later successional stages. In Lake Cerknica, where common reed plays a beneficial role, implementing a rotational mowing scheme that prioritizes healthy reed stands and fosters high overall biodiversity would be ideal, as opposed to an annual mowing approach.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 in preko financiranja mladega raziskovalca 55856.

Viri

- Ailstock, M. S., Norman, C. M., Bushmann, P. J. 2001. Common reed *Phragmites australis*: Control and effects upon biodiversity in freshwater nontidal wetlands. *Restoration Ecology*, 9(1), 49–59. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2001.009001049.x>
- Andersen, L. H., Nummi, P., Bahrndorff, S., Pertoldi, C., Trøjelsgaard, K., Lauridsen, T. L., Rafn, J., Frederiksen, C. M. S., Kristjansen, M. P., Bruhn, D. 2021. Reed bed vegetation structure and plant species diversity depend on management type and the time period since last management. *Applied Vegetation Science*, 24(1). <https://doi.org/10.1111/avsc.12531>
- Antoniazza, M., Clerc, C., Le Nédic, C., Sattler, T., Lavanchy, G. 2018. Long-term effects of rotational wetland mowing on breeding birds: evidence from a 30-year experiment. *Biodiversity and Conservation*, 27(3), 749–763. <https://doi.org/10.1007/s10531-017-1462-1>
- Armstrong, J., Armstrong, W., Beckett, P. M. 1992. *Phragmites australis*: Venturi- and humidity-induced pressure flows enhance rhizome aeration and rhizosphere oxidation. *New Phytologist*, 120(2), 197–207. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.1992.tb05655.x>
- Armstrong, J., Armstrong, W., Beckett, P. M., Halder, J. E., Lythe, S., Holt, R., Sinclair, A. 1996. Pathways of aeration and the mechanisms and beneficial effects of humidity- and Venturi-induced convections in *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. *Aquatic Botany*, 54(2–3), 177–197. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(96\)01044-3](https://doi.org/10.1016/0304-3770(96)01044-3)
- Avers, B., Fahlsing, R., Kafcas, E., Schafer, J., Collin, T., Esman, L., Finnel, E., Lounds, A., Terry, R., Hazelman, J., Hudgins, J. K., Getsinger, K., Scheun, D. 2014. A guide to the control and management of invasive phragmites. Lansing: Michigan Department of Environmental Quality.

- Balčiauskas, L., Balčiauskiene, L. 2022. Long-term changes in a small mammal community in a temperate zone meadow subject to seasonal floods and habitat transformation. *Integrative Zoology*, 17(3), 443–455. <https://doi.org/10.1111/1749-4877.12571>
- Balčiauskas, L., Balčiauskienė, L., Janonytė, A. 2012. The influence of spring floods on small mammal communities in the Nemunas River Delta, Lithuania. *Biologia*, 67(6), 1220–1229. <https://doi.org/10.2478/s11756-012-0116-8>
- Bogusch, P., Heneberg, P., Astapenkova, A. 2020. Habitat requirements of wetland bees and wasps: several reed-associated species still rely on peaty meadows and other increasingly rare wetland habitats. *Wetlands Ecology and Management*, 28(6), 921–936. <https://doi.org/10.1007/s11273-020-09758-5>
- Braun-Blanquet, J. 1964. *Pflanzensoziologie, grundzüge der vegetationskunde* (3rd edition). Vienna. Springer Vienna. 631 str. <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-8110-2>
- Burdick, D. M., Konisky, R. A. 2003. Determinants of expansion for *Phragmites australis*, common reed, in natural and impacted coastal marshes. *Estuaries*, 26(2), 407–416. <https://doi.org/10.1007/BF02823717>
- Cattin, M.-F., Blandenier, G., Banašek-Richter, C., Bersier, L.-F. 2003. The impact of mowing as a management strategy for wet meadows on spider (Araneae) communities. *Biological Conservation*, 113(2), 179–188. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(02\)00297-5](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(02)00297-5)
- Čížková, H., Kučera, T., Poulin, B., Květ, J. 2023. Ecological basis of ecosystem services and management of wetlands dominated by common reed (*Phragmites australis*): European perspective. *Diversity*, 15(5), 629. <https://doi.org/10.3390/d15050629>
- Colmer, T. D., Winkel, A., Pedersen, O. 2011. A perspective on underwater photosynthesis in submerged terrestrial wetland plants. *AoB PLANTS*, 2011. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plr030>
- Cui, Q., Yang, H., Wang, G., Ma, J., Feng, L., Liu, J. 2022. Response of soil carbon fractions and enzyme activities to mowing management on in a coastal wetland of the Yellow River delta. *Frontiers in Marine Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.993181>
- Den Hartog, C., Květ, J., Sukopp, H. 1989. Reed. A common species in decline. *Aquatic Botany*, 35(1), 1–4. [https://doi.org/10.1016/0304-3770\(89\)90062-4](https://doi.org/10.1016/0304-3770(89)90062-4)
- Derr, J. F. 2008. Common reed (*Phragmites australis*) response to mowing and herbicide application. *Invasive Plant Science and Management*, 1(1), 12–16. <https://doi.org/10.1614/IPSM-07-001.1>
- Dolinar, N., Regvar, M., Abram, D., Gaberščik, A. 2016. Water-level fluctuations as a driver of *Phragmites australis* primary productivity, litter decomposition, and fungal root colonisation in an intermittent wetland. *Hydrobiologia*, 774(1), 69–80. <https://doi.org/10.1007/s10750-015-2492-x>
- Dolinar, N., Rudolf, M., Šraj, N., Gaberščik, A. 2010. Environmental changes affect ecosystem services of the intermittent Lake Cerknica. *Ecological Complexity*, 7(3), 403–409. <https://doi.org/10.1016/j.ecocom.2009.09.004>
- Dwire, K. A., Kauffman, J. B., Brookshire, E. N. J., Baham, J. E. 2004. Plant biomass and species composition along an environmental gradient in montane riparian meadows. *Oecologia*, 139(2), 309–317. <https://doi.org/10.1007/s00442-004-1498-2>
- Fofonoff, P., Ruiz, G. M., Steves, B., Simkanin, C., Carlton, J. T. 2018. National exotic marine and estuarine species information system. <http://Invasions.Si.Edu/Nemesis>.
- Fogli, S., Brancaloni, L., Lambertini, C., Gerdol, R. 2014. Mowing regime has different effects on reed stands in relation to habitat. *Journal of Environmental Management*, 134, 56–62. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.01.001>
- Gaberščik, A., Krek, J. L., Zelnik, I. 2018. Habitat diversity along a hydrological gradient in a complex wetland results in high plant species diversity. *Ecological Engineering*, 118, 84–92. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2018.04.017>

- Güsewell, S. 2000. Dynamics of common reed (*Phragmites australis* Trin.) in Swiss fens with different management. *Wetlands Ecology and Management*, 8(6), 375–389. <https://doi.org/10.1023/A:1026553700571>
- Güsewell, S. 2003. Management of *Phragmites australis* in Swiss fen meadows by mowing in early summer. *Wetlands Ecology and Management*, 11(6), 433–445. <https://doi.org/10.1023/B:WETL.0000007197.85070.58>
- Hanganu, J., Mihail, G., Coops, H. 1999. Responses of ecotypes of *Phragmites australis* to increased seawater influence: a field study in the Danube Delta, Romania. *Aquatic Botany*, 64(3–4), 351–358. [https://doi.org/10.1016/S0304-3770\(99\)00062-5](https://doi.org/10.1016/S0304-3770(99)00062-5)
- Haslam, S. M. 1972. *Phragmites communis* Trin. (*Arundo phragmites* L.,? *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steudel). *The Journal of Ecology*, 60(2), 585–610. <https://doi.org/10.2307/2258363>
- Hong, M. G., Nam, B. E., Kim, J. G. 2019. Differences in functional traits of leaf blade and culm of common reed in four habitat types. *Journal of Ecology and Environment*, 43(1), 12. <https://doi.org/10.1186/s41610-019-0113-8>
- Kitazawa, T., Ohsawa, M. 2002. Patterns of species diversity in rural herbaceous communities under different management regimes, Chiba, central Japan. *Biological Conservation*, 104(2), 239–249. [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00170-7](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00170-7)
- Kiviat, E. 2013. Ecosystem services of *Phragmites* in North America with emphasis on habitat functions. *AoB Plants*, 5(0), plt008–plt008. <https://doi.org/10.1093/aobpla/plt008>
- Kmecl, P., Gamser, M., Ploj, A., Jančar, T. 2022. The challenges of bird conservation on an intermittent karst lake: The interplay between changing water level and agriculture. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 32(9), 1544–1556. <https://doi.org/10.1002/aqc.3854>
- Kranjc, A. 2002. Hidrološke značilnosti. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 81–96). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Kulik, M., Sender, J., Bochniak, A., Jaźwa, M., Ciesielski, D. 2023. The influence of mowing frequency on the growth and development of *Phragmites australis*. *Journal for Nature Conservation*, 76, 126492. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2023.126492>
- Luo, W., Song, F., Xie, Y. 2008. Trade-off between tolerance to drought and tolerance to flooding in three wetland plants. *Wetlands*, 28(3), 866–873. <https://doi.org/10.1672/07-225.1>
- Martinčič, A., Leskovar, M. 2003. Vegetacija. V A. Gaberščik (ur.), *Jezero, ki izginja – Monografija o Cerkniškem jezeru* (str. 81–96). Ljubljana, Društvo ekologov Slovenije.
- Mook, J. H., van der Toorn, J. 1985. Delayed response of common reed *Phragmites australis* to herbivory as a cause of cyclic fluctuations in the density of the moth *Archanara geminipuncta*. *Oikos*, 44(1), 142. <https://doi.org/10.2307/3544055>
- Nikolajevskij, V. G. 1971. Research into the biology of the common reed (*Phragmites communis* Trin.) in the U.S.S.R. *Folia Geobotanica et Phytotaxonomica*, 6(2), 221–230. <https://doi.org/10.1007/BF02851764>
- Ojdanič, N., Zelnik, I., Holcar, M., Gaberščik, A., Golob, A. 2023a. Contrasting dynamics of littoral and riparian reed stands within a wetland complex of Lake Cerknica. *Plants*, 12(5), 1006. <https://doi.org/10.3390/plants12051006>
- Ojdanič, N., Holcar, M., Golob, A., Gaberščik, A. 2023b. Environmental extremes affect productivity and habitus of common reed in intermittent wetland. *Ecological Engineering*, 189, 106911. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2023.106911>
- Rolletschek, H. 2000. Physiological consequences of mowing and burning of *Phragmites australis* stands for rhizome ventilation and amino acid metabolism. *Wetlands Ecology and Management*, 8(6), 425–433. <https://doi.org/10.1023/A:1026562002388>

- Tiškus, E., Vaičiūtė, D., Bučas, M., Gintauskas, J. 2023. Evaluation of common reed (*Phragmites australis*) bed changes in the context of management using earth observation and automatic threshold. *European Journal of Remote Sensing*, 56(1). <https://doi.org/10.1080/22797254.2022.2161070>
- Tóth, V. R., Szabó, K. 2012. Morphometric structural analysis of *Phragmites australis* stands in Lake Balaton. *Annales de Limnologie - International Journal of Limnology*, 48(2), 241–251. <https://doi.org/10.1051/limn/2012015>
- Vadász, C., Németh, Á., Biró, C., Csörgő, T. 2008. The effect of reed cutting on the abundance and diversity of breeding passerines. *Acta Zoologica Academiae Scientiarum Hungaricae*, 54, 177–188.
- Widin, S. L., Bickford, W. A., Kowalski, K. P. 2023. *Phragmites* management in high water: cutting plants under water limits biomass production, carbohydrate storage, and rhizome viability. *Wetlands Ecology and Management*. <https://doi.org/10.1007/s11273-023-09946-z>

Izzivi upravljanja z mokriščnimi habitatmi

Rudi Kraševac in Jošt Stergaršek

Uvod

Ohranjanje biotske pestrosti v kmetijski krajini, kamor sodijo traviščni, mokriščni in drugi habitat, je v sodobnem času svojevrsten izziv. Iz mozaične kmetijske krajine, ki je podpirala bogato biotsko pestrost, prehajamo v vse bolj enolično krajino, kjer se soočamo z upadanjem vrstne pestrosti (Kmecl in sod., 2023). Zato je za naravovarstveno upravljanje potrebno na isti površini iskati ravnovesje med ekonomskimi in naravovarstvenimi prioritetami. Na eni strani ekonomske potrebe ljudi vodijo v razvoj težke kmetijske mehanizacije, ki omogoča večjo intenzivnost obdelave zemlje na večji površini, po drugi strani pa se kmetijstvo opušča. S časom se povečuje razkorak med intenzivno obdelanimi površinami ter površinami v zaraščanju, ki v zadnji sukcesijski fazi preidejo v gozd. Gozd pa je neustrezen habitat za vrste odprte krajine. Ohranjanje travišč in mokrišč v klimatskih razmerah, kakršne so v Sloveniji, praviloma sloni na zaviranju napredovanja sukcesije, ki vodi proti gozdu. Lokalno pa sukcesijo na nekaterih delih presihajočega Cerkniškega jezera izrazito upočasnjuje dolgotrajna poplavljenost.

Eden od načinov, kako danes na enem kraju vzdržujemo ravnovesje med ohranjanjem narave in rabo virov so različne vrste kmetijskih subvencij iz skupne kmetijske politike, npr. Kmetijsko okoljska plačila (KOPOP), plačila natura 2000 in plačila iz sheme za podnebje in okolje (SOPO). Cilj teh ukrepov je, da lahko kmet ob upoštevanju predpisanih pravil skupne kmetijske politike s pomočjo plačil živi dostojno, obenem pa z ekstenzivno kmetijsko prakso ohranja življenjski prostor v ugodnem stanju oz. vzdržuje nemoteno delovanje ekosistema ter ohranja bogato biotsko pestrost. Tak način preverjeno deluje, vendar sistem ni idealen.

Varstvo travniških habitatov na presihajočem Cerkniškem jezeru

Na območju presihajočega Cerkniškega jezera je obdelava tal na območjih vlažnih travnikov s kmetijsko mehanizacijo skoraj nemogoča. Zaradi rednega poplavljanja in slabe rodovitnosti tal pa je donos poljščin majhen, zato je prevladujoči tip kmetijske rabe košnja. Čas košnje in pogostost pa sta določena glede na spremembe višine vodostaja. Košnja oziroma upravljanje je poleg abiotičnih vplivov en ključnih dejavnikov, ki določajo vrstno sestavo travnikov. Poznavanje biologije vrst, zlasti življenjskih ciklov pri živalih in glivah ter fenologije pri rastlinah, nam omogoča izbrati ali zasnovati tip gospodarjenja, ki ima pozitiven vpliv na določen življenjski prostor in določene organizme. Ker je spremljanje celotnih združb praktično nemogoče, se varstvo narave osredotoča na varstvo t. i. krovnih vrst, preko katerih se varuje habitate, ter s tem tudi vrste vezane nanje. Kot eno izmed krovnih vrst vlažnih travnikov pa prepoznavamo kosca (*Crex crex* (Linnaeus, 1758)).

Območje Cerkniškega jezera se je konec 20. stoletja soočalo z opuščanjem rabe in obsežnim zaraščanjem, pokošena je bila približno le še četrtnina površine presihajočega jezera (Kus, 2002). Tako je bil en glavnih izzivov zagotavljanje travniških površin in spodbujanje košnje. V veliki meri je bilo to storjeno z razvojem KOPOP ukrepa »ptice vlažnih travnikov« (VTR), ki spodbuja ekstenzivno košnjo enkrat na leto po 1. avgustu (MKGP, 2015), s čimer ugodno vplivamo na vrste, ki v tem času lahko dokončajo svoje razvojne cikle. Spodbude so bile tako uspešne, da se bistveno

povečal vpis v kmetijske ukrepe, v sušnih letih 2021 in 2022, pa je bilo območje Cerkniskega jezera skoraj v celoti pokošeno (Kraševac in Jančar, 2023). A vendar se s pridobivanjem novega znanja kažejo nekatere pomanjkljivosti enovitega upravljanja, tega sicer zelo dobrega naravovarstvenega ukrepa. Slednje je tudi pričakovano, saj je na Cerkniskem jezeru množica različnih habitatnih tipov, ki zahtevajo različne upravljalvske pristope. V naslednjih poglavjih predstaviva vpliva splošno sprejetih načinov naravi prijaznega gospodarjenja na določene vrste in strukturo habitatov, in sicer vpliv redne vsakoletne košnje po 1. avgustu (glavno načelo ukrepa VTR) na srednjo rosiko (*Drosera intermedia* Hayne) ter strašničinega (*Phengaris teleius* Bergsträsser) in sviščevega mravljiščarja (*Phengaris alcon* Denis in Schiffermüller).

Spreminjanje vertikalne strukture travnikov

Hkratna in vsakoletna košnja na dolgi rok vodi v horizontalno homogeniziranje rastiščnih razmer, na način, da je travna ruša vse bolj sklenjena in ni več golih tal. Po drugi strani pa enakomerna košnja vpliva tudi na vertikalno heterogenost travnikov. Za številne vrste pa je ključna prav vertikalna raznolikost travnikov, to je predvsem prisotnost visokih zelnatih ali lesnatih rastlin, ki so višje od okolice in pa vzorec pokošanih in nepokošenih površin. Razumljivo je vpliv košnje različen, glede na habitatni tip.

Trstišča (tršca)

Na območjih, kjer so tla poplavljeni med 60–75 % dni na leto, t. j. v bližini obstoječih in nekdanjih strug, požiralnikov in drugih depresij najdemo združbe jezerskega bička (*Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla) in navadnega trsta (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.) (Gaberščik in sod. 2018). Sestoji navadnega trsta pa na Cerkniskem polju uspevajo tudi na drugih območjih, kjer lokalni okoljski dejavniki (npr. izvir, vodotok) omogočajo razvoj takega tipa rastlinske združbe. To so pomembna območja za vodne ptice, ki jih uporabljajo za prezimovališča in za gnezdišča, ker v njih najdejo kritje pred plenilci oziroma ustrezen prostor za gnezdenje npr. trstni strnad (*Emberiza schoeniclus* (Linnaeus, 1758)), rakar (*Acrocephalus arundinaceus* (Linnaeus, 1758)), kostanjevka (*Aythya nyroca* (Güldenstädt, 1770)) in bobnarica (*Botaurus stellaris* (Linnaeus, 1758)). Nekatere trstiščne vrste ptic odprte vodne površine večinoma uporabljajo za prehranjevanje, pri tem je pomembno, da je ob strugah in drugih odprtih vodnih površinah dovoljšen pas trstičja, ki jim zagotavlja kritje. Potopljeni in obrežni vegetacija pa zagotavlja tudi kritje za ribe pred ribojedimi pticami in njihova drstišča, ter vodne nevretenčarje. Ob trstičju se zaradi sprememb vodostaja in vetra, naberejo naplavine odmrle biomase, ki delujejo kot plavajoče ploščadi, na katerih ptice prenočujejo. V času nizkega vodostaja, so trstišča pomembna tudi za velike sesalce, v njih so počivališča jelenjadi (*Cervus elaphus* Linnaeus, 1758), kjer so v večjih sklenjenih trstičjih bolj varni pred plenilci, predvsem volkom (*Canis lupus* Linnaeus, 1758). Počivališča od koder izstopajo na travnike, so pomembna predvsem v času ruka, ko je številčnost jelenjadi na Cerkniskem jezeru največja. Plavljenje odmrlega trstičja na obrobja pa ustvarja rastišča bleščečega mlečka (*Euphorbia lucida* Walds. & Kit.), za katerega je to edino rastišče v državi (Frajman in Jogan, 2007).

Visoko šašje (kravina) in pisankovje

Kjer je čas ojezeritve nekoliko krajši (približno pol leta), med 50–60 % dni na leto, se pojavljajo združbe visokih šašev *Magnocaricion*, oziroma »kravine«, kot se uporablja lokalni izraz, ter pisane čužke (*Phalaris arundinacea* L.) (Gaberščik in sod. 2018). Visoka šašja in pisankovje lahko lokalno zamenjajo trstišča tudi na območjih, ki se jih kosi redno. Čeprav se visoko šašje uvršča

med habitatne tipe barij in močvirij, območja kravine, trstične pisanke in bazičnih nizkih barij v smislu rabe obravnavamo kot travišča. Na teh »traviščih« najdemo številne ptice vlažnih travnikov npr. repaljščico (*Saxicola rubetra* (Linnaeus, 1758)) in kosca (*Crex crex* (Linnaeus, 1758)) in tudi prepelice (*Coturnix coturnix* (Linnaeus, 1758)), posebno kadar so območja bolj suha v času gnezditve. To so tudi območja, kjer je zelo številčna populacija trstnic, predvsem bičja trstnica (*Acrocephalus schoenobaenus* (Linnaeus, 1758)). V teh sestojih z razmeroma nizko vrstno pestrostjo rastlin igrajo pomembno vlogo spremljevalne vrste, kot so močvirski grint (*Senecio paludosus* L.) in navadna pijavčnica (*Lysimachia vulgaris* L.). Na bolj vlažnih območjih, kjer je košnja manj pogosta pa je še vedno prisoten tudi navadni trst. Ker so to visoke rastline, ki presegajo ravnino sklenjenih sestojev šaša, jih ptice, kačji pastirji, kobilice in druge vrste uporabljajo kot lovilne preže, za prehrano, oziroma za zavetje pred poplavljanjem.

Bazična nizka barja na obrobju jezera (blata)

V bolj obrobni predelih, kjer je poplavljanje manj pogosto med 10–30 % dni na leto in ponekod mestoma je poplava je izjemoma, so območja oligotrofnih mokrotnih travnikov z modro stožko in bazičnih nizkih barij (Gaberščik in sod. 2018), ki jih domačini poimenujejo »Blata«. To so zelo vlažna rastišča, saj jih napaja padavinska voda in voda manjših pritokov. Na teh območjih je rastlinska vrstna pestrost precej večja kot na območju kravine, posledično pa je večja tudi pestrost metuljev in drugih organizmov. Vegetacija je na teh predelih zelo nizka, zato vertikalno strukturiranost zagotavljajo nepokošeni pasovi preteklega leta ali celo z lesnato vegetacijo delno zaraščene površine v katerih lahko ptice najdejo zavetje med bolj preglednimi košeninami. Pomembni pa so tudi šopi nekaterih vrst rastlin, npr. modre stožke in sitovcev, ker so zaradi nekoliko višje lege glede na tla manj časa potopljena, kar pozitivno vpliva na možnost razvoja združb nevretenčarjev v tleh npr. mravlje iz rodu *Myrmica* Latreille, 1804.

Vpliv časa košnje

V grobem lahko Cerkniško jezero razdelimo na t. i. »jezero«, območje ki je redno poplavljenost z vodo iz večjih vodotokov, obdajajo pa ga t. i. »blata«, to so območja, kjer zastaja predvsem padavinska voda in voda iz talnih izvirov. V splošnem pa so to območja bazičnih nizkih barij in oligotrofnih mokrotnih travnikov pomembni habitat, ki jih varuje omrežje Natura 2000. Tla so na območju blat pogosto vse leto nasičena z vodo, kar otežuje strojno košnjo, zato se območja teh habitatov zaraščajo z grmovnimi in lesnatimi vrstami, kot so navadna krhlika (*Frangula alnus* Mill.), rdeči bor (*Pinus sylvestris* L.) in črna jelša (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.). Blata pa so tudi nahajališča ogroženih in redkih rastlin in živali. Med take vrste sodita tudi dnevni metulj – strašničin mravljiščar (*Phengaris teleius* (Bergsträsser, 1779)), ki je na slovenski rdeči seznam uvrščen kot ranljiva vrsta (V), ter sviščev mravljiščar (*Phengaris alcon* (Denis in Schiffermüller, 1775)), ki je v Sloveniji še bolj ogrožen in na rdečem seznamu opredeljen kot prizadeta vrsta (E) (Verovnik, 2019). Zaradi kompleksnega razvojnega cikla, ki zahteva usklajenost obdobj, ko so aktivni odrasli metulji in faze cvetenja hranilnih rastlin ter prisotnost gostiteljskih mravelj, sta vrsti zelo izpostavljeni vplivom upravljanja.

Strašničin in sviščev mravljiščar sta dnevna metulja iz družine modrinov, njun življenjski cikel pa je neločljivo povezan s hranilnimi rastlinami gosenic in z nekaterimi vrstami mravelj iz rodu *Myrmica* (slika 1). Mlade gosenice mravljiščarjev se v cvetovih hranilnih rastlin prehranjujejo z razvijajočimi se semeni, nato se spustijo na tla, kjer jih poberejo mravlje in odnesejo v mravljišče, saj gosenice izločajo sladkasto tekočino z vonjem, ki mravlje spominja na njihove ličinke. Gosenice

se iz jajčec izležejo po 7. do 10. dneh in se nato pregrizejo v notranjost cveta oz. socvetja, kjer se hranijo z zorečimi semeni. Po 3. do 4. tednih življenja na hranilni rastlini se gosenice spustijo na tla, kjer jih lahko poberejo mravlje. V mravljišču se gosenice strašničinega mravljiščarja hranijo z zarodom mravelj in tudi pomembno vplivajo na vitalnost družine mravelj. Gosenice sviščevega mravljiščarja niso plenilske, ampak mravlje zanje skrbijo kot za lasten zarod. Gosenice v mravljišču preživijo 10 mesecev, tu tudi prezimijo in se v juniju zabubijo (Rebeušek, 2006).



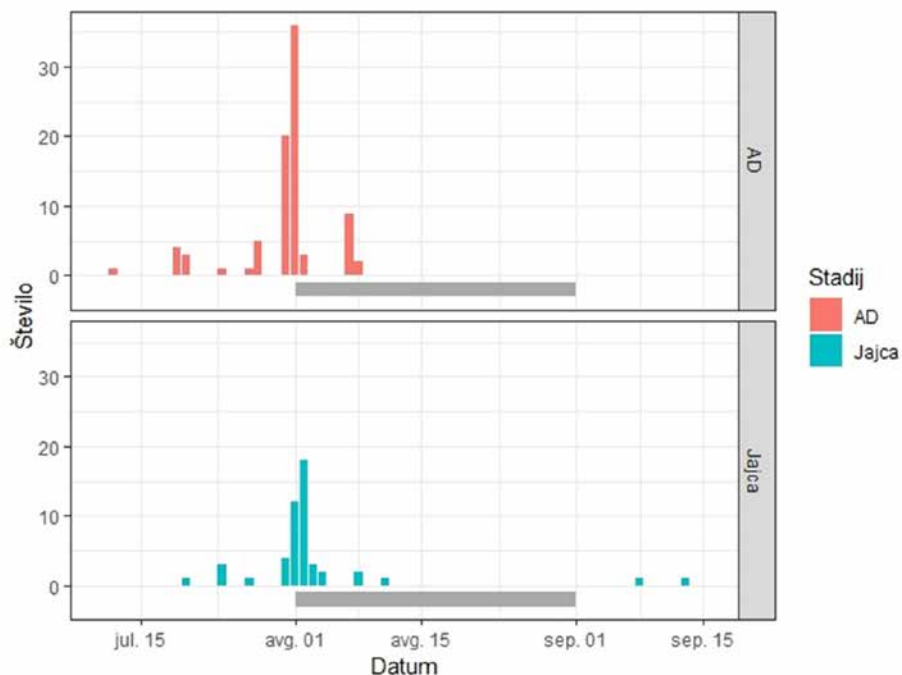
Slika 1: Strašničin mravljiščar (levo) na socvetju zdravilne strašnice – edine hranilne rastline gosenic (fotografirano 7. 8. 2017) in sviščev mravljiščar (desno) na zaprtih koških barvilne mačine – priljubljenega vira medicinske za odrasle metulje (fotografirano 22. 7. 2014; foto: Jošt Stergaršek).

Odrasli metulji strašničinega mravljiščarja letajo od julija do avgusta, sviščevi mravljiščarji pa od sredine junija do sredine avgusta, kar je odvisno od okoljskih dejavnikov (npr. temperatura kraja odvisna od nadmorske višine). Poleg tega samice mravljiščarjev odlagajo jajčeca le na določeno vrsto hranilnih rastlin, tako se gosenice strašničinega mravljiščarja hranijo izključno s cvetovi zdravilne strašnice (*Sanguisorba officinalis* L.), gosenice sviščevega mravljiščarja pa le s cvetovi močvirskega svišča (*Gentiana pneumonanthe* L.). Ti vrsti na Cerkniskem jezeru v glavnem uspevata na vlažnih oligotrofnih rastiščih, zlasti na mokrotnih travnikih z modro stožko in bazičnih nizkih barjih.

Prisotnost strašničinega mravljiščarja, je na Cerkniskem jezeru znana od leta 1994 in velja za eno izmed najjužnejših najdišč te vrste v Sloveniji. Podrobneje pa je bila v okviru monitoringov indikatorskih vrst spremljana med letoma 2017 in 2021, ko je bilo tudi ugotovljeno, da se vrsta pojavlja na omejenem območju, zgolj v okolici prvotnega najdišča. Sviščev mravljiščar je na Cerkniskem jezeru za razliko od prvega veliko bolj pogost in bolj splošno razširjen. Obe vrsti mravljiščarjev, ki se pojavljata na Cerkniskem jezeru, smo spremljali s popisi pojavljanja odraslih metuljev in jajčec na hranilnih rastlinah gosenic obeh vrst – zdravilni strašnici in močvirskem svišču. Popise strašničinega mravljiščarja smo v letih 2017–2022 izvedli konec julija oziroma v začetku avgusta na 51 lokacijah južno od vasi Martinjak, ob potoku Trstenik na vzhodu, do potoka Žerovniščica na jugu in Martinjskega potoka na zahodu (slika 2). Podatki o pojavljanju sviščevih mravljiščarjev pa so bili zbrani neciljno tekom drugega terenskega dela.

Pri obeh vrstah je kritično dejstvo, da čas, ko je predviden čas košnje za ukrep VTR, sovpada s časom, ko so najbolj aktivni odrasli metulji, oziroma ko odlagajo jajca. Iz fenoloških raziskav je

razvidno, da močvirski svišč cveti tudi kasneje v avgustu in septembru, a razen izjemoma metulji v tem obdobju ne letajo več. V spremljanju v tem obdobju smo ugotovili, da je strašničin mravljiščar izginil s 63 % lokacij, zato je nujno potrebno prilagoditi način košnje, za ohranitev te vrste na Cerkniškem jezeru (Stergaršek in Kraševac, 2023).



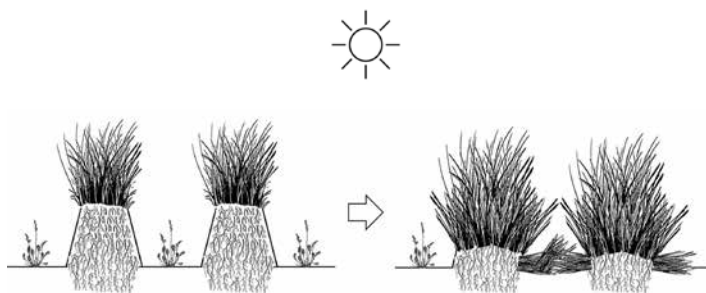
Slika 2: Zabeleženo število sviščevih mravljiščarjev glede na stadij (AD–odrasli in jajca) na Cerkniškem jezeru v letu 2023, z označenim glavnim obdobjem začetka košnje (sivo polje pod osjo x).

Izguba mikrohabitatov (primer srednje rosike)

Na oligotrofnih rastiščih »blat« na vzhodnem delu Cerkniškega jezera pa naletimo tudi na me-sojedo rastlino srednjo rosiko, kjer uspeva na območju velikem okoli 10 ha. Srednja rosika je v Sloveniji redka vrsta – znana zgolj z 11 nahajališči in je omejena na notranjost države (Jogan, 2001). Ta majhna, komaj 5–15 cm visoka rastlina uspeva na blatnih, neporaslih tleh bazičnih nizkih barjih, kjer običajno cveti v juliju in avgustu. Ker je vrsta specialist, t. j. prilagojena na specifične ekološke razmere, je kompetitivno manj uspešna v spremenjenih ali v bolj splošno razširjenih habitatih. Zaradi omejenega in občutljivega habitata je srednja rosika na Slovenski rdeči seznam ogroženih vrst uvrščena v kategorijo prizadeta vrsta (E), poleg tega je pri nas zavarovana z Uredbo o zavarovanih prostoživečih rastlinskih vrstah (Martinčič in sod., 2007). Poleg tega so oligotrofna rastišča zelo redka in izjemno občutljiva na človekove posege. V splošnem rastišča srednje rosike, podobno kot ostala mokrišča, ogrožajo degradiranje in uničevanje habitata (izsuševanje in gradbeni posegi) in sprememba rabe tal, ter nabiranje v hortikulturene namene. Pri opuščanju rabe ne more tekrovati z visokimi zelnatimi in lesnatimi rastlinami. Z intenziviranjem rabe od gnojenja, pogostejše košnje in celo oranja travnikov pa se favorizira rast drugih vrst rastlin.

Na Cerkniškem jezeru je največji dejavnik ogrožanja rastišča te vrste sprememba načina gospodarjenja. Prvotno gospodarjenje z območjem rastišča (košnjo, občasno požiganje) so začeli

opuščati kmalu po drugi svetovni vojni, kar je imelo za posledico oblikovanje izjemno velikih šopov (lokalno poimenovani kot »menihi«) združbotvornih vrst rjastega sitovca (*Schoenus ferrugineus* L.) in modre stožke (*Molinia caerulea* (L.) Moench). Med šopi so gola tla, ki so jih le s tanko plastjo prekrili odmrli rastlinski deli, ki so s šopov odpadli. Od leta 2016 pa na območju poteka vsakoletna košnja kar ima za posledico, da se šopi postopoma nižajo, obenem pa se sitovci in stožka začnejo razraščati v vodoravnih smereh in izgublja se horizontalna heterogenost travnika (slika 3). S tem se je v razmeroma kratkem času (v nekaj letih) količina neporaslih tal in s tem mikrohabitat srednje rosike med šopi oz. ostanki šopov občutno zmanjšal.



Slika 3: Prikaz spremembe rastiščnih razmer med šopi (»menihi«) šašev in trav za srednjo rosiko (*Drosera intermedia*) zaradi košnje. Višina meniha se zniža, nepospravljen košen material pa zastre gola blatna tla med menihi (risba: Rudi Kraševac).

Dodatno težavo predstavlja tudi puščanje biomase in listnega opada po košnji, saj je spravilo sena v prvih letih košnje nemogoče, saj pokošene rastline padejo med šope, spravilo pa dodatno otežuje tudi majhna nosilnost tal. Tako neporasta tla med šopi pokrije debela plast odmrlih rastlinskih delov. Ravno slednje pa je ključen dejavnik ogrožanja populacije srednje rosike na Cerkniškem jezeru, saj se srednja rosika zelo težko prebije čez večslojni nanos pokošenih rastlin (Stergaršek in sod., 2023) (sliki 4 in 5).

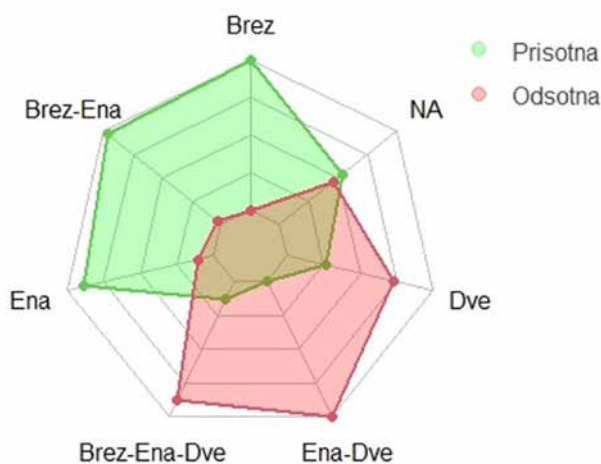


Slika 4: Nahajališče srednje rosike na Cerkniškem jezeru v času njenega cvetenja, pred začetkom redne vsakoletne košnje območja (leva fotografija posneta poleti 2011). Stanje po petih letih vsakoletne košnje. Ruša združbotvornih vrst je bila ob obisku v primerjavi s situacijo pred tem, ko se je začelo z redno vsakoletno košnjo, na videz precej bolj sklenjena, šopi pa veliko (približno za polovico višine) manjši (desna fotografija posneta jeseni 2021). Na fotografiji je na določenih delih območja mogoče opaziti tudi nepospravljen pokošen material (foto: Jošt Stergaršek).



Slika 5: Rastišče srednje rosike prekrit s tanko plastjo organskega materiala. Srednje rosike najraje in najbolje uspevajo na neporaslih tleh med šopi združbotvornih sitovcev in modre stožke, ki jih pokriva tanka plast odmrlih rastlinskih delov združbotvornih vrst, skozi katero lahko drobne rosike prodrejo (leva fotografija prikazuje popisno točko, kjer je gola tla pokrivalo več plasti odmrlih rastlinskih delov oz. starine) skozi katere se srednje rosike težko ali sploh ne prebijejo – desna fotografija) (fotografirano na območju raziskave 8. 7. 2022; foto: Jošt Stergaršek).

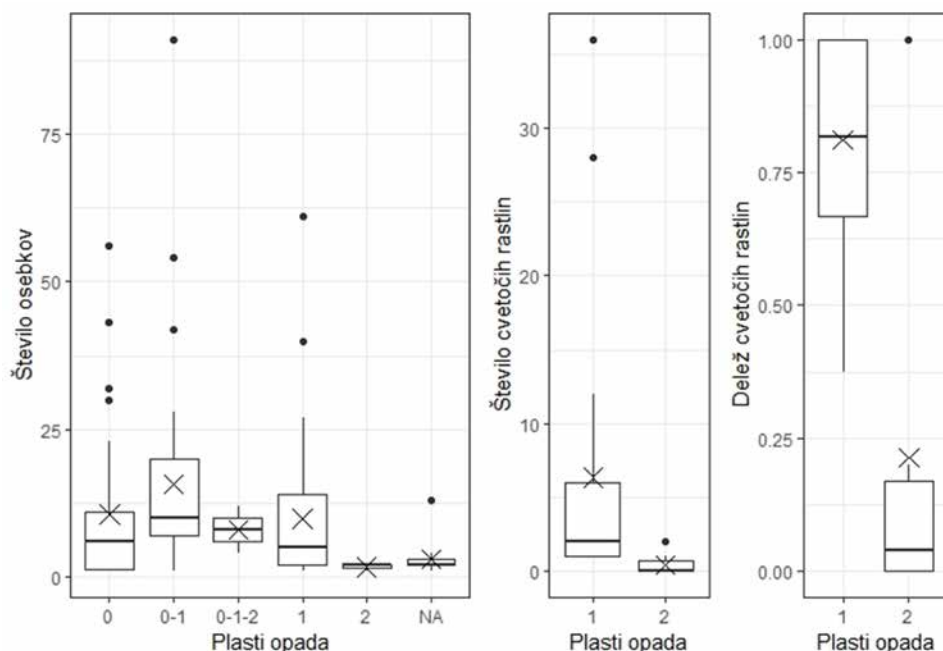
Julija in avgusta smo v letih 2022 in 2023 na območju razširjenosti srednje rosike opravili popis številčnosti in rastišč na 178 točkah, od katerih je bila rosika prisotna na 134 (sliki 6 in 7). Popisne točke so predstavljala neporasta tla med šopi sitovca in stožke, katerih površina je bila praviloma manjša od 0,5 m². Popis v začetku meseca julija omogoča primerjavo vitalnosti osebkov, ker takrat srednja rosika na Cerknškem jezeru cveti ali plodi. Bujno namreč cvetijo le osebki, ki so vitalni oz. ki uspevajo na ,ugodni' mikrolokaciji.



Slika 6: Delež lokacij na katerih je bila srednja rosika prisotna oziroma odsotna na posameznem tipu rastišča, glede na število plasti biomase in listnega opada, ki ostane po košnji.

Ugotovili smo, da je bila na rastiščih brez ali z eno plastjo opada srednja rosika v 95 % prisotna (104 od 109 lokacij). Na rastiščih, ki so bila vsaj deloma prekrita z več plastmi opada, pa je bila srednja rosika prisotna le v 14 % (5 od 35 lokacij). Kjer opada ni bilo, ali pa je bil tanjši, je bilo v

povprečju >10 osebkov na lokacijo, pri lokacijah z več plastmi pa je bilo število osebkov praviloma <10. Poleg tega smo ugotovili, da se je pomembno razlikovala kondicija osebkov, saj je bil delež cvetočih osebkov na rastiščih s tanko plastjo opada 80 % (srednja vrednost), na rastiščih z več plastmi pa 3 % (srednja vrednost).



Slika 7: Grafi škatlic z brčicami, ki prikazujejo število osebkov (levo), število cvetočih osebkov (v sredini) in delež cvetočih osebkov (desno) srednje rosike (*Drosera intermedia*) na posamezni točki, glede na število plasti starine. X – označuje povprečno vrednost.

Zaključek

Uvedba kmetijsko okoljskega ukrepa za ptice vlažnih travnikov in spodbujanje košnje s strani Notranjskega parka je bila prelomnica za ohranjanje travnikov in preprečevanje njihovega zaraščanja je izrazito povečalo interes za košnjo na presihajočem jezeru. Ukrepi se predvsem dobro obnesejo na mokrotnih travnikih z rušnato masnico (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.) in vlažnem pahovkovju (*Arrhenatheretum*). Z novimi spoznanji pa lahko ukrep nadgradimo na način, da se zagotavlja večja heterogenost košnje in s tem mozaičnost/heterogenost habitatov. Torej, da se na Cerkniškem jezeru načrtujejo območja, na katerih je naravovarstveno gledano košnja bolj ustrezna zgodaj poleti in območja, kjer košnja ne poteka vsako leto. Košnja lahko poteka tudi v načrtovanih časovnih zamikih. Kljub temu je pomembno tudi načrtovanje dovolj velikih površin v zaraščanju in povezljivosti med njimi za zagotavljanje varstva grmiščnih vrst, kot je npr. škrlatec (*Carpodacus erythrinus* (Pallas, 1770)) (Kraševac, 2022).

Glavne posledice, ki nastanejo zaradi enomernega načina redne košnje, so izguba horizontalne in vertikalne heterogenosti travnikov, ter košnja v, za nekatere vrste, neprimernem času. Pogosto združbotvorne rastline, npr. togi šaš, tvorijo šope oz. »menihe«, ki se z redno košnjo zravnajo s tlemi in povežejo v sklenjeno travno rušo. Vsakoletna košnja v začetku avgusta, v času ko so večina spremljevalnih vrst še cveti ali plodi, negativno vpliva na njihovo prisotnost in zmanjša splošno vrstno pestrost habitata. Z enakomerno košnjo v velikem obsegu, pa izginja

mozaičnost habitatov, ki ne zagotavlja naštetih ekoloških funkcij. Zelo pomembno pa je tudi načrtovanje območij, v katerih se predvideva nastanek grmišč zgodnjih in srednjih sukcesijskih faz, ter nekošenih trstišč.

Ena od stvari, ki jih lahko sistem KOPOP plačil zagotovo izboljša, je uvajanje novih ukrepov, ki bi bili vezani na manjša območja ali vrste, ki so bile do sedaj spregledane. Tu imamo npr. v mislih območja, na katerih so prisotni organizmi, ki živijo v habitatih, ki se jih s KOPOP ukrepi že ohranja, a imajo te vrste posebne ekološke zahteve in niso splošno razširjene, prav zaradi specifičnih zahtev teh vrst pa „splošni“ KOPOP ukrep zanje ni ustrezen (obenem morajo novi ukrepi vzdrževati habitat vrst, ki so predmet že obstoječih KOPOP ukrepov za te habitate). Tako je pomembna vpeljava in razvoj ukrepov na manjših območjih specifičnih za varstvo metuljev, ki bodo sloneli na že obstoječem KOPOP ukrepu »traviščni habitat metuljev« (MET), kjer košnja ni dovoljena med 15. 6. in 15. 9. (MKGP, 2015). Ta ukrep zaradi specifičnih hidroloških razmer na Cerkniškem jezeru ni neposredno prenosljiv, zato je potrebno iskati alternative npr. da se kolobari med leti, da se ne pokosi parcele v celoti.

Pri načrtovanju tovrstnih ukrepov na Cerkniškem jezeru, je ena izmed glavnih težav nepredvidljivost poplavljanja, ki narekuje čas in obseg košnje. Za primer v letu 2023 kljub vpisu v ukrep VTR, večji del jezera ni bil pokosen, saj ni bil dostopen. Zaradi velike nasičenosti tal z vodo košnja s traktorjem ni mogoča v časovnem okvirju ukrepa MET, zato je za območje presihajočega Cerkniškega jezera potrebno iskati ustrezne alternative v izmenični letni košnji. Poleg tega pa je pomembno zagotavljati enostavnost ukrepov in območja vpisov, da so tovrstni ukrepi čim bolj sprejeti in realizirani med kmetovalci. Ključno za prilagajanje načrtov je redni monitoring rabe in ključnih vrst, ki omogoči hitro odzivanje ob neugodnih razmerah.

Summary

Challenges of wetland habitat management

Maintaining and enforcing farmland biodiversity is a complex issue. Intensification is replacing the extensive farming practices and leads to monotonous landscape. But on the other hand, small scale farming is being abandoned, causing the farmlands to be overgrown. Both lead to decreasing farmland biodiversity, therefore, is a constant need to search for balance between economical and nature conservation priorities.

In the climate conditions of intermittent Lake Cerknica is maintaining grassland and wetland conserving basing on obstructing the forest wise oriented ecological succession. Due to high water saturation of soil, is ground processing almost impossible, making mowing the main farming practice here. By the end of the 20th century, mowing was decreased to almost a quarter of the surface of the intermittent lake, subjecting the area to the overgrowing. To mitigate production and conservation on Natura 2000 sites, agri-environmental payments were developed within European Common Agricultural Policy (CAP). These measures target umbrella species, which live in specific habitat conditions and if the umbrella species thrives, it is predicted that other species of the habitat thrive as well and vice versa.

The umbrella species for Lake Cerknica is the corncrake (*Crex crex*), and for its conservation annual late mowing after August the 1st is favoured. CAP measure “Birds of the wet meadows” turned out to be of great success, increasing land use to almost entire surface being mowed

(80–90% in 2021 and 2022). But the wetland of Lake Cerknica is very colourful mix of habitats and species, and some might need different management approaches.

Annual large scale simultaneous mowing on long term causes homogenisation of growing areas, concluding the grass sod, into complete covering the barren ground. It also affects the vertical structure of grasslands by eliminating high growing and woody plants, but the effects vary between habitats. It also favours the species that complete their reproduction until then, but threatens other plants and animals that haven't.

In the deepest parts of the floodplain, where flood sustains from 60–75% of days per year, thrive lakeshore bulrush (*Schoenoplectus lacustris*) and common reed (*Phragmites australis*), creating large reedbed stands called "Tršča". These are important areas for waterfowl, for nesting, resting and cover. Submerged parts are important spawning sites for fish, but when dry reedbeds provide cover for the red deer (*Cervus elaphus*), especially in rutting season. Dead reed debris stranded on meadows creates habitat for shining spurge (*Euphorbia lucida*).

Tall sedges communities (Magnocaricion), called "kravina", grow in areas that are flooded nearly half of the year (50–60 %). It is important habitat for the corncrake, common quail (*Coturnix coturnix*), sedge warbler (*Acrocephalus schoenobaenus*). Tall growing plants (i.e. fen ragwort (*Senecio paludosus*)) piercing the horizon of sedges, play an important role for perching, feeding or shelter from flooding.

On the side of the lake are alkaline fens called "blata", they are rarely flooded (10–30% days of the year) from main current, water mainly comes from rainfall and smaller side streams. Plant communities are richer here than in "kravina", and invertebrate communities follow. Here grass tussocks provide shelter from flooding for i.e. ants from genus *Myrmica* and the scarce large blue (*Phengaris teleius*) and thealcon large blue (*Phengaris alcon*). Slow growth doesn't provide cover for nesting birds, therefore is provided in dead grass in the unmowed areas from the previous year. And the barren ground between tussocks is habitat oblong-leaved sundew (*Drosera intermedia*).

Even if very successful, one measure cannot universally conserve all the species, so there is a need to diversify mowing time and area, to conserve endangered ones. One of the main issues is also unpredictable annual extend of flooding and inaccessibility in early summer. This could be bypassed with measures, that would encourage alternate mowing between years. But if any of the new agri-environmental measures should be developed, they should be understood in accepted in wider public. It is also crucial to regularly adjust monitoring land use and indicator species for rapid responses in unfavourable effects.

Zahvala

Raziskave so potekale v okviru projektov, financiranih iz finančnega mehanizma LIFE, in sicer projektov Life for seeds (LIFE20 NAT/SI/000253) in Life Tršča (LIFE22–NAT–SI–LIFE TRSCA – 101114184), ki sta ju sofinancirala Evropska komisija in Republika Slovenija.

Viri

- Gaberščik, A., Krek, J. L., Zelnik, I. 2018. Habitat diversity along a hydrological gradient in a complex wetland results in high plant species diversity. *Ecological Engineering*, 118, 84–92.
- Frajman, B., Jogan, N. 2007. Mlečki (rod *Euphorbia*) Slovenije: The genus *Euphorbia* in Slovenia.
- Jogan, N. (ur.) 2001. Gradivo za Atlas flore Slovenije. Center za kartografijo favne in flore, Miklavž na Dravskem polju. 443 str.
- Kmecl, P., Gamser, M., Šumrada, T. 2023. Monitoring splošno razširjenih vrst ptic v letih 2021, 2022 in 2023 za določitev vrednosti slovenskega indeksa ptic kmetijske krajine – končno poročilo. – DOPPS, Ljubljana.
- Kraševac, R., Jančar, T. 2023. Popis rabe zemljišč na Cerkniškem jezeru v letu 2021. Notranjski regijski park, Cerknica. 29 str.
- Kraševac R. 2022. Ekološke potrebe škrlatca (*Carpodacus erythrinus*) in prepoznavanje ključnih območij za ohranjanje vrste na Cerkniškem jezeru. Notranjski regijski park, Cerknica. 24 str.
- Kus, J. 2002. Izbira habitata travniških ptic pevk na Cerkniškem polju. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo. 130 str.
- Martinčič, A., Wraber, T., Jogan, N., Ravnik, V., Podobnik, A., Turk, B., Vreš, B., Frajman, B., Strgulc–Krajšek, S., Trčak, B., Bačič, T., Fischer, M. A., Eler, K., Surina, B. 2007. Mala flora Slovenije. Ljubljana. Tehniška založba Slovenije. 967 str.
- MKGP 2015. Kmetijsko-okoljsko-pondebna plačila 2015–2020. Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, Ljubljana.
- Rebeušek, F. 2006. Mravljiščarji Slovenije: razširjenost, ekologija, varstvo. Center za kartografijo favne in flore, Miklavž na Dravskem polju. 15 str.
- Stergaršek, J., Kraševac, R. 2023. Strašničin mravljiščar (*Phengaris teleius*) na Cerkniškem jezeru – Projekt LIFE SEMENA. Notranjski regijski park, Cerknica. 14 str.
- Stergaršek, J., Kraševac, R., Jančar, T. 2023. Srednja rosika (*Drosera intermedia*) na Cerkniškem jezeru in tveganja napačnega gospodarjenja. Notranjski regijski park, Cerknica. 14 str.
- Verovnik, R. 2019. Prenovljeni seznam dnevnih metuljev (*Lepidoptera: Papilionidea*) Slovenije. *Acta entomologica Slovenica*, vol. 27, št. 1, str. 5–15. Slovensko entomološko društvo Štefana Michielija, Ljubljana.

Izzivi ohranjanja kosca (*Crex crex*) na Cerknškem jezeru

Tomaž Jančar, Jošt Stergaršek, Rudi Kraševac

Uvod

Območje Natura 2000 Cerknško jezero je eno najpomembnejših območij za ptice v Sloveniji. Doslej je bilo tu zabeleženih 292 vrst ptic (neobjavljeno). Veliko pestrost ptic omogoča široka paleta obsežnih in dobro ohranjenih habitatov. Na Cerknškem jezeru so za slovenske razmere zelo velike površine močvirnih habitatov, trstič, nizkih barij, vlažnih travnikov in združb visokega šašja. K pestrosti vrst pa prispevajo tudi grmišča, gozdiči, gozdni osamelci, razmeroma ekstenzivna kmetijska krajina na robu presihajočega jezera in tudi jezerska naselja. Za vsaj 11 vrst je Cerknško jezero najpomembnejše gnezditveno območje v državi, npr. za bičjo trstnico *Acrocephalus schoenobaenus* (Linnaeus, 1758), kozico *Gallinago gallinago* (Linnaeus, 1758), mokoža *Rallus aquaticus* (Linnaeus, 1758) in repaljščico *Saxicola rubetra* (Linnaeus, 1758). Zaradi slabšanja habitatov na Ljubljanskem barju, pa se bosta seznamu vsak čas pridružila še koscec *Crex crex* (Linnaeus, 1758) in veliki škurh *Numenius arquata* (Linnaeus, 1758) (Jančar, 2025).

Kadar je v gnezdilni sezoni vodostaj jezera nižji, postane Cerknško jezero izjemno obsežen habitat za ptice vlažnih travnikov. Med njimi izstopa koscec, v Sloveniji močno ogrožena vrsta, ki gnezdi na vlažnih travnikih in nekaterih tipih mokrišč (sliki 1 in 2).

Zaradi skrivnostnega življenja in celonočnega glasnega petja ga uvrščamo med karizmatične vrste. Ker je koscec karizmatična vrsta in tudi krovna vrsta vlažnih travnikov na jezeru, so nanj že desetletja usmerjena naravovarstvena prizadevanja.



Slika 1: Koscec (*Crex crex*) je v Sloveniji močno ogrožena vrsta (foto: Zoran Vidrih).



Slika 2: Travniki na Dolenjskih blatih so pomemben habitat kosca (foto: Tomaž Jančar).

V več velikih naravovarstvenih projektih (DOPPS, 2007; NRP, 2009) je bilo na jezeru odkupljenih okrog 800 parcel v skupni površini preko 500 ha. V projektu LIFE Kosec (DOPPS, 2007), ki je bil sploh prvi LIFE projekt v Sloveniji, smo razvili tudi ciljno usmerjen kmetijsko okoljski ukrep VTR (Habitati ptic vlažnih travnikov) in pri kmetijskem ministrstvu dosegli, da so ga uvrstili v državno shemo ukrepov skupne kmetijske politike.

Ukrep VTR je finančna spodbuda za kmete s ciljem zagotavljati vsakoletno pozno košene (po 1.8.), ekstenzivne vlažne travnike brez gnojenja, ki jih kmetje kosijo na koscem prijazen način (t.j. od sredine navzven ali od roba do roba). Danes je na Cerkniškem jezeru v ukrep VTR vpisanih več kot 800 ha zemljišč (Kraševac, 2024). Samo Javni zavod Notranjski regijski park pokosi letno skoraj 300 ha vlažnih travnikov.

Obseg naravovarstvenih prizadevanj za ohranjanje kosca na Cerkniškem jezeru zadnjih 20 let je torej izjemen in je brez primere v slovenskem merilu. Pričakovali bi, da se bo populacija kosca na jezeru zato občutno povečala. A se to ni zgodilo. Populacija vse od leta 1992, kar jo redno spremljamo, niha okrog podobnih vrednosti. Še več, v letih okrog 2023 je zanihala tako globoko navzdol, kot še nikoli doslej.

Novejša spoznanja kažejo, da vsakoletna košnja vseh zemljišč na območju po 1.8. ni optimalen način upravljanja koščevega habitata. Razlogi so različni. (i) Kosec za gnezditve potrebuje dovolj visoko vegetacijo (Green in sod., 1997). Na nekaterih delih Cerkniškega jezera je vegetacija v času gnezditve prenizka in koscu ne ustreza, zato so potrebni nepokošeni deli, kjer vegetacija ostaja dovolj visoka za prihodnje leto. Zaradi vse bolj razširjene košnje je vse več predelov jezera s prenizko vegetacijo. (ii) Lokalne populacije kosca so tekom sezone podvržene precejšnjim nihanjem. Območja z zgodnejšo košnjo kosci tekom sezone zapuščajo, na območja z dobrim habitatom in pozno košnjo pa prihajajo vedno novi kosci iz oddaljenih že pokošenih območij.

Ti začenjajo oblikovati nova legla vse do poznega julija (Arbeiter in sod., 2017a). Tudi na Cerknškem jezeru se skozi sezono kosci pojavljajo na novih lokacijah, bolj proti notranjosti jezera, kjer jih v rednih monitoringih v začetku junija ne zabeležimo. Kar pomeni, da se gnezditve tu zavleče dlje v sezono. (iii) Dolgoletni niz podatkov o lokacijah pojočih koscev kaže, da kosci po jezeru niso razporejeni enakomerno. Očitno je, da tu prihaja do preferenc pri izbiranju habitata, kar ima lahko velik pomen za način upravljanja z zemljišči. Prvo analizo habitatnih tipov, ki jih kosci naseljuje na Cerknškem jezeru, so naredili že Polak in sod. (2004). Drugi vpogled v značilnosti koščevega habitata na Cerknškem jezeru smo izvedli Jančar in sod. (2023). Množico travniških in mokriščnih habitatnih tipov na jezeru smo združili v štiri skupine in za vsako od njih naredili analizo površine, ki jo pokriva, ter analizirali, kako jih kosci izbirajo za pevska mesta.

Na podlagi slednje raziskave v tem prispevku analiziramo nekaj dejavnikov, ki bi utegnili ključno prispevati k izboljšanju koščevega habitata na Cerknškem jezeru. Novim spoznanjem bo treba v prihodnje prilagoditi naravovarstvene aktivnosti in ukrepe kmetijske politike.

Populacija kosca na Cerknškem jezeru 1992–2023

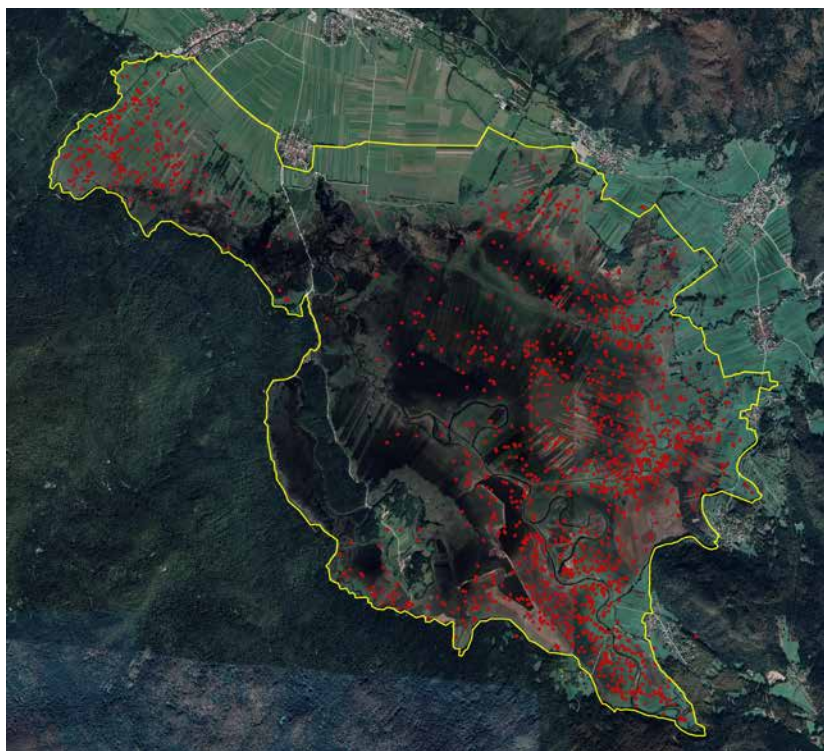
Popis koscev na Cerknškem jezeru je najstarejši monitoring kake vrste ptic v Sloveniji, ki se še vedno redno izvaja. Vsakoletni popisi se izvajajo od leta 1992 dalje. Popis organizira DOPPS, zadnja leta v sodelovanju z NRP. Do leta 2017 smo izvajali po en popis letno, od 2018 dalje pa po najmanj dva. Interpretacija rezultatov dveh popisov v sezoni je sledeča: če sta lokaciji pojočega kosca v obeh popisih manj kot 300 m narazen, ju pripišemo istemu osebk, če pa sta več kot 300 m vsaksebi, ju štejemo za dva različna osebka. Primerljivost podatkov iz let, ko je bil izveden samo en popis, zagotovimo z normalizacijo: rezultat edinega popisa pomnožimo s faktorjem 1,25. Toliko znaša povprečni količnik števila osebkov med eno in dvema ponovitvama popisa (Božič 2005, Jančar in Božič 2015, Jančar 2017). Podatke o številu in lokacijah koscev smo povzeli po podatkih, ki so jih člani DOPPSa zbirali v okviru monitoringa »Crex night« in v okviru Monitoringa populacij izbranih ciljnih vrst ptic na območjih Natura 2000 (Polak in sod. 2004; Denac in sod., 2022; NOAGS). Za leto 2009, ko popis kosca na Cerknškem jezeru ni bil izveden, smo vrzel v nizu zapolnili z imputiranjem z orodjem TRIM (Bogaart in sod., 2020).

Popisi koscev se izvajajo na popisnem območju, ki je nekoliko večje od območja presihajočega jezera (slika 3), a kosce izven presihajočega jezera zabeležimo zelo redko.

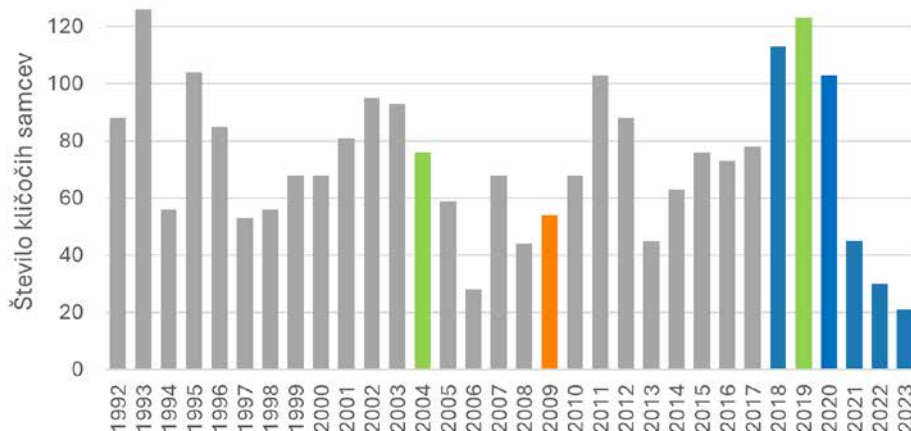
Značilnost populacije koscev na Cerknškem jezeru je, da močno niha. Med letom z najmanjšim rezultatom (2023: 21 koscev) in z najvišjim (1993: 126 koscev) je faktor kar šest. Pri številu koscev na Cerknškem jezeru zaenkrat ne moremo govoriti o trendu, saj je ta statistično neznačilen (Denac in sod., 2023). Resda je bilo v zadnjih treh letih (2021–2023) število majhno, a pred tem smo imeli triletni niz (2018–2020), ko je bilo število rekordno veliko (slika 4). Zanimivo je, da smo bili priča velikim amplitudam in periodam nihanja. Perioda med dvema maksimuma ali med dvema minimumoma je praviloma trajala 7–9 let. Nekoliko nelagodja vzbuja dejstvo, da padec populacije še nikoli ni bil tako strm in tako globok, kot zadnja leta. Zadnji padec populacije sovpada z velikim povečanjem obsega košnje na Cerknškem jezeru, ki je v letih 2021 in 2022 dosegla maksimum v zadnjih desetletjih (Kraševac in Jančar, 2023; Potočnik Buhvald in sod., 2024).

Zastavlja se vprašanje, kakšni so razlogi za tako velika nihanja in za tako majhno število v zadnjih letih. Na prvi pogled se ponuja odgovor, da je ključni razlog za majhno število koscev velik obseg jezera. Tudi Polak in sod. (2004) navajajo, da so v letih, ko je bil na jezeru vodostaj višji,

našteli manj koscev. V času popisov v začetku junija 2023 (vodostaj jezera izmerjen na hidrološki postaji Dolenje Jezero je 320 cm) je jezero prekrivalo dobro polovico predelov, kjer ponavadi beležimo kosce (Blažič in Denac, 2023).



Slika 3: Popisno območje (rumena črta). Rdeče pike so vse lokacije, kjer so bili kosci zabeleženi v popisih 1992–2023.

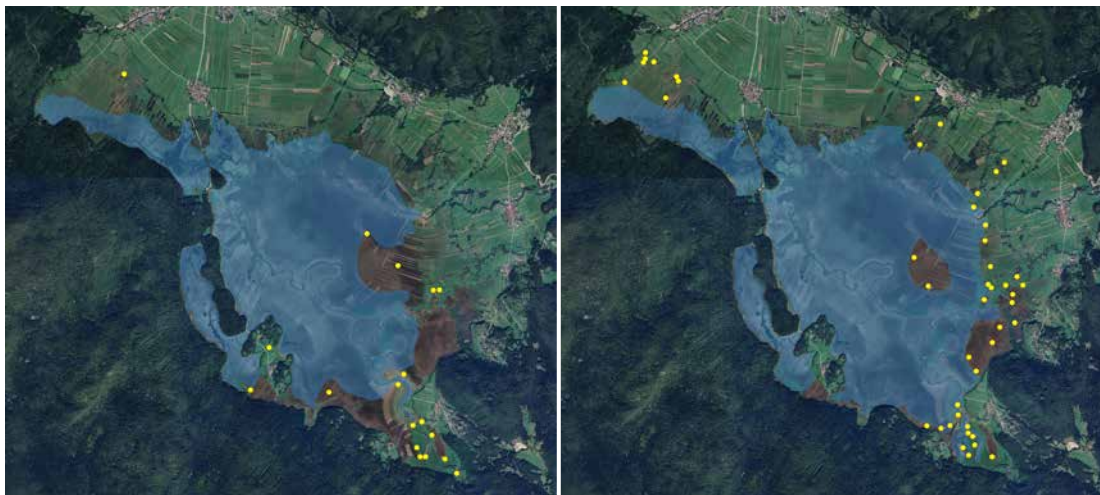


Slika 4: Rezultati monitoringa koscev na Cerkniškem jezeru 1992–2023. Legenda: siva - izveden je bil le en popis, vrednost je normalizirana; oranžna – popis ni bil izveden, vrednost je imputirana; modra – izvedena sta bila dva popisa, podano je dejansko število popisanih koscev; zelena – izvedena sta bila sicer dva popisa, prvi v času visoke vode in drugi po umiku vode, a upoštevan je bil samo drugi popis, vrednost je normalizirana.

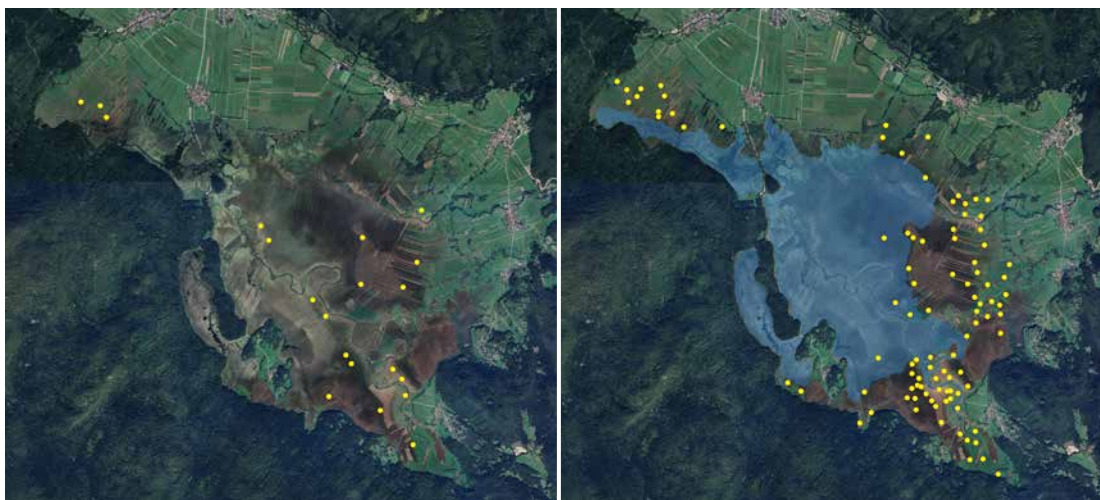
Tudi v drugem najslabšem letu 2006, ko smo našli le 22 koscev (normalizirano: 28), je bilo v času popisa površina jezera zelo velika, vodostaj DJ ~415 cm (Mihelič in sod., 2006).

A tudi leta 2019 je bil junija vodostaj visok, še precej višji kot 2023, pa je bilo leto za kosce na Cerkniškem jezeru zelo uspešno. Takrat smo v času poplave (vodostaj DJ 375 cm) popisali 45 koscev (normalizirano: 56), ob ponovitvi popisa po poplavi (vodostaj DJ 298 cm) pa kar 98 koscev (normalizirano: 123), glej slike 5 in 6.

Podobno stanje, kot leta 2019, je bilo leta 2004. Takrat smo v popisu 5.6., v času poplave (vodostaj DJ 305 cm), našli 32 koscev (normalizirano: 40), v popisu 2 tedna kasneje, ko se je voda že precej umaknila (vodostaj DJ 266 cm) pa 61 koscev (normalizirano: 76). Tekom gnezdilne sezone se je število koscev skoraj podvojilo.



Slika 5: Primerjava števila koscev (rumene pike) ob poplavi leta 9.6.2023 (levo, vodostaj DJ ~325) in 7.6.2019 (desno, vodostaj DJ ~375 cm). Modro je prikazan približni obseg poplave v času popisov, povzeto po Jančar (2023a).

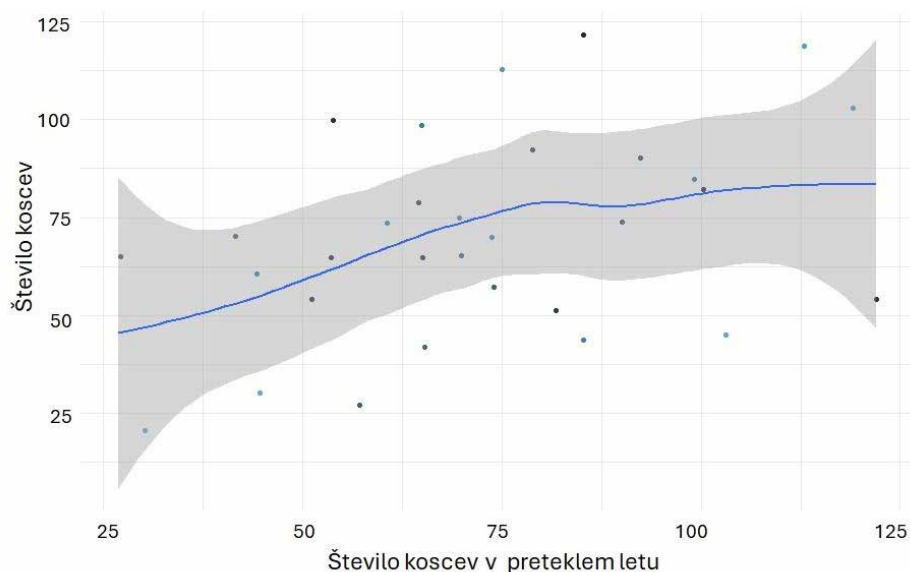


Slika 6: Primerjava števila koscev (rumene pike) po poplavi leta 7.7.2023 (levo) in 21.6.2019 (desno). Leta 2023 je jezero v času zadnjega popisa že skoraj povsem presahnilo. Desno je modro prikazan približni obseg poplave v času popisov (vodostaj DJ ~300 cm), povzeto po Jančar (2023a). Manjši del ploskev smo leta 2019 popisali nekaj dni po ciljnem datumu, zato nekaj pik pade na območja, ki so bila na ciljni datum še poplavljeni.

Videti je torej, da visok vodostaj v času popisov res rezultira v manjšem številu popisanih koscev, a to še ne pomeni slabe sezone za kosce. Potem ko se voda umakne – in to se zgodi skoraj vsako

leto – lahko sledi zelo uspešna gnezdilna sezona. Pravi razlogi za rekordno slabo stanje koscev na Cerkniškem jezeru v letu 2023 morajo biti torej drugje. Verjetno je kriva kombinacija različnih dejavnikov, a zaenkrat ne vemo, kateri so imeli večji oz. odločujoči vpliv. Najbolj verjetni so predvsem naslednji dejavniki:

[1] Slab lokalni reprodukcijski uspeh v preteklem letu. Pri nihanju populacije koscev na Cerkniškem jezeru se nakazuje vzorec, da večjim strmim upadom populacije sledi večletno okrevanje, ko je iz leta v leto več koscev (slika 7). Morda je to povezano s tem, da se v letu po uspešni gnezdilni sezoni na območje vrne več lokalnih koscev (Budka in sod., 2021). Pri koscih samci pojejo v skupinah, s čemer povečajo možnost, da privabijo samice (Green in sod., 1997). Morda večja začetna skupina pojočih koscev poleg samic privabi še več samcev. Keiš in sod. (2004) so ugotovili, da območje na začetku sezone zasedejo domači kosci, kasneje pa se jim pridružijo prišleki od daleč, s prezgodaj pokošenih območij.



Slika 7: Število koscev na Cerkniškem jezeru v odvisnosti od števila koscev v preteklem letu.

Kaže se torej vzorec, da uspešnemu letu za kosce na Cerkniškem jezeru sledi naslednje še uspešnejše. Leto 2022 ni bilo uspešno. S 30 zabeleženimi kosci je bilo drugo najslabše doslej. Temu se je marsikje pridružila prezgodnja košnja, saj so bila zaradi spremenjenega kmetijsko-okoljskega ukrepa VTR (kmetijsko-okoljski ukrepi so del Evropske skupne kmetijske politike namenjen doseganju okoljskih ciljev v kmetijstvu; VTR je kmetijsko okoljski ukrep »Ptice vlažnih travnikov«, ki kmete nagrajuje za koscem prijazno gospodarjenje s travniki: košnjo po 1.8., košnjo od znotraj navzven, brez gnojenja... (Uredba 7211)) že sredi julija pokošena obsežna območja jezera. Zaradi sušnega vremena je košnja naglo napredovala in do sredine avgusta so bile pokošene zelo velike površine. Precej verjetno je, da je bilo s tem pokošeno znatno število mladih koscev.

Zaenkrat ne vemo, kako trdna je hipoteza, da uspešnemu letu za kosce na Cerkniškem jezeru sledi naslednje še uspešnejše, a dejstvo je, da se majhno število iz 2023 precej dobro ujema z vzorcem dolgoletnega nihanja populacije.

[2] Slabo stanje populacije v regiji. Za populacijo kosca so značilna velika nihanja med leti. Pri iskanju primernega habitata v gnezdilni sezoni preletijo velike razdalje (Koffijberg in sod., 2016).

Videti je, da spremembe v lokalni populaciji lahko odslikavajo tudi bolj generalne trende v širši populaciji in ne le lokalnih razmer (Budka in sod., 2021). Najslabši leti zadnjih let (2022 in 2023) sta bili za kosce rekordno slabi povsod v Sloveniji (Blažič in Denac, 2023). Eden od razlogov za slabo stanje na Cerkniškem jezeru zadnja leta bi lahko bilo morebitno slabo stanje populacije v srednji Evropi. Zaenkrat podatkov o trendu populacij koscev v sosednjih državah za leta 2022–2023 nimamo, a v Nemčiji so v letih 2022–2023 zabeležili blizu 50 % upad populacije v primerjavi z 2020–2021 (DDA, 2023).

[3] Slabšanje stanje gnezditvenega habitata na Cerkniškem jezeru. V nadaljevanju tega prispevka smo pokazali, da vsakoletna košnja obsežnih območij ni optimalen način upravljanja koščevega habitata, saj mu bolj ustreza mozaik košenih in nekošenih travnikov, kjer je struktura vegetacije heterogena (Arbeiter in sod., 2017b). V letih 2021 in še bolj 2022 je bilo na jezeru pokošenih rekordno veliko zemljišč. Vsaj za območje blat to zagotovo pomeni slabšanje koščevega habitata, saj je zaradi tega vegetacija v začetku gnezditvene sezone za kosca prenizka.

Karta skupin habitatnih tipov za kosca

Iz dolgoletnih izkušenj pri popisih kosca na Cerkniškem jezeru se kaže, da nekatere habitate izbira raje od drugih. Videti je, da se izogiba trstišč, območij z zelo nizko vegetacijo in gojenih travnikov na robu jezera, raje pa ima območja z visokimi šaši in mozaik v predhodnem letu pokošenih in nepokošenih travnikov. Da bi preverili in ovrednotili našo hipotezo, smo izdelali poenostavljeno karto štirih skupin habitatnih tipov, ki se na jezeru kosijo in so potencialno habitat kosca (Jančar in sod., 2023):

- **Trstišča** so območja z vitalnim trsjem *Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud. ter območja, kjer zaradi košnje trstičje sicer ni več vitalno, a naravne danosti omogočajo, da bi se ob prenehanju košnje ponovno razvilo. To so območja, kjer se jezerska voda zadržuje najdlje.
- **Kravina** so združbe visokih šašev, ki se pojavljajo bolj v notranjosti jezera, kjer se jezerska voda zadržuje dlje časa. Na zunanjih delih jezera se kravina pojavlja izolirano v depresijah, npr. v fosilnih strugah nekdanjih jezerskih rek in potokov. V to skupino smo uvrstili tudi sestoje s prevladujočo trstično pisanko *Phalaris arundinacea* L., za katere smo ocenili, da imajo z vidika kosca podobno strukturo kot visoka šašja. Kravina je star lokalni izraz, s katerim domačini s širšega območja Cerkniškega jezera poimenujejo združbe visokih šašev. Izraz je bil nekdanj morda znan tudi izven lokalnega okolja, saj ga je Pleteršnik (1894) uvrstil v svoj znameniti Slovensko-Nemški slovar. Pripisal je pojasnilo: "neka trava v Cirkniškem jezeru".
- **Blata** so zemljišča, skromna s hranili, z razmeroma nizkim rastjem, večinoma na zunanjem delu jezera; ta zemljišča jezerska voda redkeje doseže, nekaterih skoraj nikoli, so pa zelo mokrotna zaradi zastajanja padavinske vode. Tu so tla marsikje slabo nosilna za kmetijsko mehanizacijo, nekatera zemljišča so za traktorje dostopna le v najbolj sušnih letih. Skupina vključuje različne združbe nizkih šašev, bazičnih nizkih barij in travnikov z modro stožko *Molinia caerulea* (L.) Moench. Blata je izraz s katerim domačini na Cerkniškem jezeru označujejo predele jezera s prevladujočimi nizkimi barji. Blato je staroslovenski izraz za barje, ki ga je Pleteršnik (1894) še poznal, kasneje pa se je začel izgubljati.
- **Travniki** so zemljišča, kjer prevladujejo različne združbe trav (razen spodaj omenjenih vrst), ki so bolj na robu jezera, na rodovitnejših in nadpovprečno suhih tleh in so primerna za pridelavo krme za živino.

Karto teh štirih skupin habitatnih tipov smo izdelali na osnovi dveh kartiranj habitatnih tipov, ki sta bili doslej izvedeni na Cerkniškem jezeru. Starejše (Gaberščik, 2009) in bolj grobo je bilo v letih 2007–2009 izvedeno na območju celotnega presihajočega jezera, novejše (Stergaršek in sod., 2023) in natančnejše pa je bilo izvedeno leta 2022, a le na delu jezera na površini 1.449,3 ha. Za predele, za katere je bilo na voljo novejše kartiranje, smo uporabili podatke iz tega, za preostale dele jezera pa podatke iz starejšega kartiranja. Razmejitev habitatnih tipov smo ponekod nekoliko popravili, glede na novejše poznavanje stanja na terenu.

Ločeno od zgoraj naštetih skupin habitatnih tipov smo pripravili še karto treh skupin habitatnih tipov, ki niso habitat kosca: (i) Vode. Predeli jezera, z odprto vodno površino, kjer zaradi globine vode močvirsko rastlinje ne uspeva. V času ko jezero presahne so tu gola tla. V to skupino smo vključili še obvodne združbe z jezerskim bičkom *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla. (ii) Gozdovi in grmišča. kjer lesnata vegetacija grmovja in dreves prekriva več kot polovico površine. (iii) Antropogeno (preglednica 1). Zemljišča, ki so spremenjena do te mere, da ne predstavljajo več ustreznega habitata, npr. ceste, kolovozi, njive, trajni nasadi in deponije. Karto za slednje skupine smo izdelali na osnovi Popisa rabe zemljišč na Cerkniškem jezeru v letu 2021 (Kraševac in Jančar, 2023), s tem da smo upoštevali poligone, večje od 100 m², manjše pa smo spojili s priležnimi zemljišči.

Preglednica 1: Površina in delež posameznih skupin habitatnih tipov za kosca na Cerkniškem jezeru.

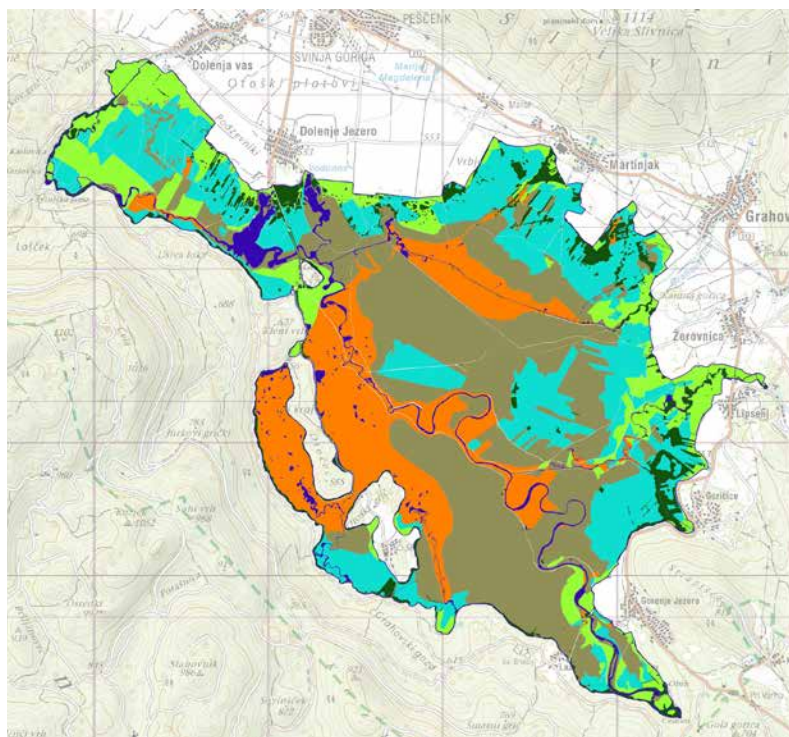
Skupine HT	Površina [ha]	Delež
Trstišča	431,5	17,8 %
Kravina	837,4	34,5 %
Blata	607,9	25,0 %
Travniki	293,0	12,1 %
Gozd in grmišča	151,0	6,2 %
Vode	81,1	3,3 %
Antropogeno	26,7	1,1 %
Skupaj	2.428,6	100 %

Od štirih skupin habitatnih tipov, ki se na jezeru kosijo in so potencialno habitat kosca, največ površine prekriva kravina 837,4 ha (34,5 %), potem pa si sledijo: blata 607,9 ha (25,0 %), trstišča 431,5 (17,8 %) in travniki 293,0 ha (12,1 %) (slika 8). Tri skupine habitatnih tipov, ki niso potencialni habitat kosca – vode, gozd in grmišča in antropogeno – pokrivajo skupaj 258,8 ha, kar predstavlja 10,7 % površine presihajočega jezera.

Izbor habitata pri koscih na Cerkniškem jezeru

Analizo kako kosci izbirajo različne skupine habitatnih tipov smo naredili za tri števna obdobja: (i) 1999–2016, (ii) 2017–2020 in (iii) 2021–2023. V zadnjih dveh števni obdobjih, v razponu 7 let, smo lokacije pojočih koscev beležili z GPS napravami ob približanju ptici na ~10 m, zato so lokacije zelo natančne. Pred letom 2017 se je kosce popisovalo brez GPS in na daljavo, saj ustrezna tehnologija še ni bila na voljo oz. ni bila dovolj široko dostopna. Natančnost lokacije je bila takrat odvisna od razdalje popisovalca do pojoče ptice, poznavanja terena in razpoložljivosti orientirjev v prostoru. Ob neugodni kombinaciji naštetih dejavnikov je bilo odstopanje

dejanske lokacije od zabeležene lahko tudi večje od 100 m ali celo nekaj 100 m. Pri analizi podatkov smo za številni obdobji 2017–2023 izločili podatke, kjer lokacija ni bila natančno določena z GPS napravo.



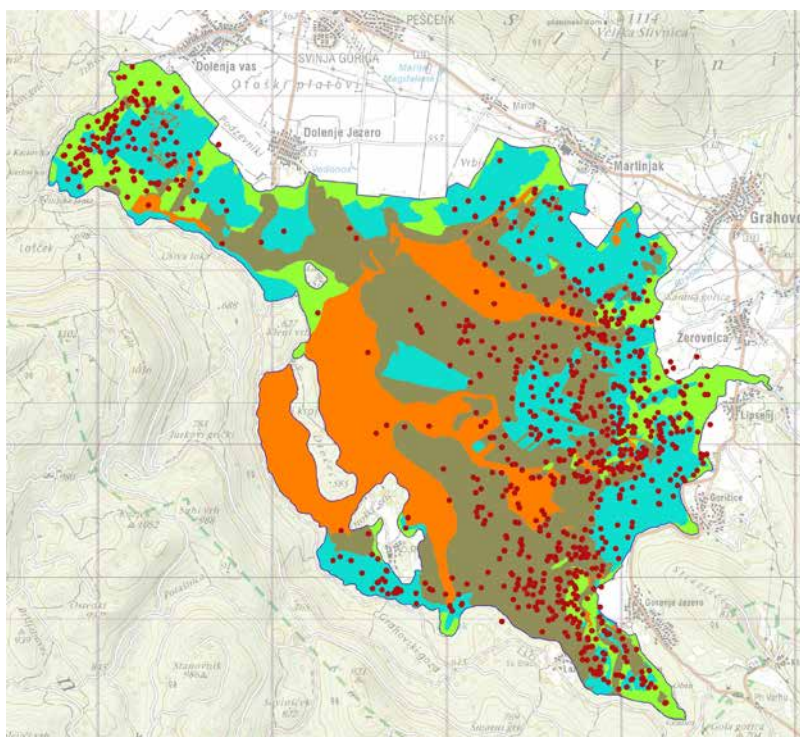
Slika 8: Poenostavljena karta skupin habitatnih tipov na Cerklješkem jezeru. Legenda: svetlo zelena – travniki, svetlo modra – blata, rjava – kravina, oranžna – trstišča, temno modra – vode, temno zelena – gozdovi in grmišča, svetlo siva – antropogeno.

Izbira skupine habitatnih tipov

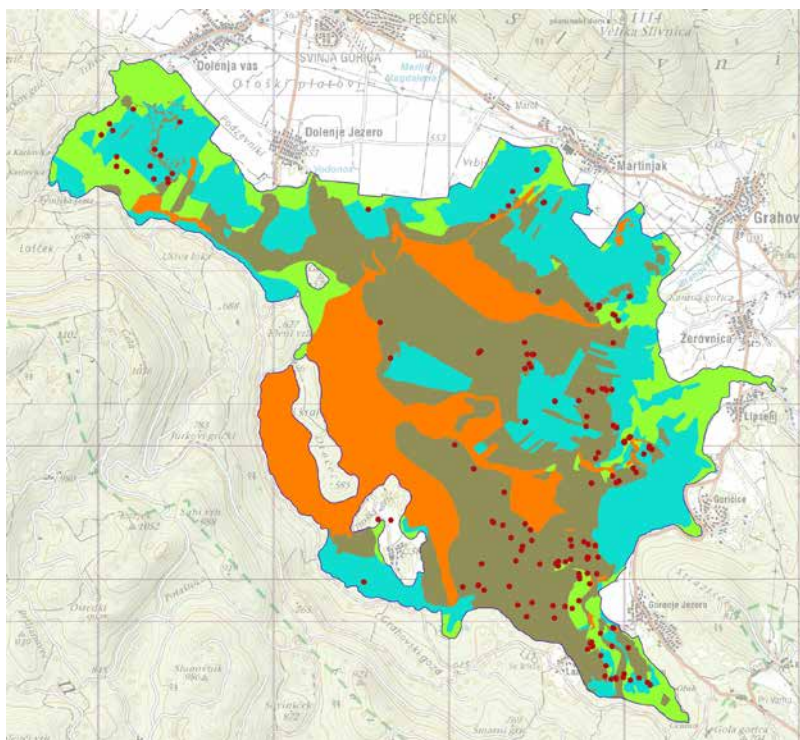
V raziskavi smo potrdili, da kosci vseh skupin habitatnih tipov ne izbirajo v enaki meri. Območjem trstišč se skoraj povsem izogibajo (slike 9–13). Odkar lokacije koscev beležimo z GPS napravami, smo v trstičju zabeležili le 3,4 % koscev, pa še ti so bili blizu roba trstišč, nikoli v osrednjem delu.

Blizu 2/3 koscev smo zabeležili v kravini, kar je skoraj dvakrat več od deleža površine, ki ga pokriva kravina. Zanimivo je, da delež koscev v kravini, s časom narašča. Pred 2017 je bil 42,3 %. Ta podatek je sicer treba vzeti nekoliko z rezervo, saj so bile tedaj lokacije beležene približno, brez GPS naprav. A razlika do stanja v zadnjih 7 letih je tako velika, da presega pričakovano napako. V letih 2017–2020 je bil delež koscev v kravini 61,5%, v letih 2021–2023 pa 69,7 %. Videti je, da se delež koscev v kravini povečuje predvsem na račun zmanjševanja deleža koscev na blatih.

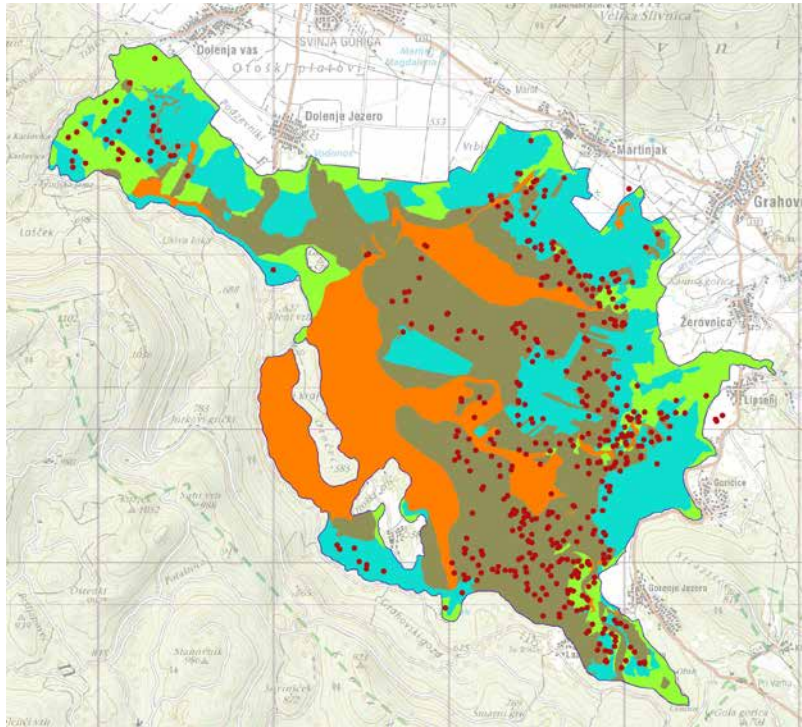
Delež koscev, zabeleženih na blatih, se je prepolovil. Pred letom 2017 smo jih na blatih zabeležili 31 % (lokacije približne), v letih 2017–2020 za tretjino manj (20,4 %), v letih 2021–2023 pa le še 14,2 %. Še nekoliko manjši kot na blatih je delež koscev na travnikih. Pred letom 2017 je znašal 20,1 %, v obdobju 2017–2023 pa je padel na 13,3 % (slike 9, 10, 11).



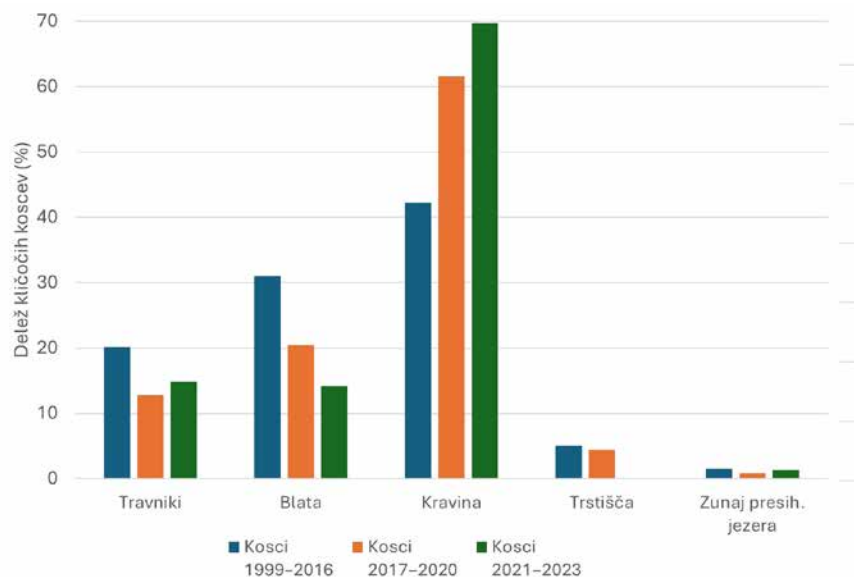
Slika 9: Lokacije koscev, zabeleženih v letih 1999–2016. Lokacije so približne, saj niso bile zabeležene z GPS napravami. Legenda: svetlo zelena – travniki, svetlo modra – blata, rjava – kravina, oranžna – trstišča.



Slika 10: Lokacije koscev, zabeleženih z GPS napravami v letih 2017–2020 (4 leta popisov). Legenda: svetlo zelena – travniki, svetlo modra – blata, rjava – kravina, oranžna – trstišča.



Slika 11: Lokacije koscev, zabeleženih z GPS napravami v letih 2021–2023 (3 leta popisov). Legenda: svetlo zelena – travniki, svetlo modra – blata, rjava – kravina, oranžna – trstišča.

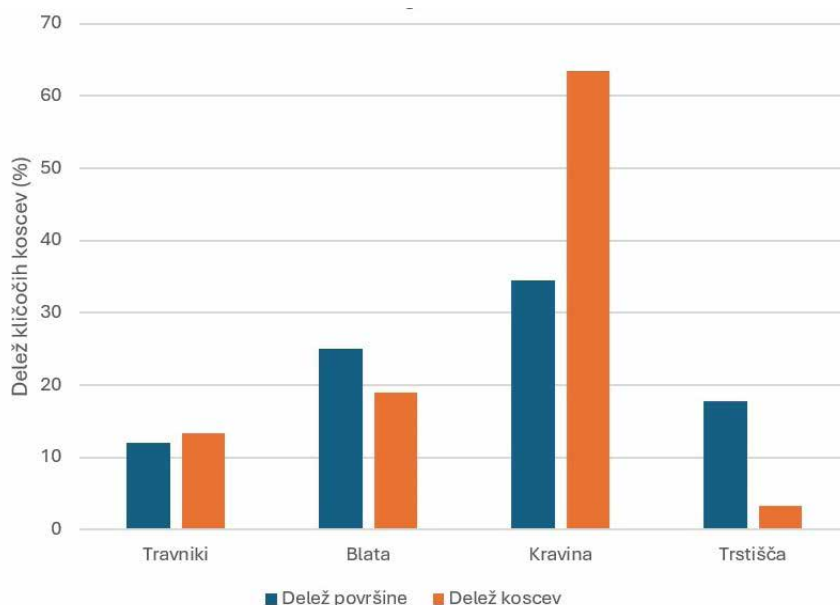


Slika 12: Delež koscev, zabeleženih po posameznih skupinah habitatnih tipov v treh števnih obdobjih.

Izbira predelov s kravino in travnikov glede na obseg ojezeritve

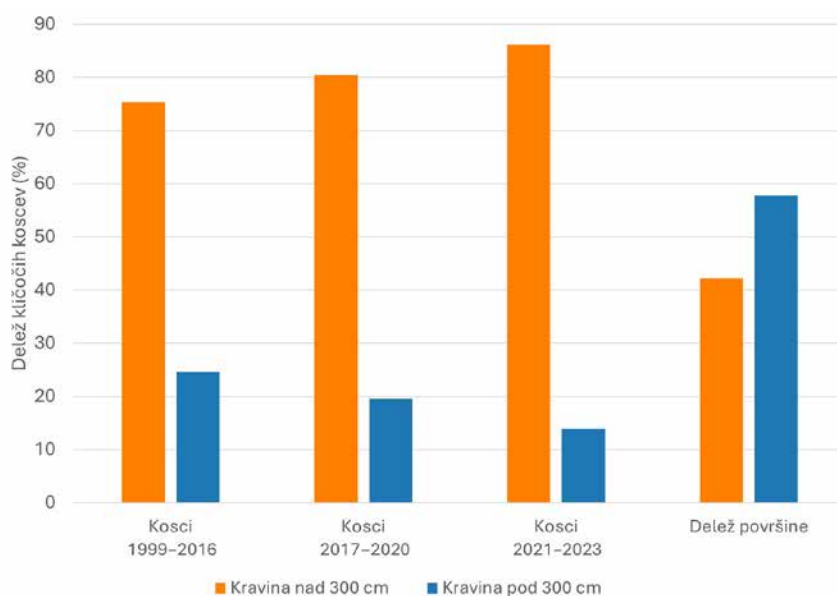
Za predele s kravino smo naredili še dodatno analizo glede na obseg poplavljenosti, saj je videti, da kosci pogosteje za pevska mesta izbirajo predele s kravino, ki so poplavljeni krajši čas in imajo nekoliko večjo nadmorsko višino. Primerjali smo predele s kravino, ki so poplavljeni

ob vodostaju 300 cm, merjeno na postaji Dolenje Jezero, in tistimi, ki niso. Ta vodostaj ustreza nadmorski višini približno 548,6 m. Mejo 300 cm smo izbrali arbitrarno iz dveh razlogov: (i) ker smo imeli na voljo karto z mejami ojezeritve ob tem vodostaju in (ii) ker ta meja deli predele s kravino na dva podobno velika dela.



Slika 13: Primerjava deleža površine posameznih skupin habitatnih tipov (modro) z deležem koscev, ki so peli v njih v letih 2017–2023 (oranžno)

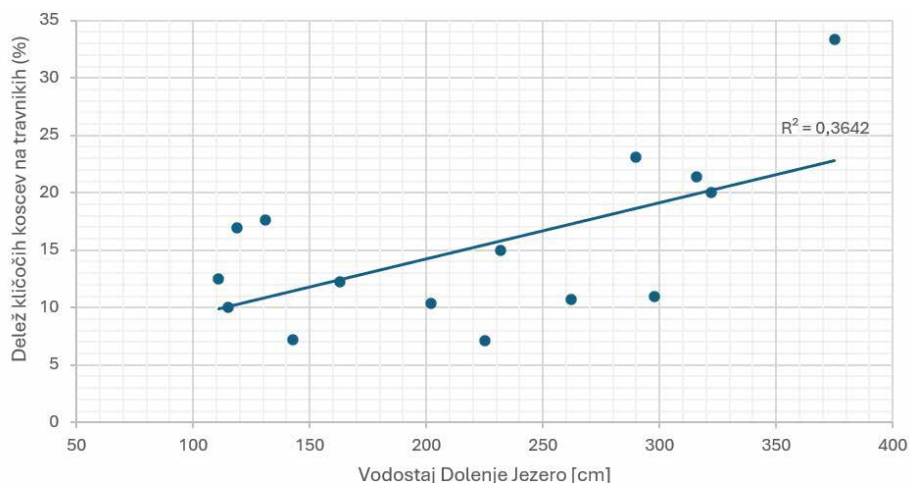
Analiza je potrdila naša predvidevanja, da več koscev poje na tistih predelih s kravino, ki so poplavljeni manj časa (slika 14).



Slika 14: Deleži koscev, ki smo jih v treh števnih obdobjih zabeležili v predelih s kravino pod koto poplavljenosti ob vodostaju 300 cm (postaja Dolenje Jezero) in nad njo. Desno so podatki o deležu površine predelov s kravino, ki ležijo nad in pod to koto.

Delež predelov s kravino, ki leži pod nivojem poplav ob vodostaju 300 cm merjeno na hidrološki postaji Dolenje Jezero, znaša približno 3/5, medtem ko delež koscev, ki smo jih zabeležili v teh predelih kravine, znaša komaj 1/5.

Kaže se tudi pravilo, da ob višjih vodostajih večji delež koscev poje na travnikih (slika 15). To pravilo postane še bolj izrazito ob najvišjih vodostajih, ko je velik del kravine poplavljen in so kosci potisnjeni bolj proti robu jezera.



Slika 15: Delež koscev, zabeležen na travnikih v odvisnosti od vodostaja jezera, izmerjenega na hidrološki postaji Dolenje Jezero v času popisov.

Diskusija

Izbor habitata pri koscih na Cerknškem jezeru

Habitat kosca na Cerknškem jezeru so za trinajstletno obdobje 1992–2004 analizirali Polak in sod. (2004). Ugotovili so, da so kosci dosegali visoke gostote v travniških sestojih rušate mastnice in visokega trpotca *Deschampsio-Plantaginietum altissimae* (Iljanić 1979), največje pa tam, kjer je bila ta združba v prepletu s sestoji visokega šašja *Magnocaricion* (Koch 1926). Po drugi strani pa so ugotovili, da so bili kosci redko zabeleženi v predelih visokega šašja, kjer so se zaradi opuščanja košnje razvile visoke kopuče. Ugotovili so tudi, da sestoji trstičja *Phragmitetum australis* (Schmale 1939), trstične pisanke in jezerskega bičkovja *Scirpetum lacustris* (Schmale 1939) koscu ne ustrezajo. V naši raziskavi (Jančar in sod., 2023) so se te ugotovitve v veliki meri potrdile, pokazale pa so se že tudi razlike, ki so verjetno deloma posledica spremembe rabe travnikov v zadnjem času, deloma pa so posledica boljših podatkov zaradi natančnejšega beleženja lokacij kliščočih koscev.

[1] Trstišča

Trstišča za kosca na Cerknškem jezeru niso omembe vreden habitat. Tistih malo koscev, ki so peli v trstiščih (3,4 %), so brez izjeme vsi peli blizu roba in videti je, da je bilo trstišče le dobro skrito pevsko mesto za teritorij, ki se je sicer raztezal na sosednja območja, porasla s kravino. Kosci se ne izogibajo le vitalnih trstišč, pač pa tudi območjem, kjer so vitalna trstišča nekoč uspevala, pa so zaradi redne večletne košnje izginila. Na takšnih predelih zdaj uspeva kravina s primesjo redkega trsja. Zakaj se kosci tem območjem izogibajo, zaenkrat ne vemo. Morda je

zaradi dolgotrajnejše ojezeritve tam manj primernih žuželk, ki so glavna hrana za kosce (Arbiter in sod., 2020).

Trstišča na Cerkniškem jezeru torej niso habitat kosca, a kljub temu je kmetijska politika s kmetijsko okoljskim ukrepom VTR, ki je namenjen ohranjanju koscev, dolga leta spodbujala njihovo vsakoletno košnjo. Občasna mozaična košnja trsja je lahko učinkovit naravovarstven ukrep za izboljšanje habitata nekaterih gnezdk trsja (White in sod., 2014). V splošnem pa ima košnja trsja močan negativen vpliv na populacije ptic: število ptic se zmanjša za 60 %, stopnja plenjenja pa se podvoji (Valkama in sod., 2008). Vendar to velja za trstišča na območjih s stalnim vodostajem. Za močno spremenljive razmere presihajočega jezera so vplivi košnje še mnogo slabši. Košnja trsja, ki ji sledi poplavljenje strnišča oz. novih poganjkov, kar se na presihajočem jezeru zgodi skoraj vsako leto, ima uničujoč vpliv na vitalnost trstičja (Rolletschek in sod. 2000), tako da po nekaj letih vsakoletne košnje trstičje skoraj povsem izgine in ga nadomesti kravina. Zaradi tega se območja s trstičji na Cerkniškem jezeru krčijo iz leta v leto in so v letih 2021 in 2022 dosegla rekordno majhen obseg v zadnjih desetletjih (Kraševac in Jančar, 2023; Potočnik Buhvlad in sod., 2024). Trontelj (1993) ocenjuje, da so bila stara trstišča na območju Trščenk, Levišč, predelov ob Strženu in delu Zadnjega kraja v začetku 90-ih let prejšnjega stoletja najpomembnejša gnezdišča vodnih ptic v Sloveniji. Samo na Trščenkah so leta 1991 gnezstile štiri vrste ponirkov, najmanj tri vrste rac, bobnarica ter zelo številne liske, rakarji, srpične in bičje trstnice. Danes so Trščenske le blede senca stanja iz leta 1991 (slika 16).



Slika 16: Skromni ostanki nekdanj obsežnih vitalnih trstič na osrednjem delu Cerkniškega jezera, v Trščenkah in ob Strženu. Satelitska fotografija z dne 9.10.2023. V letu 2023 na tem delu košnje zaradi hidroloških razmer ni bilo skoraj nikjer, je pa bilo tu pokoseno skoraj vse v letih 2021 in 2022. Vitalna trstičja na sliki so temnejše lise ponekod ob Strženu in le še na dveh parcelah v Trščenkah (južno od makadamske ceste ob Strženu).

Ocenjujemo, da zaradi zelo obsežnega krčenja trstičnih habitatov na Cerkniškem jezeru populacije vseh gnezdk trstič nazadujejo. Za njihovo obnovitev bi bilo treba košnjo trstič na Cerkniškem jezeru močno omejiti: ponekod povsem opustiti, ponekod pa omejiti na eno košnjo na vsakih nekaj let (Kmecl in sod., 2022). Prvi koraki v to smer so bili že narejeni. Slovenija s strateškim načrtom skupne kmetijske politike 2023–2027 uvaja nov kmetijsko-okoljski ukrep Oha-

njanje mokrišč in barij (MOKR_BAR), ki spodbuja košnjo mokrišč vsako drugo leto. Predvideno je spodbudno visoko plačilo 337,60 EUR/ha/leto (MKGP, 2022 (strani 733 in 775), Uredba 8751, člen 42). Ukrep je na osrednjih delih jezera (slika 17) na voljo za vpisovanje od leta 2024 dalje, ko je bilo vanj vpisanih prvih 88 ha trstišč (MKGP, 2022, stran 28). Novi ukrep sicer ni ustrezen, saj ne omogoča ohranjanja vitalnih trstišč v optimalnem stanju, je pa vendarle mnogo boljši od ukrepov HAB in VTR.



Slika 17: Območja trstišč na Cerkniškem jezeru, kjer je od 2024 možno vpisovati kmetijsko-okoljski ukrep »Ohranjanje mokrišč in barij« (rožnato). Vir: MKGP (2024)

Temeljito revizijo kmetijskih ukrepov in pravil, ki vplivajo na gospodarjenje s trstišči in z drugimi močvirskimi zemljišči na jezeru, pa bomo skupaj z deležniki s področja kmetijstva, varstva narave, znanosti in državne uprave pripravili v naslednjih letih v okviru velikega novega projekta LIFE »Tršca«, ki je ciljno namenjen prav reševanju te problematike (NRP, 2024).

[2] Kravina

Združbe visokih šašev so ključni habitat kosca na Cerkniškem jezeru, saj je delež koscev, za beležen v kravini v števnem obdobju 2017–2020, znašal 61,5 %, v zadnjem števnem obdobju 2021–2023 pa celo blizu 70 %. Zanimivo je, da je bil v števnem obdobju 1999–2016 ta delež bistveno manjši (42,3 %). Tudi Polak in sod. (2004) za obdobje 1992–2004 kravine ne omenjajo kot ključnega habitata.

Razlog za veliko povečanje deleža koscev, ki pojejo v kravini, je verjetno treba iskati v velikem povečanju obsega košnje na Cerkniškem jezeru v zadnjih 20 letih. Pred letom 2002 se je na predelih, ki jih naseljujejo združbe visokih šašev, košnja izvajala le na majhnem delu površin (Kus Veenvliet, 2002). Za tisto obdobje je bila značilna velika razširjenost območij s kopučami. Za togi šaš *Carex elata* All., ki je glavna rastlinska vrsta kravine, je značilno, da tvori visoke in goste kopučaste šope, ki pa jih strojna košnja že v nekaj letih uniči (Martinčič in sod., 2007; Suholas in sod., 2022). Kosci se območjem z razvitimi kopučami izogibajo (Green in sod., 1997). V zadnjih

dveh desetletjih se je delež pokošenih zemljišč na jezeru ves čas povečeval, tako da so bili v letih 2021 in 2022 pokošeni skoraj vsi predeli, ki jih prerašča kravina (Krašovec in Jančar, 2023; Počotnik Buhvald in sod., 2024). Kopuče visokih šašev so zaradi vsakoletne košnje z jezera v veliki meri izginile, tako da za kosce večinoma ne predstavljajo več ovire v habitatu. Morda je to glavni razlog, da se je delež koscev v kravini močno povečal.

Tu velja omeniti, da uporabljajo domačini za kopuče izraz »menihi«. Dejstvo, da so ljudje skovali posebno besedo za šope rastlin, ki se razvijejo tam, kjer se ne kosi ali pa se kosi le občasno, kaže, da so bila nekošena območja tu tudi v preteklosti vsaj prisotna, če ne že obsežnejša.

Naša raziskava je potrdila še eno pomembno ugotovitev: kosci območja s kravino ne naseljujejo enakomerno, pač pa izrazito preferirajo predele s kravino na nekoliko višji nadmorski višini, stran od sredine jezera, ki so poplavljeni manj pogosto in kjer poplave trajajo manj časa. Več kot 80 % koscev v kravini smo zabeležili na predelih nad koto poplav ob vodostaju 300 cm (= 548,6 m n.m.), ki predstavlja le 40 % predelov s kravino. Zakaj je tako, bo treba še raziskati, a videti je, da gre za dva razloga: (i) ker so predeli pod koto vodostaja 300 cm poplavljeni pogostejše, je večja verjetnost, da bodo na dan popisa koscev poplavljeni in da zato tam kosca ne bomo zabeležili, in (ii) dolgotrajnejša poplava ima pomemben vpliv na ekosistem, verjetno na ekološke razmere vpliva na način, da so za kosce manj primerni (npr. struktura vegetacije, razpoložljivost hrane ...), zaradi česar se jih izogibajo tudi takrat, ko niso poplavljeni.

Sestoje trstične pisanke smo v tej raziskavi uvrstili v skupino kravina, čeprav bi po fitocenološki klasifikaciji bolj sodila med trstišča in podobne združbe (*Phragmition*) (Jogan in sod., 2004). A ocenili smo, da so po strukturi vegetacije z vidika kosca bližje visokim šašem. Polak in sod. (2004) sicer navajajo, da pisankovje koscu ne ustreza, a v naši analizi smo jih za obdobje 2017–2023 v pisankovju zabeležili kar nekaj, vsaj 12. Je pa res, da so prav vsi peli blizu roba pisankovja na meji z blati ali z združbami visokega šašja.

Zgoraj smo pokazali, da je ponovna uvedba košnje v nekdanje opuščene predele kravine ponekod verjetno pomembno prispevala k izboljšanju habitata za kosca. Vendar košnja kravine nima samo pozitivnih učinkov na ekosistem, še posebej, če je vsakoletna (Arbeiter in sod., 2020). Evidentirali smo naslednje negativne posledice vsakoletne košnje kravine:

(a) Siromašenje vrstne sestave flore. Vsakoletna košnja onemogoča dozorevanje semen številnim vrstam močvirskih zelnatih trajnic, ki praviloma cvetijo in semenijo pozno v sezoni (Stergaršek in sod., 2022), npr: perunike *Iris* spp., navadna pijavčnica *Lysimachia vulgaris* L., bleščeči mleček *Euphorbia lucida* Waldst. & Kit., velika zlatica *Ranunculus lingua* L. in močvirski grint *Senecio paludosus* L.. Neredna košnja teh vrst ne prizadene, saj so trajnice in se populacija lahko vzdržuje tudi, če rastline semenijo na vsakih nekaj let. Če pa se prezgodnja košnja ponavlja vsako leto, te vrste ne semenijo več. Populacije rastlin, ki jih košnja izčrpava, močno upadejo ter sčasoma izginejo. Tudi nekatere druge visoke rastline, ki semenijo nekoliko prej, npr. močvirski osat *Cirsium palustre* (L.) Scop. in navadno krvenko *Lythrum salicaria* L., vsakoletna košnja močno prizadene, verjetno jih izčrpa. To vodi v siromašenje vrstne sestave rastlinskih vrst, ki ima za posledico tudi siromašenje nanje vezanih živalskih vrst.

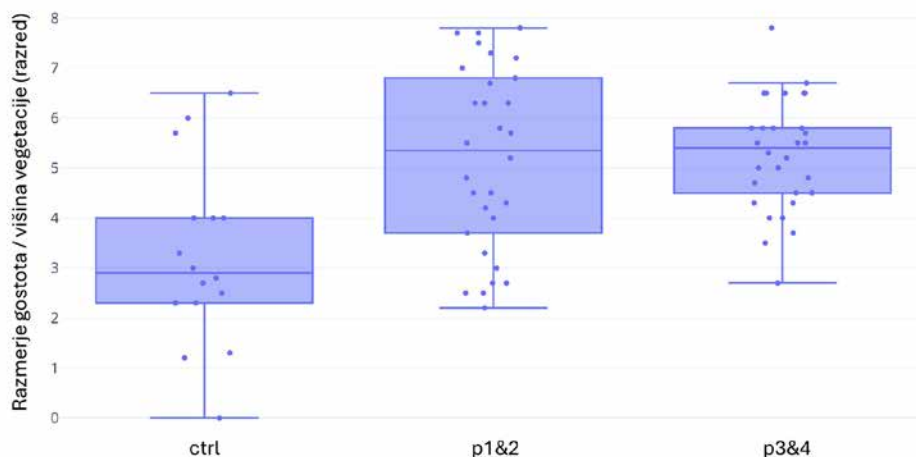
(b) Slabšanje habitata ptic. Raziskave ptic na Cerkniškem jezeru so pokazale, da je pestrost vrst ptic v redno košenih predelih s kravino zelo skromna (Kmecl in sod. 2022). Mehanizmov, zakaj pride do tega, je verjetno več. Eden je odsotnost visokih steblik, ki jih ptice uporabljajo za lovne preže, ta dejavnik je posebej pomemben za repaljščico. Drugi je verjetno manjša razpoložljivost

hrane. Znano je namreč, da je razpoložljivost nevretenčarjev bistveno večja na travnikih, ki v preteklem letu niso bili košeni v primerjavi s košenimi. Največja je v 2. in 3. letu po opustitvi košnje, potem pa začne upadati. Nepokošeni pasovi oz. parcele služijo za rekolonizacijo travnikov s členonožci (Arbeiter in sod., 2020). To verjetno pomeni tudi, da velike sklenjene, vsako leto košene površine niso v korist niti koscu, saj se zmanjša razpoložljivost hrane.

(c) Izguba kopuč vodi v siromašenje habitata. Dobro razvite kopuče šašev so pomemben ali celo ključen element habitata za nekatere vrste ptic, npr. rdečenogega martinca *Tringa totanus* in grahasto tukulico *Porzana porzana* (Milsom in sod., 2000; Gilbert, 2002). Sestoj z razvitimi kopučami izbira za umeščanje gnezd več vrst rac, npr. mlakarice *Anas platyrhynchos*, rasa žličarica *Anas clypeata* (Thomas 1980), kostanjevka *Aythya nyroca* (BirdLife International 2024a), čopasta črnica *Aythya fuligula* (BirdLife International 2024b). Pri sivki *Aythya ferina* je preživetje legel večje, če so gnezda umeščena v sestoj s kopučami šašev (Folliot in sod., 2017). Na kopuče včasih umesti gnezdo tudi mala tukulica *Zapornia parva* (BirdLife International 2024c). Vpliv krčenja območij s kopučami na populacije vodnih ptic zaenkrat na Cerkniškem jezeru še ni bil raziskan, je pa pričakovan. Videti je, da populacije več tu omenjenih vrst ptic na Cerkniškem jezeru nazadujejo. Gnezditelj rdečenogega martinca, race žličarice, kostanjevke in sivke ni bila potrjena že vrsto let (Jančar, 2025). Glede na izsledke raziskave o razširjenosti kosca na Cerkniškem jezeru ter o uporabnosti kopučastih oz. starih sestojev visokega šašja za omenjene vrste ptic, bi kazalo ohranjanje oz. spodbujati razvoj teh stadijev kravine na območjih pod koto poplav ob vodostaju 300 cm (348,6 m n.m.).

[3] Blata

Na redno košenih parcelah na blatih je vegetacija res zelo nizka in koscem čez dan ne omogoča zadostnega kritja pred plenilci (slika 18).



Slika 18: Prikaz rezultatov popisa strukture vegetacije s kvartilnim diagramom na lokacijah, kjer so bili zabeleženi kosci v popisih v začetku junija 2023 (p1in2) ter v popisih v začetku julija 2023 (p3in4) in na naključno izbranih lokacijah (ctrl). Vrednosti na navpični osi predstavljajo oznake razdelkov na merilni lati, pri katerih je bil z razdalje 1,5 m razdelek zakrit z vegetacijo nad 90 % (približno ustreza višini v decimetrih).

Zato kosci naseljujejo blata le tam, kjer so na voljo otoki ali pasovi dovolj visoke vegetacije, kjer se pojoči kosci počutijo varne, npr.: (i) otoki ali pasovi kravine, ki uspeva na blatih v ulekninah in v depresijah fosilnih strug nekdanjih jezerskih potokov in rek, (ii) parcele, ki v preteklem

letu niso bile pokošene oz. so že več let opuščene, (iii) mejna območja, kjer blata prehajajo v predele s kravino. Tudi Budka in Osiejuk (2013) ugotavljata, da so zaplate visoke vegetacije iz preteklega leta (npr. opuščeni travniki), ključni dejavnik, ki vpliva na verjetnost, da se bo na travniku pojavil koscec.

V tej raziskavi smo pokazali, da delež koscev na blatih Cerkniškega jezera nazaduje. V letih 1999–2016 je bil delež koscev, ki so peli na blatih 31 %, v letih 2017–2023 pa le še 19 %. A pomen blat je za kosce verjetno večji, kot kažejo ti odstotki. Pogled na karte na slikah 9–11 razkriva, da kosci pogosto izbirajo za pevska mesta območja z višjo vegetacijo v bližini blat, predvsem kravine. To kaže na to, da koscem ustreza kombinacija sosednjih zemljišč z nižjo in višjo vegetacijo, pri čemer imajo ena in druga za kosce pomembno funkcijo. Raziskave potrjujejo, da koscem bolj ustrezajo območja s heterogenimi habitati (Dorresteyn in sod., 2015; Arbeiter in sod., 2017b), kar je potrdila tudi naša raziskava. Sliki 8 in 9 kažeta, da je tudi na Cerkniškem jezeru koscev največ tam, kjer je heterogenost habitata največja, to pa je na tistih območjih z blati, kjer so območja posameznih skupin habitatnih tipov najbolj razdrobljena.

Videti je torej, da so blata za kosce na Cerkniškem jezeru poleg kravine najpomembnejši habitat. Žal se kvaliteta tega habitata z leti zmanjšuje zaradi vse obsežnejše košnje. Če so vsi travniki na blatih v prejšnjem letu pokošeni, koscec tu ne najde več kritja, saj je vegetacija prenizka. Poleg tega koscem nasploh manj ustrezajo območja, ki se redno in v celoti kosijo vsako leto. Raje imajo mozaik v prejšnjem letu košenih in nekošenih travnikov, še bolje pa je, če je vmes nekaj travnikov, ki so opuščeni že nekaj let (Berg in Gustafson, 2007; Moga in sod., 2010; Berg in Hiron, 2012). Izstopajoč pomen nekošenih travnikov za kosca potrjuje tudi raziskava Keišs in sod. (2004), ki so ugotovili, da največji in najmočnejši osebk pojejo na travnikih, ki se že nekaj let ne kosijo. To kaže tudi hierarhija med samci, saj najmočnejši osebk zasedejo najboljši habitat, najslabši pa ostane najšibkejšim. V omenjeni raziskavi je povprečna dolžina peruti pri koscih, ujetih v različnih habitatih, naraščala takole: njive > žiti > pašniki > košeni travniki > nekultivirani (naravni) travniki > opuščene njive > opuščeni travniki.

Še eno dejstvo kaže, da blata na Cerkniškem jezeru za kosce postajajo suboptimalen habitat: v popisih v začetku julija 2023, ko se je voda umaknila in so imeli kosci za izbiro pevskega mesta na voljo skoraj celotno jezero, so se pomaknili bolj proti notranjosti jezera, stran od blat.

V območje blat sodita tudi Benetek in Dujce, dve obsežnejši, po nadmorski višini nekoliko dvignjeni območji bazičnih nizkih barij. Tu pojoče kosce beležimo le na robovih območij, v notranjosti pa le izjemoma. Razlog za to je verjetno v dejstvu, so se na obeh območjih zaradi mnogoletne odsotnosti košnje razvile visoke kope modre stožke in šašev. Območji sta zelo močvirni in sta s kmetijsko mehanizacijo dostopni le v zelo sušnih razmerah, kakršne vsako leto niti ne nastopijo. Znano je, da se kosci območjem z razvitimi kopicami izogibajo (Green in sod., 1997).

Delež koscev na blatih skozi desetletja verjetno nekoliko nazaduje tudi zaradi zaraščanja z lesno vegetacijo. Od štirih skupin habitatnih tipov na Cerkniškem jezeru so blata edina, ki se obsežno zarašča z grmišči, ki ponekod že preraščajo v gozd. Okrog 10 % površine blat je strnjeno zaraščeno z grmišči in gozdom, še nadaljnjih 10–20 % pa je v zgodnejših fazah zaraščanja. V zadnjih letih se trend zaraščanja sicer obrača in se vsako leto na nekaj parcelah izkrči lesna vegetacija. Vendar je tu treba poudariti, da je h krčenju grmišč potrebno pristopati previdno in po predhodno pripravljenem načrtu, saj so območja, kjer se prepletajo grmišča in odprte travnate površine, habitat nekaterih habitatnih specialistov, kot je npr. škrlatec *Carpodacus erythrinus* (Kraševac, 2022; Kraševac in sod., 2022), ki v Sloveniji redno gnezdi edinole na Cerkniškem jezeru.

[4] Travniki

Delež pojočih koscev, zabeleženih na travnikih, je v popisih 2017–2023 znašal 13,3 %, kar je le nekoliko več, kot znaša delež površine, ki jo travniki pokrivajo na Cerknškem jezeru (12,1 %).

Delež koscev na travnikih je višji v letih z višjim vodostajem, kar kaže na to, da so travniki z obrobja Cerknškega jezera za kosce manj zanimivi v času, ko je na voljo dovolj drugega habitata v kravini in na blatih. Ob poplavih pa visoke vode kosce potisnejo proti robu jezera, kjer je delež travnikov večji.

Videti je, da kosci za pevska mesta pogosteje izbirajo tiste dele travnikov, ki so bližje blatom. Tudi tu se kaže podoben vzorec kot pri kravini. Koscem ustreza heterogen habitat, kombinacija višje vegetacije na travnikih in nižje na blatih.

Tisti travniki, ki so najbolj na robu presihajočega jezera – takšnih je približno polovica, – sodijo v habitatni tip Srednjeevropski mezotrofni do evtrofni nižinski travniki z visoko pahovko (Stergaršek in sod., 2023). Gre za nekoliko intenzivnejše travnike, ki so občasno gnojeni in so košeni več kot enkrat na leto. Tu se kosec praviloma ne pojavlja, zabeležili smo ga le izjemoma.

Travniki so od vseh štirih skupin habitatnih tipov na Cerknškem jezeru najbolj primerni za pridelavo krme, kmetje jih kosijo bolj zgodaj, nekatere že junija, zato jih le v manjšem obsegu vpisujejo v ukrep VTR. Travniki so edina skupina habitatnih tipov na Cerknškem jezeru, pri kateri je zgodnja košnja ključni problem za preživetje legel oz. uspešnost gnezditve. A ker je delež travnikov v primerjavi z ostalimi skupinami habitatnih tipov majhen, ta problem za kosce na Cerknškem jezeru k sreči ni ključen.

Vpliv košnje na uspešnost gnezditve in preživetje mladičev

Do nedavnega je med ornitologi v Sloveniji veljalo prepričanje, da prezgodnja košnja, ki je ena od ključnih groženj koscem po Sloveniji, na Cerknškem jezeru ni problem (Jančar, 2019). A novejša spoznanja kažejo, da to ni povsem res (Jančar in sod., 2023). Kažejo se predvsem trije problemi:

[1] Zgodnja košnja travnikov na robu jezera ogroža kosce v letih z visokim vodostajem. Cerknško jezero je v splošnem premokro, da bi bila zgodnja košnja sploh mogoča. Poleg tega je veliko zemljišč vpisanih v kmetijsko-okoljski ukrep VTR, ki predpisuje košnjo po 1. avgustu. A za travnike na robu jezera to ne velja. Ti travniki ležijo na nekoliko večji nadmorski višini, zato jih poplave redkeje dosežejo. Poleg tega na mnogih robnih travnikih uspevajo trave, ki so primerne za krmo. Takšnih travnikov kmetje niti ne vpisujejo v VTR, saj jih zaradi potrebe po krmi pokosijo zgodaj, nekatere že v juniju, skoraj vse pa pred koncem julija. Poleg tega jih praviloma kosijo dvakrat letno. Na travnikih na robu jezera ponavadi sicer poje majhen delež koscev, v povprečju okoli 13 %. A v letih z visokim vodostajem se njihov delež poveča, v 2023 npr. je v popisih v začetku junija znašal okoli 20 % (slika 19). Na območjih, kjer smo v začetku junija 2023 zabeležili pojoče kosce (v polmeru 100 m okoli njih), je bilo še pred koncem julija pokošenih že 33,5 % zemljišč. V teh okvirih je bil verjetno tudi delež zaradi prezgodnje košnje uničenih legel (Jančar in sod., 2023).



Slika 19: Rezultati popisa pokošenosti zemljišč konec julija 2023 na območju v polmeru 100 m okrog lokacij, kjer smo popisali pojoče kosce v začetku junija 2023 (levo) in v začetku julija 2023 (desno). Legenda: svetlo zeleno – nepokošena zemljišča; temno zeleno – opuščena zemljišča; rdeče – pokošena zemljišča.

[2] Dvostopenjski VTR, ki dovoljuje košnjo že 10.7., za Cerknishko jezero ni primeren. Za kmetijsko okoljski ukrep »Ptice vlažnih travnikov« VTR je do 2021 veljala splošna prepoved košnje pred 1. avgustom. A z letom 2022 je bila v Sloveniji uvedena sprememba, ki za travnike, kjer ob popisih v začetku junija kosci niso bili zabeleženi, dovoljuje začetek košnje z 10. julijem (Uredba 7211; ZRSVN, 2021). Namen spremembe je bil spodbujanje kmetov k večjemu vpisu in preprečevanje širjenja invazivne zlate rozge, ki se marsikje po Sloveniji razrašča na travnikih, ki so leto za leto košeni zelo pozno. A rezultati popisov v 2023 kažejo, da za Cerknishko jezero tak ukrep ni povsod primeren. Leta 2023 smo na Cerknishkem jezeru prvič izvedli 4 popise koscev, poleg dveh običajnih v začetku junija še dva v začetku julija. Z dodatnima popisoma smo dokazali, da se z napredovanjem gnezdilne sezone in z upadanjem vodostaja kosci pomikajo proti sredini jezera. V popisih v začetku julija je več kot polovica koscev pela na novih travnikih, na takih torej, ki bi jih kmetje v skladu z novimi pravili lahko pokosili že z 10. julijem. To se letos sicer ni zgodilo, saj vremenske razmere košnje niso omogočale. A če bi se košnja izvršila, bi lahko bila zaradi prezgodnje košnje uničena polovica julijskih legel (Jančar in sod., 2023). Podobno se je izkazalo v drugem popisu leta 2019, ki smo ga izvedli po poplavi 21.6., takrat smo na novih lokacijah zabeležili kar 78 koscev (Jančar, 2019), in v drugem popisu leta 2004, ki smo ga izvedli po poplavi okrog 18.6., ko smo na novih lokacijah zabeležili ~38 koscev (Polak in sod., 2004). Dvostopenjski VTR, ki za druga območja v Sloveniji predstavlja pomembno pridobitev, se je torej za večji del Cerknishkega jezera izkazal za neprimerne in ga je treba preoblikovati tako, da bodo upoštevane posebnosti jezera. Smiselno bi ga bilo ohraniti le na travnikih na zunanjem robu jezera.

[3] Načini košnje, ki koscem omogočajo umik pred kosilnico, se na Cerknishkem jezeru izvajajo pomanjkljivo. Še bolj kot datum košnje je za preživetje koščevih mladičev pomembno, da se košnja izvaja na koscu prijazen način. Za zemljišča, vpisana v VTR, je tak način obvezen, kmetje pa lahko izbirajo med tremi možnostmi: (i) košnja od sredine travnika navzven, (ii) košnja od enega roba proti drugemu, ali (iii) košnja s puščanjem nepokošenega rešilnega otoka sredi travnika v širini vsaj 10 m. Raziskave so pokazale, da so se kosilnici sposobni učinkovito umikati že mladi kosci, starejši od dveh dni (Tyler in sod., 1998). A na odprt prostor pokošenega dela trav-

nika se ne upajo umakniti in se potem, ko pribežijo že blizu roba pokošenega travnika, prihulijo k tlom in upajo, da jih kosilnica ne bo našla. Ta strategija sicer pogosto učinkuje pri plenilcih, pri kosilnici pa je pogubna. Raziskava o doslednosti izvajanja predpisane koscu prijazne košnje doslej v Sloveniji še ni bila izvedena nikjer, a lastna opažanja kažejo, da se izvaja zelo pomanjkljivo. Zaradi tega na Cerknškem jezeru pod kosilnicami verjetno konča precej koščevih mladicev. Tej problematiki bo v prihodnje treba posvetiti več pozornosti, predvsem z raziskavami, izobraževanjem in ozaveščanjem. A tudi za zmanjšanje smrtnosti mladih koscev ob košnji bi verjetno največ naredili, če bi zagotovili drugačen način upravljanja: mozaik ne prevelikih parcel, ki bi se izmenično kosile vsako drugo leto.

Zaključek

Cerkniško jezero je za kosce izjemno pomembno območje, ki je po svojih značilnostih in upravljaljski problematiki zelo drugačno od vseh drugih območij s koscem v Sloveniji.

Ta prispevek nam je na osnovi popisov kosca in njegovega habitata v letu 2023, analize v preteklih letih zbranih podatkov in študije literature omogočila, da smo lahko pripravili povsem nov in podroben pregled dejavnikov, ki vplivajo na velikost gnezdeče populacije koscev na Cerknškem jezeru:

Dejavniki s pozitivnim vplivom na število koscev:

- Prisotnost mozaika v preteklem letu košenih in nekošenih travnikov na blatih in verjetno na predelih s kravino.
- Velika heterogenost habitatov.
- Velik lokalni reprodukcijski uspeh v predhodnem letu, ki se ga zagotavlja s pozno košnjo po 1.8. in na koscem prijazen način (košnja s sredine travnika navzven ali pa košnja z rešilnim otokom).
- Številčna populacija kosca v tem delu Evrope.

Dejavniki z negativnim vplivom na število koscev:

- Velik obseg pokošenih travnikov na blatih v predhodnem letu z malo ali nič nepokošenih pasov.
- Velik obseg opuščenih zemljišč z visokimi kopučami na blatih in na predelih s kravino na zunanjem delu jezera.
- Velik obseg dolgotrajno poplavljenih zemljišč v tekoči gnezdilni sezoni na blatih in na predelih s kravino na zunanjem delu jezera.

Dejavniki, ki na število koscev nimajo znatnega vpliva (ne pozitivnega in ne negativnega):

- Košnja trstič.
- Poplavljenost trstič v tekoči gnezdilni sezoni.
- Velik obseg opuščenih območij z visokimi kopučami na predelih s kravino na notranjem delu jezera.
- Poplavljenosti predelov s kravino na notranjem delu jezera v tekoči gnezdilni sezoni.

Pokazalo se je torej, da bo treba pri upravljanju z zemljišči na jezeru marsikaj spremeniti. Na osnovi novih spoznanj bo treba pripraviti podroben načrt upravljanja, ki bo upošteval tudi eko-

loške potrebe drugih vrst in načine ohranjanja habitatnih tipov. Temu pa bo v naslednjem koraku morala slediti nadgradnja, sprememba in prilagoditev kmetijsko okoljskih ukrepov in drugih pravil kmetijske politike, ki lahko vplivajo na upravljanje z mokriščnimi zemljišči na jezeru.

V Notranjskem parku je v teku projekt LIFE »Tršca«, ki je namenjen prav temu. S poglobljenimi strokovnimi analizami različnih strok in z intenzivnim sodelovanjem deležnikov s področja kmetijstva, varstva narave, znanosti in državne uprave bomo identificirali potrebne spremembe ukrepov kmetijske politike in jih ustrezno umestili v pravni sistem kmetijske politike.

Summary

The conservation challenges of the *Crex crex* in Lake Cerknica

The intermittent Lake Cerknica is one of the two best sites in Slovenia for the corncrake *Crex crex*. Regular monitoring of the species has been conducted here since 1992. The population fluctuates significantly, ranging from a minimum of 21 to a maximum of 123 calling males. However, the trend remains uncertain, as the population has been fluctuating around similar values for more than thirty years.

For decades, conservation efforts have been focused on the corncrake at Lake Cerknica, as it is a charismatic and umbrella species for the wet meadow ecosystem. Through several large conservation projects, approximately 500 hectares of corncrake habitat have been purchased primarily for its protection. One of these projects developed a targeted agri-environmental measure, VTR, for corncrake conservation, which was incorporated into the national scheme of Common Agricultural Policy (CAP) measures.

The VTR measure provides financial incentives to farmers to maintain extensive, late-mown (after August 1st) wet meadows without fertilization, which they cut in a corncrake-friendly manner (i.e., not from the outer edges towards the center). Today, more than 800 hectares of land at Lake Cerknica are enrolled in the VTR measure. The Notranjski Regional Park alone mows nearly 300 hectares of wet meadows annually. However, despite these extensive conservation efforts, the corncrake population has not increased.

In this study, we analysed the habitats where calling corncrakes were recorded. Using available detailed habitat mapping of the Lake Cerknica, we prepared a map of four habitat groups that are mown and potentially serve as corncrake habitat: (i) reed beds, covering 431 hectares (17.8% of the intermittent lake's surface), (ii) *kravina* (local name for various types of tall sedge communities) covering 837 hectares (34.5%), (iii) *blata* (local name for wet areas with short vegetation, such as alkaline fens and *Molinia* meadows) covering 608 hectares (25.0%), and (iv) grasslands covering 293 hectares (12.1%).

Corncrakes avoid reed beds, with only 3.4% of calling males recorded there, all near the reed bed edges and never deep inside. The most important habitat group is *kravina*, where 64.0% of all corncrakes were recorded. A pattern emerged showing that corncrakes prefer the edge areas of *kravina* bordering *blata*. In *blata*, 19.1% of corncrakes were recorded, while grasslands accounted for 13.4%. Corncrakes primarily select grasslands as calling sites in years when large parts of the Lake Cerknica are flooded during the breeding season, as these areas are mostly on the outermost edge of the intermittent lake, beyond the reach of regular floods.

Before 2000, mowing at the Lake Cerknica was limited, mainly occurring in the peripheral grasslands and *blata*. With Slovenia's accession to the EU and the availability of CAP payments to farmers, mowing has steadily increased. By 2023, 90% of all mowable land was being cut annually. This widespread mowing has had mixed effects on the corncrake population.

For *kravina*, the impact has been positive. In unmown *kravina* sedges form tall tussocks, which corncrakes avoid. The reintroduction of mowing has eliminated tussocks, making the habitat suitable for corncrakes again. However, annual mowing has negatively affected plant and bird diversity.

For *blata*, the increasing mowing frequency has had a negative impact. Regularly mown *blata* have very short vegetation, offering no cover for the corncrake. As a result, corncrakes are only present in areas where a mosaic of mown and abandoned parcels with taller vegetation still exists – but such areas are shrinking yearly. Annual mowing of *blata* also negatively affects many other plant and animal species.

Mowing of reed beds does not impact the corncrake but has a significant negative effect on bird populations that nest in reeds.

In the future, these new findings should be incorporated into the site's management plan. Mowing in reed beds should be limited or even abandoned in some areas. For *kravina* and *blata*, a mosaic mowing regime every second or even third year would be a more appropriate strategy.

Zahvala

Delo je bilo izvedeno v okviru kohezijskega projekta Kras.Re.Vita in LIFE projekta LIFE22-NAT-SI-LIFE Tršca-101114184, ki sta ju sofinancirala Evropska komisija in Republika Slovenija.

Viri

Arbeiter, S., Roth, T., Helmecke, A., Haferland, H.-J. in Bellebaum, J. 2017a. How to count a vagabond? – Population estimation in the Corncrake *Crex crex*. Vogelwelt, 137, 75–79.

Arbeiter, S., Franke, E., Helmecke, A., in Tanneberger, F. 2017b. Habitat preference of female Corncrakes *Crex crex*: implications for the conservation of breeding sites in a secretive species. Bird Study, 64(2), 255–263.

Arbeiter, S., Flinks, H., Grünwald, J., Tanneberger, F. 2020. Diet of Corncrakes *Crex crex* and Prey Availability in Relation to Meadow Management. Ardea, 108 (1), 55–64. <https://doi.org/10.5253/arde.v108i1.a7>

Berg, Å. in Gustafson, T. 2007. Meadow management and occurrence of corncrake *Crex crex*. Agriculture, Ecosystems in Environment, 120 (2), 139–144.

Berg, Å., Hiron, M. 2012. Occurrence of Corncrakes *Crex crex* in mosaic farmland landscapes in south-central Sweden – effects of habitat and landscape structure. Bird Conservation International, 22 (2), 234–245, Cambridge University Press.

BirdLife International (2024a) Species factsheet: *Aythya nyroca*. Downloaded from <http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/ferruginous-duck-aythya-nyroca> 31.12.2023.

BirdLife International (2024b) Species factsheet: *Aythya fuligula*. Downloaded from <http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/tufted-duck-aythya-fuligula> 31.12.2023.

BirdLife International (2024c): Species factsheet: *Zapornia parva*. Downloaded from <http://datazone.birdlife.org/species/factsheet/little-crake-zapornia-parva> 31.12.2023.

Blažič, B., Denac, K. 2023. Kosec *Crex crex*. V Monitoring populacij izbranih ciljnih vrst ptic na območjih Natura 2000 v letu 2023 in sinteza monitoringa 2021–2023. str. 71–87, Ljubljana, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenija, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano.

Bogaart, P., van der Loo, M., Pannekoek, J. 2020. Package 'rtrim'. Trends and Indices for Monitoring Data, TRIM. Verzija 2.2.1 <https://cran.r-project.org/web/packages/rtrim/rtrim.pdf>

Božič, L. 2005. Populacija kosca *Crex crex* na Ljubljanskem barju upada zaradi zgodnje košnje in uničevanja ekstenzivnih travnikov (The population of Corncrake at Ljubljansko barje (Central Slovenia) is declining due to early mowing and destruction of the extensively farmed meadows). *Acrocephalus*, 26 (124), 3–21.

Budka, M., Osiejuk, T.S. 2013. Habitat preferences of Corncrake (*Crex crex*) males in agricultural meadows. *Agriculture, Ecosystems in Environment*, 171, 33–38

Budka, M., Kokociński, P., Bogawski, P., Nowak, M., Biały, J.T., Machura, M. 2021. Seasonal changes in distribution and abundance of a local Corncrake population. *Journal of Ornithology*, 162 (1), 17–29. <https://doi.org/10.1007/s10336-020-01827-z>

DDA, 2023. Monitoring seltener Brutvögel. Feedback zur Wachtelkönig-Saison 2023. Münster (Dachverband Deutscher Avifaunisten). https://www.dda-web.de/downloads/msb/feedback/2023/MsB_Feedback_Wachtelkoenig_2023.pdf

Denac, K., Basle, T., Blažič, B., Bordjan, D., Božič, L., Denac, D., Kmecl, P., Koce, U., Mihelič, T. 2022. Monitoring populacij izbranih ciljnih vrst ptic na območjih Natura 2000 v letu 2022. 158 str., Poročilo, naročnik: Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Ljubljana, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenija.

Denac, K., Stanič, D., Božič, L., Kmecl, P., Blažič, B., Denac, D., Bordjan, D., Koce, U., Mihelič, T. 2023. Monitoring populacij izbranih ciljnih vrst ptic na območjih Natura 2000 v letu 2023 in sinteza monitoringa 2021–2023. 184 str. Poročilo: Ljubljana (Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenija, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano).

DOPPS, 2007. Vzpostavitev dolgoročnega varstva kosca *Crex crex* v Sloveniji [Establishing Long-Term Protection of *Crex Crex* in Slovenia], LIFE03NAT/SLO/000077 Layman's report. 16 str. Ljubljana, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenia.

Dorresteijn, I., Teixeira, L., von Wehrden, H., Loos, J., Hanspach, J., Stein, J.A.R., Fischer, J. 2015. Impact of land cover homogenization on the Corncrake (*Crex crex*) in traditional farmland. *Landscape Ecology*, 30 (8), 1483–1495. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0203-7>

Folliot, B., Caizergues, A., Barbotin, A., Guillemain, M. 2017. Environmental and individual correlates of common pochard (*Aythya ferina*) nesting success. *European Journal of Wildlife Research*, 63 (4), 69.

Gaberščik, A. 2009. Kartiranje habitatnih tipov na območju Cerkniškega jezera. Končno poročilo. Poročilo projekta LIFE06NAT/SLO/000069, »Presihajoče Cerkniško jezero« št. 02-07, 46 str., Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo.

Gilbert, G. 2002. The status and habitat of Spotted Crakes *Porzana porzana* in Britain in 1999. *Bird Study*, Taylor in Francis, 49 (1), 79–86,

Green, R.E., Rocamora, G., Schäffer, N. 1997. Populations, ecology and threats to the Corncrake *Crex crex* in Europe. *Vogelwelt*, 118, 117–134.

- Jančar, T., Božič, L. 2015. Kosec *Crex crex*. V Denac, K., Mihelič, T., Kmecl, P., Denac, D., Bordjan, D., Figelj, J., Božič, L., Jančar, T. (ur.): Monitoring populacij izbranih vrst ptic - popisi gnezdk 2015 (Population monitoring of the selected bird species - breeding birds surveys 2015), str. 52-87 Ljubljana, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenija, Ministrstvo za kmetijstvo in okolje.
- Jančar, T. 2017. Kosec *Crex crex*. V Denac, K., Kmecl, P., Mihelič, T., Jančar, T., Denac, D. Bordjan, D. (ured.): Monitoring populacij izbranih ciljnih vrst ptic na območjih Natura 2000 v letu 2017. Poročilo. Na-ročnik: Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano, str. 46-63, Ljubljana, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenia.
- Jančar, T. 2019. Kosec *Crex crex*. V Denac, K., Božič, L., Jančar, T., Kmecl, P., Mihelič, T., Denac, D., Bordjan, D., Koče, U. (ur.). Monitoring populacij izbranih ciljnih vrst ptic na območjih Natura 2000 v letu 2019. str. 56-82, Ljubljana, Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenija.
- Jančar, T., Stergaršek, J., Kraševac, R. 2023. Popisi kosca *Crex crex* na Cerkniškem jezeru v letu 2023 in analiza njegovega habitata. Notranjski regijski park, Cerknica. 45 str. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.27742.24648>
- Jančar, T. 2023a. Prispevek k poznavanju obsega Cerkniškega jezera pri različnih vodostajih. 10 str., Notranjski regijski park, Cerknica.. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29036.58247>
- Jogan, N., Kaligarič, M., Leskovicar, I., Seliškar, A. in Dobravec, J. 2004. Habitatni tipi Slovenije HTS 2004: tipologija. 63 str. Ljubljana, Agencija RS za okolje.
- Keišs, O., Granats, J., Mednis, A. 2004. Use of biometrical data for studies Corncrake *Crex crex* population in Latvia. Acta Universitatis Latviensis. Biology, 676, 119–126.
- Kmecl, P., Gamser, M., Ploj, A. in Jančar, T. 2022. The challenges of bird conservation on an intermittent karst lake: the interplay between changing water level and agriculture. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 32 (9), 1544–1556. <https://doi.org/10.1002/aqc.3854>
- Koffijberg, K., Hallmann, C., Keišs, O., Schäffer, N. 2016. Recent population status and trends of Corncrakes *Crex crex* in Europe. Vogelwelt, 136, 75–87.
- Kraševac, R. 2022. Ekološke potrebe škrlatca (*Carpodacus erythrinus*) in prepoznavanje ključnih območij za ohranjanje vrste na Cerkniškem jezeru. 24 str., Notranjski regijski park, Cerknica.
- Kraševac, R., Bordjan, D., Pečar, Ž. 2022. Škrlatec *Carpodacus erythrinus* na Cerkniškem polju: Rezultati popisov v letu 2022. 24 str., Notranjski regijski park, Cerknica.
- Kraševac, R. in Jančar, T. 2023. Popis rabe zemljišč na Cerkniškem jezeru v letu 2021. Notranjski regijski park, Cerknica.
- Kraševac, R. 2024. Analiza vpisa kmetijsko-okoljskih ukrepov na SPA Cerkniško jezero 2006 – 2023. LIFE TRŠČA WP 2.1.i., februar 2024. 30 str., Notranjski regijski park, Cerknica,
- Kus Veenvliet, J. 2002. Izbira habitata travniških ptic pevk na Cerkniškem polju. Diplomsko delo. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Biotehniška fakulteta, Oddelek za biologijo.
- Martinčič, A., Wraber, T., Jogan, N., Podobnik, A., Turk, B., Vreš, B., Ravnik, V., Frajman, B., Strgulc Krajšek, S., Trčak, B., Bačič, T., Fischer, M.A., Eler, K. in Surina, B. 2007. Mala flora Slovenije. Četrta, dopolnjena in spremenjena izdaja. 967 str. Tehniška založba Slovenije, Ljubljana.
- Mihelič, T., Božič, L. in Rubinič, B. 2006. Monitoring populacij izbranih vrst ptic. Rezultati popisov v sezoni 2006. 47 str. Vmesno poročilo. Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, DOPPS, BirdLife Slovenija, Ljubljana, Ministrstvo za okolje in prostor.
- Milsom, T.P., Langton, S.D., Parkin, W.K., Peel, S., Bishop, J.D., Hart, J.D. in Moore, N.P. 2000. Habitat models of bird species' distribution: an aid to the management of coastal grazing marshes. Journal of Applied Ecology, 37(5), 706–727. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2000.00529.x>

MKGP 2022. Strateški načrt skupne kmetijske politike 2023–2027 za Slovenijo. Končna verzija, sprejeta na seji Vlade RS 28.9.2022. 1335 str., Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. https://skp.si/wp-content/uploads/2022/11/SN-SKP_izpis-iz-SFC-7.11.2022.docx

MKGP 2024. Javni pregledovalnik grafičnih podatkov MKGP. – Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano. Dostopano 1.12.2024 na <https://rkg.gov.si/GERK/WebViewer/>

MKGP 2025. Letno poročilo o smotrnosti SN 2023–2027 za leto 2024. 180 str. Ljubljana, Ministrstvo za kmetijstvo, gozdarstvo in prehrano.

Moga, C.I., Hartel, T., Öllerer, K. 2010. Status, microhabitat use and distribution of the corncrake *Crex crex* in a Southern Transylvanian rural landscape, Romania. North-Western Journal of Zoology, 6 (1), 63–70.

NOAGS: Spletni portal Novega ornitološkega atlasa gnezdk Slovence. Društvo za opazovanje in proučevanje ptic Slovenije, BirdLife Slovenije. Retrieved from <http://www.ptice.si/atlas/>.

NRP 2009. Poročilo za širšo javnost, Projekt LIFE 06 NAT/SLO/000069 Presihajoče Cerkniško jezero [Layman's report, Project LIFE 06 NAT/SLO/000069 Intermittent Lake Cerknica]. 11 str., Notranjski regijski park, Cerknica.

NRP 2024. Spletna stran projekta LIFE Tršca. Dostopano 1.12.2024 na <https://www.notranjski-park.si/projekti/life-trsca>

Pleteršnik, M. 1894. Slovensko-nemški slovar. Prvi del A–O, 2. zvezek. 880 str. – Ljubljana (Knezoškofijstvo).

Polak, S., Kebe, L., Koren, B. 2004. Trinajst let popisov kosca *Crex crex* na Cerkniškem jezeru (Slovenija). *Acrocephalus*, 25 (121), 61–72.

Potočnik Buhvald, A., Oštir, K., Kraševac, R., Jančar, T. 2024. Analiza časovnih vrst Sentinel-2 in PlanetScope za detekcijo košenj na presihajočem Cerkniškem jezeru (2017–2023). Digitalne vezi, 155–167. https://doi.org/10.3986/9789610508885_13

Rolletschek, H., Rolletschek, A., Hartendorf, T., Kohl, J.-G. 2000. Physiological consequences of mowing and burning of *Phragmites australis* stands for rhizome ventilation and amino acid metabolism. *Wetlands Ecology and Management*, 8 (6): 425–433.

Sucholas, J., Molnár, Z., Łuczaj, Ł., Poschlod, P. 2022. Local traditional ecological knowledge about hay management practices in wetlands of the Biebrza Valley, Poland. *Journal of Ethnobiology and Ethnomedicine*, 18 (1), 9. <https://doi.org/10.1186/s13002-022-00509-9>

Stergaršek, J., Kraševac, R., Klemenčič, T. in Jančar, T. (2022): Popis fenologije semenjenja izbranih vrst rastlin na Cerkniškem jezeru v 2022. 24 str., Notranjski regijski park, Cerknica.

Stergaršek, J., Kraševac, R., Otopal, J. 2023. Kartiranje habitatnih tipov na Cerkniškem jezeru 2022. v. 3 – Projekt LIFE SEMENA. 15 str., Notranjski regijski park, Cerknica.

Thomas, G.J. 1980. The ecology of breeding waterfowl at the Ouse Washes, England. *Wildfowl*, 31(31), 73–88.

Trontelj, P. 1993. O naravovarstvenem konceptu Cerkniškega jezera s poudarkom na varstvu ptic. *Acrocephalus*, 56 (14), 63–80.

Tyler, G.A., Green, R.E., Casey, C. 1998. Survival and behaviour of Corncrake *Crex crex* chicks during the mowing of agricultural grassland. *Bird Study*, 45 (1), 35–50.

Uredba 7211: Uredba o ukrepih kmetijsko-okoljska-podnebna plačila, ekološko kmetovanje in plačila območjem z naravnimi ali drugimi posebnimi omejitvami iz Programa razvoja podeželja Republike Slovenije za obdobje 2014–2020. Uradni list RS 16/2016 in spremembe. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregled-Predpisa?id=URED7211>

Uredba 8751: Uredba o plačilih za okoljske in podnebne obveznosti, naravne ali druge omejitve ter Natura 2000 iz strateškega načrta skupne kmetijske politike 2023–2027. Uradni list 34/2023 in spremembe. <http://www.pisrs.si/Pis.web/pregledPredpisa?id=URED8751>

Valkama, E., Lyytinen, S., Koricheva, J. 2008. The impact of reed management on wildlife: A meta-analytical review of European studies. *Biological Conservation*, 141 (2), 364–374. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2007.11.006>

White, G., Self, M., Blyth, S. 2014. *Bringing Reedbeds to Life: creating and managing reedbeds for wildlife*. 64 str. Sandy, Bedfordshire, UK, RSPB, The Royal Society for the Protection of Birds.

ZRSVN 2021. *Ohranimo ptice vlažnih travnikov*. 6 str., Zavod RS za varstvo narave, Ljubljana. <https://skp.si/download/zlozenka-ohranimo-ptice-vlaznih-travnikov-habitati-ptic-vlaznih-ekstenzivnih-travnikov>

Vpliv zaledja izbranih pritokov Cerknškega jezera na koncentracijo selena v vodnem jetičniku

Mateja Germ, Aleksandra Golob, Urša Remic, Vekoslava Stibilj

Uvod

Selen (Se) je element, ki ga ljudje in živali nujno potrebujemo za normalen razvoj. Za rastline esencialnost selena še ni dokazana. Znano je, da ima v majhnih koncentracijah pozitiven vpliv na njihovo rast ter poveča njihovo odpornost na strese iz okolja. Vendar ostaja njegova vloga v metabolizmu rastlin nejasna (Skrypnik in sod., 2022). Selen v rastlinah deluje na več načinov. Predvsem vpliva na različne biokemijske in fiziološke lastnosti, deluje tudi kot rastlinski antioksidant in prooksidant ter povečuje odpornost rastlin na različne abiotične stresne dejavnike, vključno s povečano slanostjo, sušo, ekstremno temperaturo in prisotnostjo kovin/metaloidov (Bandeagh in sod., 2023). Selen se lahko kopiči v rastlinah, ki imajo sposobnost privzemanja in nalaganja Se v svojih tkivih. Koncentracija selena v rastlinskih organih je odvisna predvsem od koncentracije Se v tleh in sposobnosti rastlin, da kopičijo Se (Bao in sod., 2023).

Z naraščajočim povpraševanjem po zdravi hrani se povečuje zanimanje za varne in kakovostne živilske izdelke. Se je bistven element v sledovih za zdravje živine in je potreben za številne presnovne procese, kot so antioksidativna obrambna sposobnost ter imunska in reproduktivna funkcija, s čimer učinkovito zmanjšuje tveganje za številne bolezni (Gu in Gao, 2022). Zaradi težav domačih živali z razmnoževanjem, se selen že od leta 1984 dodaja v krmo živalim tudi v Sloveniji. Se pride tako v okolje posredno in neposredno in lahko pomeni obremenitev za območja, kjer je kmetijska dejavnost intenzivna.

Vodni makrofiti imajo v vodnem ekosistemu pomembno vlogo, saj vplivajo tako na kemizem vode, hitrost vodnega toka in na kakovost vode. Iz vode in sedimenta lahko v svojo biomaso vežejo različne snovi in hranila in na ta način prispevajo k samočistilni sposobnosti vodnih teles. Makrofiti s koreninami utrjujejo sediment ter zmanjšujejo erozijo in motnost vode (Madsen in sod., 2001). Vodne rastline imajo različno zmožnost privzema selena iz okolja. Vodni jetičnik (*Veronica anagallis-aquatica* L.) je rastlina z amfibijskim značajem, ki raste tako v vodi kot na kopnem (Zelnik in sod., 2021). Glede na naše preliminarne raziskave ima zmožnost privzema večjih koncentracij Se. V raziskavi smo ugotavljali, ali se vsebnost selena v vodnem jetičniku razlikuje glede na vpliv človeka v zaledju vodotoka ter v katerih organih se kopiči največ Se (slika 1). Vzorčili smo vodo, sediment in vodni jetičnik v treh pritokih Cerknškega jezera, v Cerknščici, Lipsenjščici in Žerovniščici. Koncentracije selena v tkivih vodnega jetičnika so bile različne glede na vzorčno mesto ter na vsebnost selena v sedimentu. Večje koncentracije selena so prisotne na območjih, kjer je v zaledju vpliv človeka večji.

Vodotoki Žerovniščica, Lipsenjščica in Cerknščica, so pomembni pritoki Cerknškega jezera. Vsi vodotoki imajo podobne morfološke in hidrološke značilnosti in spadajo v varovana območja v sklopu mreže Natura 2000. Kmetijska dejavnost, predvsem živinoreja v prispevnem območju, lahko vpliva na povečan vnos in kopičenje Se in drugih elementov v sedimentu in bioti. Raziskave so pokazale, da imajo določeni makrofiti indikatorsko vlogo in lahko odražajo stanje oz. obremenjenost okolja s Se (Mechora in sod., 2014; Golob in sod., 2021; Polechońska in sod., 2022). Odvzemna mesta za naše analize se razlikujejo glede na zaledje. Žerovniščica teče skozi

urbano naselje, obdajajo jo kmetijske površine in kmetije, iz katerih lahko Se doseže vodotok. Tudi na vzorčnem mestu Cerkniščica se v neposredni bližini nahajajo kmetije. V bližini vzorčnega mesta Lipsenj je le stanovanjska hiša, levi in desni breg struge pa obdajajo travniki. Z raziskavo smo želeli preveriti, ali se vzorčna mesta na vseh treh pritokih Cerkniškega jezera razlikujejo po količini Se v vodi, v sedimentu in vodnem jetičniku ter oceniti možnost prekomernega kopičenja Se v Cerkniškem jezeru, zaradi človekove aktivnosti v prispevnem območju.



Slika 1: Vodni jetičnik (*Veronica anagallis-aquatica* L.) v svojem naravnem okolju v pritoku Cerkniškega jezera – Žerovniščici (foto: Alenka Gaberščik).

Selen v okolju

V naravi najdemo 6 izotopov selen (^{74}Se , ^{76}Se , ^{77}Se , ^{78}Se , ^{80}Se in ^{82}Se), najpogosteje pa se pojavlja v sledečih štirih različnih oksidacijskih stanjih: kot selenid (Se^{-2}), elementarni selen (Se^0), selenit (Se^{+4}) in selenat (Se^{+6}) (Patterson in sod., 2010), prav tako pa je vezan v različne organske spojine, kot so npr. selenoproteini oziroma v Se amino kisline (selenocistein in selenometionin). Kemijske oblike selen se med seboj razlikujejo tako po razpoložljivosti, bioakumulaciji, mobilnosti, kot tudi toksičnosti (Rayman, 2012; Fordyce, 2013). Zaradi različne geološke podlage in geokemičnih procesov, je selen neenakomerno razporejen v Zemljini skorji. Na nekaterih predelih so tla bogatejša s selenom kot drugod po svetu. Koncentracija selen v tleh je med 0,01–2,0 mg/kg, s povprečno vrednostjo 0,4 mg/kg (preglednica 1). Na s selenom bogatih območjih, pa lahko koncentracije presegajo 10 mg/kg (Zhu in sod., 2009). Slovenija velja za državo, kjer je vsebnost Se v tleh majhna (0,1–0,7 mg/kg). Kjer prevladujejo kislila tla, je privzem Se v rastline otežen. Selen vstopa v prehranjevalno verigo preko rastlin, zato prihaja ob pomanjkanju Se v tleh tudi do pomanjkanja Se v organizmih, ki so višje v prehranjevalnih verigah. Selen se pogosto uporablja kot dodatek krmnim mešanici za domače živali, s čimer se zmanjšajo negativni vplivi na zdravje in reprodukcijo zaradi njegovega pomanjkanja. Selen vstopa v vodno okolje kot posledica različnih antropogenih dejavnosti, vključno s kmetijstvom (Zhu in sod., 2009), kar lahko privede do onesnaženosti okolja s selenom. Selen pred-

stavlja enega glavnih onesnaževalcev vodnih ekosistemov, takoj za živim srebrom (Hg) (Hu in sod., 2009; Patterson in sod., 2010). Koncentracije Se v vodi so v splošnem izredno majhne ($< 0,2 \mu\text{g/L}$), zato sama voda organizmom ne predstavlja nevarnosti (Fordyce, 2013). Prostoživeče živali in ljudje so izpostavljeni bioakumulaciji Se, če so njegove koncentracije v vodi povečane, saj lahko preko prehranjevalne verige doseže velike koncentracije (Lemly, 2004).

Preglednica 1: Vsebnost Se v tleh v nekaterih državah.

Država	Vsebnost Se v tleh (mg/kg)	Država	Vsebnost Se v tleh (mg/kg)
Finska ¹	0,21	ZDA ¹	0,50
Švedska ¹	0,23	Slovaška ¹	0,10
Litva ¹	0,14	Poljska ¹	0,14
Rusija ¹	0,18	Slovenija ²	0,1–0,7
Japonska ¹	$<0,2\text{--}3$		
Belgija ³	0,33	Španija (Murcia) ³	0,43
Japonska ³	0,51	ZDA (Kalifornija) ³	0,058
Japonska ³	0,50	ZDA (Florida) ³	0,25
Kitajska (Guangdong Provinca) ³	0,23	Brazilija (Sao Paulo) ³	0,19
Škotska ³	0,43	Brazilija (Jequitinhonha Valley) ³	1,09

¹ Kabata–Pendias, 2010; ² Pirc in Šajn, 1997; ³ Lopes in sod., 2017

Zaradi pomanjkanja Se v prehrani živine, so se v 50–ih letih prejšnjega stoletja v mnogih evropskih državah začele pojavljati številne bolezni in težave z reprodukcijo, zato so v krmo živali začeli dodajati Se (Reilly, 1996). Selen se nato, zaradi nepopolne absorpcije v organizmu živali, izloča v okolje preko izločkov in iztrebkov, v obliki gnojevke, gnoja ali izcednih vod (Mechora in sod., 2014). Po drugi strani pa lahko prekomerno uživanje krme z veliko vsebnostjo Se, vodi v selenozo ali zastrupitev s selenom. Evropska zakonodaja (Council Directive 2004/C 50/01, 2004) in slovenska priporočila (KGZS, 2007) dovoljujeta dodatek 0,5 mg Se na 1 kg živalske krme.

Makrofiti in njihova zmožnost privzema selena

Peřechaty in sod. (2003) poročajo, da je učinek vegetacije na koncentracijo Se v jezerski vodi majhen in privzem Se s strani makrofitov zanemarljiv. Po drugi strani pa Miranda in sod. (2014) poročajo o uspešnem privzemu Se. Tri pogosto prisotne avstralske vodne rastline *Landoltia punctata* (G. Mey.) Les in D.J. Crawford, *Elodea canadensis* Rich. in *Marsilea quadrifolia* L., so testirali glede na njihove sposobnosti čiščenja s selenom bogate rudarske odpadne vode. Rezultati so pokazali, da so lahko te rastline učinkovite pri biofiltraciji selena in težkih kovin iz rudarske odpadne vode, ki jih kopičijo v svoji hitro rastoči biomasi.

Carvalho in Martin (2001) so proučevali štiri vodne vrste *Typha domingensis* Pers., *Lemna obscura* (Austin) Daubs, *Hydrilla verticillata* (L. f.) Royle in *Crinum americanum* L. kot potencialne fitoremediatorje Se v vodah. Selen je bil prisoten v koncentracijah 0–100 ppm Se. Pri koncentra-

cijah selena 100 ppm ali manj, je bila dosežena dobra ali zelo dobra odstranitev Se (65 do 100 %), odvisno od vrste rastline. V obdobju enega tedna je vrsta *Hydrilla verticillata* zelo učinkovito odstranila selen, sveža in suha masa rastline pa sta se povečali. Druge rastline so bile manj učinkovite pri odstranjevanju selena, ali pa je nanje dodani selen vplival bolj škodljivo.

Mechora in sod. (2013) so proučevali privzem Se(IV) pri pogostih vodnih rastlinah v slovenskih vodnih telesih: klasastem rmancu *Myriophyllum spicatum* L., navadnem rogolistu *Ceratophyllum demersum* L. in preraslolistnem dristavcu *Potamogeton perfoliatus* L. ter učinke selenita (Se(IV)) na njihove fiziološke in biokemijske značilnosti. Rastline so bile gojene na prostem v delno nadzorovanih razmerah v vodni raztopini, ki je vsebovala Na selenit. Učinkovitost privzema Se je bila velika za vse tri vrste makrofitov.

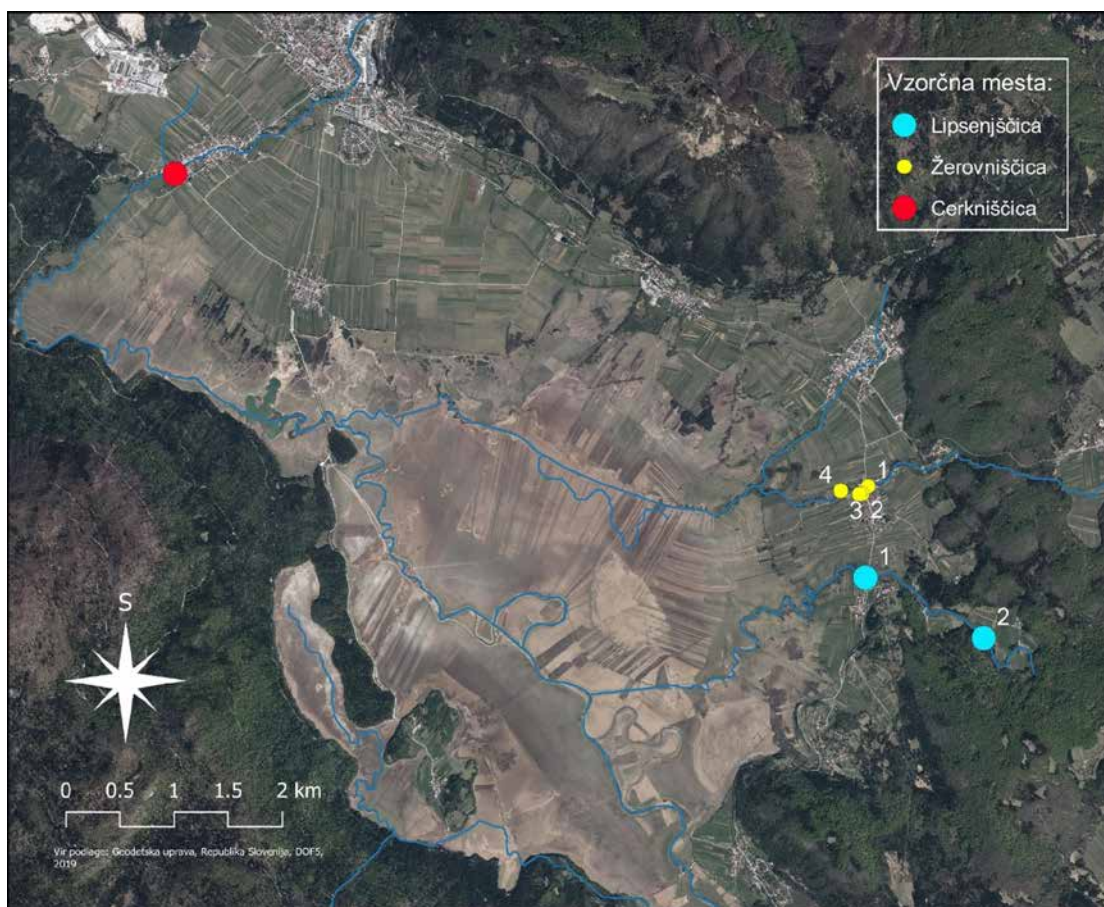
Zmožnost vodnega jetičnika za kopičenje Se

Cerkniščica, Lipsenjščica in Žerovniščica so pritoki Cerkniškega jezera, ki imajo podobne morfološke lastnosti, zato smo ugotavljali prisotnost selena v sedimentu, vodi in rastlinah. Na vseh vzorčnih mestih (slika 2) smo merili tudi splošne fizikalne in kemijske parametre, ki so navedeni v preglednici 2.

Določali smo tudi koncentracijo Se v sedimentu. Iz preglednice 4 je razvidno, da nobeno vzorčno mesto ni preseglo vrednosti naravnega ozadja za Se v sedimentu površinskih voda, ki je med 0,2 in 2,0 µg Se/g SM sedimenta (Babbitt, 1998). Preliminarni izsledki kažejo, da ima vodni jetičnik sposobnost za privzem selena iz sedimenta in vode. Izmerjene povprečne vrednosti Se v vodi so zelo majhne (preglednica 3) in ne presegajo vrednosti 0,6 µg Se/L, kar pomeni, da bi jih glede na obremenjenost s Se uvrstili v razred z zelo dobrim ekološkim stanjem. Mejne vrednost za Se v vodotokih, ki je 10 µg Se/L (Uradni List, 2004), v vodi iz proučevanih rek niso bile presežene. Koncentracije Se so bistveno večje v različnih obremenjenih vodotokih po svetu. V reki Wanshan na Kitajskem, ki je zaradi rudarstva obremenjena, so izmerili povprečno koncentracijo Se 3,8 µg Se/L; v nekaterih predelih je namreč vrednost dosegla kar 30 µg Se/L. V reki Enshi, kjer je v zaledju antropogen vpliv ogromen, pa povprečna vrednost Se dosega koncentracijo kar 32,6 µg Se/L (Zhang in sod., 2014).

Preglednica 2: Izmerjeni fizikalni in kemijski parametri vode ob julijskem in septembrskem vzorčenju.

Vzorčno mesto	T vode (°C)		pH		Nasičenost vode z O ₂ (%)		Koncentracija O ₂ (mg/L)		Spec. električna prevodnost (µS/cm)	
	julij	sept.	julij	sept.	julij	sept.	julij	sept.	julij	sept.
Cerkniščica	18,6	18,7	6,8	6,8	65	72	6,0	6,7	473	452
Lipsenj 1	15,7	19,3	6,9	6,6	99	96	9,8	8,9	472	482
Lipsenj 2	/	16,7	/	7,2	/	111	/	10,7	/	400
Žerovniščica 1	13,6	12,4	7,3	7,0	128	109	13,5	11,6	510	500
Žerovniščica 2	15,3	14,1	7,4	7,4	134	124	13,5	12,4	502	490
Žerovniščica 3	15,5	13,6	7,7	7,7	137	119	13,8	12,4	504	477
Žerovniščica 4	16,5	14,5	7,5	7,9	137	118	13,1	12,1	502	499



Slika 2: Vzorčna mesta na Cerkniščici, Lipsenjščici in Žerovniščici (M. Holcar).

Preglednica 3: Izmerjena vsebnost Se ($\mu\text{g/L}$) v vzorcih vode.

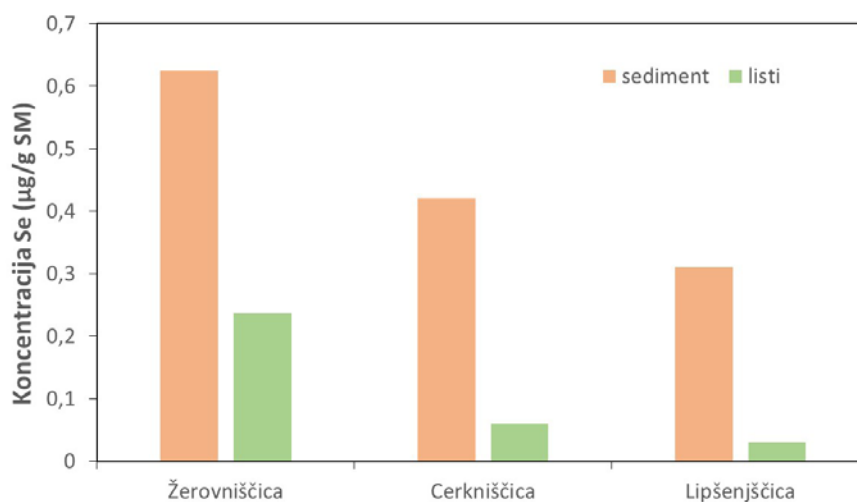
Vzorčno mesto	Se ($\mu\text{g/L}$) julij	Se ($\mu\text{g/L}$) september
Cerkniščica	0,06	0,08
Lipsenj 1	0,07	0,08
Lipsenj 2	/	0,07
Žerovniščica 1	0,09	0,09
Žerovniščica 2	0,07	0,09
Žerovniščica 3	0,14	0,09
Žerovniščica 4	0,08	0,07

Nekoliko večje vrednosti Se v vzorcih sedimenta iz Žerovniščice so bile pričakovane, saj vodotok teče skozi urbano naselje, obdajajo ga kmetijske površine in kmetije, iz katerih se Se lahko skupaj z odpadnimi vodami in živalskimi iztrebki izliva v vodotok. Večje vsebnosti Se glede na zaledje smo pričakovali tako v sedimentu kot v rastlinah na vzorčnem mestu Cerkniščica. Manjše koncentracije Se so bile pričakovane na območju Lipsenj 2, saj v bližini vzorčnega mesta ni naselja in kmetijskih površin, pač pa zaledje predstavlja mešani gozd in naravni travniki.

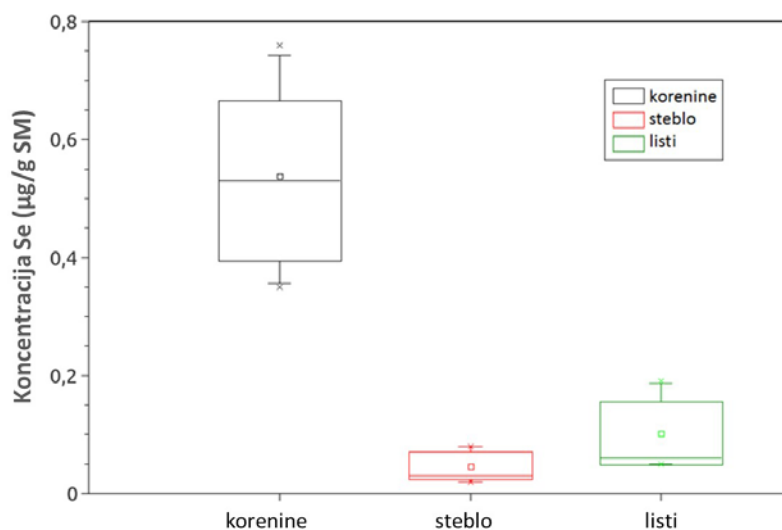
Preglednica 4: Izmerjena vsebnost Se ($\mu\text{g/g}$) v sedimentih in delež delcev sedimenta < 1mm.

Vzorčno mesto	Se ($\mu\text{g/g}$)	Delež delcev sedimenta < 1mm (%)
Cerkniščica	0,42	15,95
Lipsenj 1	0,31	17,57
Lipsenj 2	0,49	45,06
Žerovniščica 1	0,55	16,46
Žerovniščica 2	0,69	11,95
Žerovniščica 3	0,68	29,84
Žerovniščica 4	0,58	20,74

Selen je element, ki ga v Sloveniji v tleh primanjkuje. Ker ima pozitivne lastnosti za zdravje živali, se ga dodaja v krmo in tudi v gnojila. V velikih koncentracijah lahko negativno deluje na organizme. V vodnih okoljih se lahko bioakumulira in predstavlja grožnjo vodnim organizmom. Rezultati kažejo, da zaledje, kjer je prisotna kmetijska dejavnost, vpliva na povečane vsebnosti selena v vodnem jetičniku. Vsebnosti Se v rastlinah iz vzorčnih mest na Cerkniščici, Žerovniščici in Lipsenjščici, se razlikujejo. Vsi trije vodotoki so pritoki Cerkniškega jezera in imajo podobno matično podlago, kar nakazuje na to, da se vsebnost Se v vodnem jetičniku razlikuje zaradi različne uporabe zemljišč v zaledju omenjenih vodotokov (slika 3).

Slika 3: Vsebnost Se ($\mu\text{g/g}$) v vodnem jetičniku v izbranih vodotokih.

Rastline iz Lipsenjščice vsebujejo najmanj Se v primerjavi z rastlinami iz Žerovniščice in Cerkniščice. Območje vzorčnega mesta Cerkniščice v Dolenji vasi obdaja kmetija, struga vodotoka je močno regulirana, medtem ko vzorčno mesto na Lipsenjščici obdajajo le travniki in stanovanjska hiša. Zaledje vzorčnih mest ob Žerovniščici, predstavljajo naselje, kmetije, kjer gojijo domače živali ter travniki. Največ selena v vodnem jetičniku smo izmerili v koreninah, v steblih in listih pa bistveno manj (slika 4).



Slika 4: Vsebnost Se ($\mu\text{g/g}$) v posameznih rastlinskih delih, neodvisno od vzorčnega mesta v vzorčenju.

V raziskavi so Tan in sod. (2018) proučevali, ali je za rast invazivne vrste *Myriophyllum aquaticum* (Vell.) Verd. bolj pomembna voda ali sediment. Ugotovili, so, da vrsta *M. aquaticum* privzema hranila predvsem iz sedimenta. Velika koncentracija Se v koreninah v primerjavi z ostalimi rastlinskimi organi potrjuje, da vodni jetičnik večino Se prevzame preko korenin iz sedimenta, nato pa se po ksilemu prenese v ostale rastlinske organe. Po drugi strani pa je bilo za štiri submerzne vrste makrofitov, *Elodea canadensis*, *Callitriche cophocarpa* Sendtn., *Ranunculus aquatilis* L. in *Potamogeton crispus* L., ugotovljeno, da lahko zadovoljijo svoje potrebe po mineralnih hranilih samo z vnosom hranil preko listne površine (Madsen in Cedergreen, 2002), kar kaže na to, da tudi vnosa Se preko listne površine ne moremo izključiti.

Zaključek

Vsebnost selena v vodi in sedimentih v Žerovniščici, Cerkniščici in Lipsenjščici, je bila majhna. Vsebnosti Se v makrofitih so se sicer razlikovale glede na značilnosti zaledja, vendar za ekosistem Cerkniškega jezera ne predstavljajo nevarnosti.

Summary

Influence of the watershed of selected tributaries of Lake Cerknica on the selenium content in *Veronica anagallis-aquatica*

Selenium (Se) is an element that humans and animals need for normal development. The essentiality of selenium has not yet been proven for plants, but in low concentrations it has a positive effect on their growth and increases their resistance to environmental stress. However, its role in plant metabolism remains unclear. Selenium acts in plants in several ways, mainly affecting various biochemical and physiological properties. Selenium also acts as a plant antioxidant and prooxidant and enhances plant resistance to abiotic factors, including salinity, drought, extreme temperature, and metals/metalloids. Selenium can accumulate in plants that can take up and store Se in their tissues. The concentration of selenium in crops depends mainly on the concentration of Se in the soil and the ability of plants to accumulate Se.

Macrophytes play an important role in the aquatic ecosystem, as they influence both water chemistry, water flow velocity and water quality. They can take up various substances and nutrients from water and sediment to their biomass and in this way contribute to the self-purification ability of water bodies. Macrophytes with roots stabilize the sediment and reduce erosion and water turbidity. Aquatic plants can take up selenium from the environment in different ways. *Veronica anagallis-aquatica* is a plant with an amphibious character that grows both in water and on land. According to our preliminary research, it can absorb higher concentrations of selenium. In our research, we determined whether the content of selenium in *Veronica anagallis-aquatica* differs depending on the influence of humans in the hinterland of the watercourse. We sampled water, sediment, and the plant species in three tributaries of Lake Cerknica, in Cerkniščica, Lipsenjščica and Žerovniščica. The content of selenium in water, sediment and selected plant species was determined by the ICP-MS method. Selenium concentrations in the *Veronica anagallis-aquatica* were different depending on the sample site and the selenium content in the sediment. Higher concentrations of selenium are present in areas where human influence is more pronounced in the catchment. The content of selenium in water and sediment samples from Žerovniščica, Cerkniščica and Lipsenjščica Rivers was low. Se contents in macrophytes differed depending on the type of catchment, but they do not pose a threat to the ecosystem of Lake Cerknica.

Zahvala

Raziskave je finančno podprla Javna agencija za raziskovalno dejavnost Republike Slovenije preko programa Biologija rastlin P1-0212 in Commission of the European Communities« preko projektov LifeWatch in eLTER.

Viri

Babbitt, B. 1998. Guidelines for interpretation of the biological effects of selected constituents in biota, water, and sediment. United States Department of the Interior, 3, 139–184.

Bandehagh, A., Dehghanian, Z., Gougerdchi, V., Anwar Hossain, M. 2023. Selenium: a game changer in plant development, growth, and stress tolerance, via the modulation in gene expression and secondary metabolite biosynthesis. *Phyton*, 0(0), 1–24. <https://doi.org/10.32604/PHYTON.2023.028586>

Bao, K., Wang, Y., Du, X., Wuriyanghan, H., Wang, X., Xie, J., Zhao, X., Jia, W. 2023. Comparison of selenium accumulation in edible parts of wheat and broad bean. *Agronomy*, 13(7), 1–13. <https://doi.org/10.3390/agronomy13071939>

Carvalho, K. M., Martin, D. F. 2001. Removal of aqueous selenium by four aquatic plants. *Journal Of Aquatic Plant Management*, 39, 33–36.

Council Directive 2004/C 50/01. 2004. Council Directive 70/524EEC concerning additives in feedingstuffs. [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52004XC0225\(03\)](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52004XC0225(03))

Fordyce, F. M. 2013. Selenium deficiency and toxicity in the environment. *Essentials of Medical Geology: Revised Edition*, 375–416. https://doi.org/10.1007/978-94-007-4375-5_16

Golob, A., Vogel-Mikuš, K., Brudar, N., Germ, M. 2021. Duckweed (*Lemna minor* L.) successfully accumulates selenium from selenium-impacted water. *Sustainability*, 13(23), 13423. <https://doi.org/10.3390/su132313423>

Gu, X., Gao, C. 2022. New horizons for selenium in animal nutrition and functional foods. *Animal Nutrition*, 11, 80–86. <https://doi.org/10.1016/j.aninu.2022.06.013>

- Hu, X., Wang, F., Hanson, M. L. 2009. Selenium concentration, speciation and behavior in surface waters of the Canadian prairies. *Science of The Total Environment*, 407(22), 5869–5876. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.08.001>
- Kabata-Pendias, A. 2010. Trace elements in soils and plants. Boca Raton. CRC Press. 548 str. <https://doi.org/10.1201/b10158>
- KGZS 2007. Smernice dobre prakse v primarni pridelavi hrane in krme.
- Lemly, A. D. 2004. Aquatic selenium pollution is a global environmental safety issue. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 59(1), 44–56. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(03\)00095-2](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(03)00095-2)
- Lopes, G., Ávila, F. W., Guilherme, L. R. G. 2017. Comportamento de selênio no solo e sua implicação para a saúde humana. *Ciencia e Agrotecnologia*, 41(6), 605–615. <https://doi.org/10.1590/1413-70542017416000517>
- Madsen, J. D., Chambers, P. A., James, W. F., Koch, E. W., Westlake, D. F. 2001. The interaction between water movement, sediment dynamics and submersed macrophytes. *Hydrobiologia*, 444, 71–84. <https://doi.org/10.1023/A:1017520800568>
- Madsen, T. V., Cedergreen, N. 2002. Sources of nutrients to rooted submerged macrophytes growing in a nutrient-rich stream. *Freshwater Biology*, 47(2), 283–291. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00802.x>
- Mechora, Š., Germ, M., Stibilj, V. 2014. Monitoring of selenium in macrophytes - The case of Slovenia. *Chemosphere*, 111, 464–470. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.133>
- Mechora, Š., Stibilj, V., Germ, M. 2013. The uptake and distribution of selenium in three aquatic plants grown in Se(IV) solution. *Aquatic Toxicology*, 128–129, 53–59. <https://doi.org/10.1016/j.aqua-tox.2012.11.021>
- Miranda, A. F., Muradov, N., Gujar, A., Stevenson, T., Nuggeoda, D., Ball, A. S., Aidyn, M. 2014. Application of aquatic plants for the treatment of selenium-rich mining wastewater and production of renewable fuels and petrochemicals. *Journal of Sustainable Bioenergy Systems*, 4(1). <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4236/jsbs.2014.41010>
- Patterson, M. M., Paige, G. B., Reddy, K. J. 2010. Selenium in surface and irrigation water in the Kendrick irrigation district, Wyoming. *Environmental Monitoring and Assessment*, 171(1–4), 267–280. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-1277-y>
- Pełechaty, M., Pełechata, A., Niedzielski, P., Siepak, M., Sobczyński, T. 2003. Analysis of the spatial and seasonal variability of inorganic species of arsenic, antimony and selenium in a shallow lake subjected to moderate anthropopressure. *Polish Journal of Environmental Studies*, 13(2), 185–190.
- Pirc, S., Šajn, R. 1997. Vloga geokemije v ugotavljanju kemične obremenitve okolja. Projekt evropskega leta varstva narave 1995. Kemizacija okolja in življenja. Do katere meje?
- Polechońska, L., Klink, A., Golob, A., Germ, M. 2022. Evaluation of *Nuphar lutea* as bioindicator of metal pollution in freshwater ecosystems. *Ecological Indicators*, 136. <https://doi.org/10.1016/J.ECO-LIND.2022.108633>
- Rayman, M. P. 2012. Selenium and human health. *The Lancet*, 379(9822), 1256–1268. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(11\)61452-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(11)61452-9)
- Reilly, C. 1996. Selenium in Food and Health (1st ed.). Springer New York LLC. 338 str.
- Skrypnik, L., Feduraev, P., Golovin, A., Maslennikov, P., Styran, T., Antipina, M., Riabova, A., Katserov, D. 2022. The integral boosting effect of selenium on the secondary metabolism of higher plants. *Plants*, 11(24), 3432. <https://doi.org/10.3390/plants11243432>
- Tan, B., He, H., Gu, J., Li, K. 2018. Eutrophic water or fertile sediment: which is more important for the growth of invasive aquatic macrophyte *Myriophyllum aquaticum*? *Knowledge in Management of Aquatic*

Ecosystems, 419, 3. <https://doi.org/10.1051/kmae/2017057>

Uradni List 2004. Uradni list Republike Slovenije, 865. Pravilnik o pitni vodi, stran 2155.

Zelnik, I., Kuhar, U., Holcar, M., Germ, M., Gaberščik, A. 2021. Distribution of vascular plant communities in Slovenian watercourses. *Water (Switzerland)*, 13(8). <https://doi.org/10.3390/w13081071>

Zhang, H., Feng, X., Larssen, T. 2014. Selenium speciation, distribution, and transport in a river catchment affected by mercury mining and smelting in Wanshan, China. *Applied Geochemistry*, 40, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.10.016>

Zhu, Y. G., Pilon-Smits, E. A. H., Zhao, F. J., Williams, P. N., Meharg, A. A. 2009. Selenium in higher plants: understanding mechanisms for biofortification and phytoremediation. *Trends in Plant Science*, 14(8), 436–442. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2009.06.006>

Viri poimenovanja organizmov

Organizmi so poimenovani po spodaj navedenih virih. Pri poglavjih, ki podajajo izsledke o posamezni taksonomski skupini (npr. divje čebele) so viri navedeni neposredno v poglavju.

Znanstveno poimenovanje mikroorganizmov je povzeto po NCBI Taxonomy: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/taxonomy>

Znanstveno poimenovanje semenk je povzeto po Mali flori Slovenije:

Martinčič, A., Wraber, T., Jogan, N., Ravnik, V., Podobnik, A., Turk, B., Vreš, B., Frajman, B., Strgulc-Krajšek, S., Trčak, B., Bačič, T., Fischer, M. A., Eler, K., Surina, B. 2007. Mala flora Slovenije. Ljubljana. Tehniška založba Slovenije, 967 str.

Znanstveno poimenovanje živali je povzeto po Določevalnemu ključu vretenčarjev Slovenije:

Kryštufek, B., Janžekovič, F. 1999. Ključ za določanje vretenčarjev Slovenije. 1. izd. DZS, Ljubljana. 544 str.

Mnenja strokovnjakov

Prof. em. dr. Franc Batič

Botanik in rastlinski ekolog

Monografija znanstveno, sistematično, izčrpno in vseobsegajoče obravnava različne vidike Cerkniškega jezera, ki so bili predmet raziskav v obdobju od leta 2002 pa do danes. Obravnava vključuje analizo znanstvene literature o vseh vidikih obravnavanega ekosistema, kar je s pomočjo lastnih raziskovalnih izsledkov in izkušenj vodilo do novih izvirnih spoznanj. Monografija dopolnjuje vedenje tem edinstvenem ekosistemu v Sloveniji in širše v Evropi, ki ga pogojuje presihajoča narava voda in izjemna biotska raznovrstnost, kar je posledica geološke zgradbe, specifičnih hidrometeoroloških razmer in posebne rabe prostora. V monografiji je analizirana sezonska dinamika in dolgoročne težnje kazalnikov podnebja v zaledju Cerkniškega polja, ki kaže porast temperature v spomladanskih in poletnih mesecih in potencialne evapotranspiracije, povečano pogostost let z zelo malo ali veliko padavinami in manjše število dni s snegom od leta 2000 dalje. Vse to se odraža v daljšem trajanju in večjem obsegu poplav ter daljšem trajanju sušnih obdobj. Cerkniško jezero je robusten ekosistem, ki je izpostavljen pogostim motnjam, ki nastanejo zaradi sprememb vodostaja, katerim so tamkajšnji organizmi dobro prilagojeni. Raziskave so pokazale močan vpliv vodostaja na zastopanost rastlinskih vrst in ekosistemske procese. Ugotovljeni so bili tudi vplivi na višje trofične ravni organizmov. Analizirane so bile amfibijske rastlinske vrste, ki so najuspešnejša rastlinska skupina Cerkniškega jezera in navadni trst, prevladujoča rastlinska vrsta Cerkniškega jezera ter čebele, ki so na območju jezera vrstno zelo pestre. Podrobneje so bili proučeni procesi kot so primarna proizvodnja, razgradnja opada, glivna in mikrobna kolonizacija korenin rastlin, ki so prav tako odvisni od spreminjajočega se vodostaja na jezeru. Raziskave vpliva košnje na trstišča Cerkniškega jezera so pokazale, da je košnja pomemben dejavnik, ki vpliva na vitalnost trstišč. V monografiji so prikazane tudi dejavnosti v okviru uvedbe kmetijsko okoljskih ukrepov (KOPOP), kar je prispevalo pomembna spoznanja za ohranjanje tega ekosistema.

Monografijo v vseh pogledih ocenjujem pozitivno. Predstavlja zelo obsežno, izvirno, z raziskovalnimi podatki podprto delo, katerega namen je izboljšati poznavanje zgradbe (vrst, združb) in razumevanje delovanja tega edinstvenega ekosistema z vidika okoljskih sprememb, med katerimi so odločilne spremembe vodostaja. Podatki raziskav, zbrani v tej monografiji, bodo izboljšali odnos širše in strokovne javnosti do tega ekosistema, kar bo izboljšalo osnovo za gospodarjenje. Strokovni izrazi v monografiji so usklajeni z obstoječo terminologijo, monografija je tudi slogovno in didaktično primerno sestavljena.

Prof. dr. Andraž Čarni, zunanji član Makedonske akademije znanosti in umetnosti

Fitocenolog

Pred nami je znanstvena monografija o Cerkniškem jezeru z naslovom Presihajoče jezero. Uredila jo je Alenka Gaberščik, ugledna univerzitetna profesorica za ekologijo rastlin. Na podlagi lastnega raziskovalnega dela in v sodelovanju s številnimi raziskovalci, ki se ukvarjajo z različnimi vidiki raziskav, je pripravila smiselno celoto, ki nam ponuja celovit pregled ekoloških razmer tega bisera naravne dediščine.

Monografija prinaša nova spoznanja o tem naravnem fenomenu, kjer dinamika vode ustvarja posebne oblike življenja. Cerkniško jezero je presihajoče jezero, ki je nastalo na kraškem polju. Večinoma se napolni jeseni in spomladi, nato pa se postopoma izprazni proti koncu pomladi. Jezero je eno večjih te vrste v Evropi in ga uvrščamo med mokrišča, ki so na seznamu Ramsarskih lokacij. Izmenjava kopne in vodne faze omogoča nastanek posebnih kompleksnih ekosistemov, ki jih odlikujeta velika ekološka in biotska pestrost, kar je celostno predstavljeno v pričujoči monografiji.

V uvodnem delu so predstavljene splošne značilnosti Cerkniškega jezera ter njegove hidrološke značilnosti in ekosistemi, ki se pojavljajo na tem območju. V nadaljevanju se monografija osredotoča na posamezne elemente, ki gradijo te značilne ekosisteme, kot so amfibijske rastlinske vrste, trst, divje čebele ter vpliv selena na vodni jetičnik. Predstavljeni so tudi procesi, kot so primarna proizvodnja rastlin, glivna kolonizacija korenin, razgradnja rastlinskega opada ter mikrobne združbe, ki se na njem razvijajo. Monografijo zaključujejo poglavja o vplivih košnje na habitate in njihovem upravljanju.

Monografija ponuja sintezni pregled ekosistemov tega zavarovanega območja, ki ga celostno obravnava. Čeprav so bili nekateri rezultati že objavljeni v različnih mednarodnih publikacijah, so tukaj zbrani in predstavljeni v slovenskem jeziku, kar pomembno prispeva tudi k razvoju slovenskega strokovnega izrazoslovja. Monografija bo zanimiva za širok krog strokovnjakov z različnih področij, raziskovalce, študente ter širšo zainteresirano javnost.

Izr. prof. dr. Valentina Brečko Grubar

Geografinja

Prva tri poglavja obravnavajo geografske in krasoslovne lastnosti Cerkniškega polja. Avtorica Nataša Ravbar v uvodnem poglavju »Pomen in krasoslovne značilnosti Cerkniškega polja« s povzemanjem ugotovitev številnih avtorjev predstavi geološke, reliefne, podnebne in hidrološke lastnosti Cerkniškega polja, izpostavi njegovo izjemno raznovrstnost življenja in pomen varovanja. Poudari edinstvenost območja v svetovnem merilu, kar kažejo že zelo zgodnji opisi »fenomena Cerkniškega jezera«. Cerkniško polje je bilo območje prvih krasoslovnih raziskav, iz katerih izhajajo tudi opisi kraških pojavov in procesov, velik raziskovalni izziv pa predstavlja tudi v sodobnosti. Raziskovalno zahtevno je zlasti njegovo poplavljanje oz. spreminjanje v jezero ter presihanje, kar je vsebina drugega in tretjega poglavja, katerih avtorji so Matej Blatnik, Nataša Ravbar, Metka Petrič, Franci Gabrovšek z Inštituta za raziskovanje krasa ZRC SAZU ter Peter Frantar, Mišo Andjelov in Florjana Ulaga z Agencije Republike Slovenije za okolje. V poglavju »Podnebje v zaledju Cerkniškega polja – splošne značilnosti, trendi in pričakovana dinamika v prihodnosti« se avtorji posvetijo podrobni analizi klimatoloških podatkov, ki jih zbirajo meteorološke postaje na širšem območju Cerkniškega polja. Višine padavin in njihova razporeditev tekom leta, trajanje snežne odeje ter temperature, ki vplivajo na izhlapevanje, namreč pogojujejo hidrološke razmere. S spreminjanjem lastnosti podnebnih elementov se spreminja pojavljanje ojezeritve, obseg in njegovo trajanje. Z uporabo modela mGROWA so ocenili površinski in podzemni odtok ter dejansko evapotranspiracijo. V preteklosti tako celovita analiza vpliva podnebnih razmer ni bila izdelana, predvsem pa niso bili raziskani trendi sprememb. S primerjavo lastnosti klimatoloških spremenljivk za obdobja 1961–1990 in 1991–2020 so ugoto-

vili opazen porast temperatur in s tem povečanje izgube padavin z izhlapevanjem ter opazno manj snežnih padavin oz. krajše trajanje snežne odeje. Pri padavinah trend ni bil značilen, za prvo obdobje je bilo opazno zmanjševanje, za drugo pa je bolj značilna velika spremenljivost. V tretjem poglavju se avtorji osredinijo na analizo hidroloških lastnosti Cerkniškega polja. Zaradi številnih in različnih dotokov vode je raziskovanje dinamike ojezeritve zapleteno, spreminjanje zgoraj omenjenih podnebnih značilnosti ter posegi človeka v preteklosti, pa so razmere še dodatno zapletli. Rezultat vseh dejavnikov so namreč vse pogostejše zelo visoke poplave na eni in prav tako vse pogostejše dolgotrajne suše na drugi strani. Oboje pa vpliva na vitalnost življenjskih okolij, biotsko pestrost in sobivanje človeka na tem območju. Uvodoma so s pomočjo virov predstavili geografske lastnosti vodozbirnega območja Cerkniškega polja, dotoke in odtok s polja, smeri pretakanja vode, poplave in presihanje jezera ter posege človeka, s katerimi so bodisi želeli zmanjšati poplavljenost in intenzivirati kmetijsko rabo polja bodisi zadržati odtok, podaljšati ojezerjenost in izrabiti hidroenergijo. Sledi predstavitev rezultatov obsežne analize podatkov treh hidroloških postaj, lastnih meritev vodostaja in temperature ter vzorčenj vode, s katero avtorji ugotavljajo sezonsko in dolgoletno dinamiko v količini in kakovosti vode. Rezultati bralca seznani z veliko novimi ugotovitvami, kot zanimivost pa izpostavljam s podatki pojasnjen vpliv človekovih posegov na dinamiko vode. V 70. letih 20. stoletja so se vodostaji zviševali zaradi človekovih aktivnosti za poskusno trajno ojezeritev polja, kasneje pa je opazen trend povečanja le najnižjih vodostajev ter padajoči srednjih in najvišjih vodostajev. Primerjava različnih obdobj je pokazala, da je vodostaj tekom leta nižji v primerjavi s preteklostjo, najbolj izrazito pa je to spomladi, poleti in zgodaj jeseni. Zelo nazoren je prikaz obsega poplav in uskladiščene vode v Cerkniškem jezeru v obdobju 1954–2022, ki prikazuje največji obseg poplavljenosti v posameznih mesecih in izjemne razlike v količini uskladiščene vode (med 14 milijoni m³ v avgustu in 71 milijoni m³ vode v novembru). Del tretjega poglavja predstavlja rezultate geokemičnih analiz vode, ki so pokazale razlike med dotoki vode na Cerkniško polje, le te pa so pogojene z razlikami v njihovih vodozbirnih zaledjih. Dobro vidna je na primer razlika med pritoki z apnenčastega in dolomitnega zaledja. Vpliv človekovih posegov na vodnatost Cerkniškega polja v zaključku poglavja je prikazan z analizo odnosa med efektivnimi padavinami in vodostajem po desetletjih. Razlike med desetletjema 1961–1970 in 1971–1980 so pokazale učinke prizadevanj za osušitev v prvem in ojezeritev v drugem. Kot ugotavljajo avtorji, se kljub odstranitvi ovir odtoka vode kažejo višji vodostaji tudi v naslednjih desetletjih, ampak bolj kot to že danes na vodnatost vplivajo spremembe podnebja. Korelacija med hidrološkimi in klimatološkimi podatki namreč kaže, da se vpliv podnebnih razmer na hidrološko dinamiko Cerkniškega polja povečuje.

Znanstvena monografija Presihajoče jezero, Monografija o Cerkniškem jezeru je pomemben doprinos k poznavanju tega edinstvenega območja. Opisano je rezultat analize razpoložljivih javno dostopnih podatkov, ki jih zbirajo meteorološke in hidrološke postaje, terenskega raziskovanja avtorjev in primerjalne analize z rezultati preteklih raziskav, ki so bile strokovno raznovrstne in številne. Opisano dodatno pojasnijo številna grafična oz. slikovna ponazorila, nastala z uporabo orodij geografskih informacijskih sistemov in s posnetki iz zraka. Poleg prikazanega stanja in vzročno-posledičnih povezav med pokrajinskimi elementi in človekovimi posegi, so pomemben rezultat nakazane prihodnje spremembe, povezane s spreminjanjem podnebja, ki bodo vplivale na življenje na Cerkniškem polju v njegovem najširšem pomenu.

Prof. em. dr. Mihael Jožef Toman

Strokovnjak za ekologijo celinskih voda

Knjiga Presihajoče jezero je odlična znanstvena monografija o enem najbolj znamenitem naravnem pojavu v Sloveniji, ki ga je opisoval že polihistor Valvazor. Urednica in soavtorica znanstvenih poglavij izr. prof. dr. Alenka Gaberščik, ki je bila pred dobrimi 20 leti avtorica prve knjige o jezeru, ki izginja in se spet pojavi, je z odličnim ekosistemskim znanjem tako vodnih, obvodnih in kopnih ekosistemov zbirala številne raziskave na jezeru, ki so jih opravljali slovenski raziskovalci iz različnih inštitucij in številni študenti različnih smeri in jih kot avtorje in soavtorje posameznih poglavij v pričujoči znanstveni monografiji z izjemnim občutkom povezala v smiselno celoto. Monografija, ki sem jo imel čast prebirati pred izidom in recenzirati, je tako odličen mozaik, ki ga sestavljajo številni kamenčki. To so izsledki o hidrologiji območja, klime in klimatskih spremembah, bioloških procesih in združbah, naravi in okoljevarstvu, sobivanju človeka in njegovih vplivih in željah po spreminjanju stanja. S tem je monografija dobila celostno podobo in ni le zbirka posameznih med seboj nepovezanih prispevkov.

Cerkniško jezero je zagotovo svetovni fenomen, ki mu vladajo motnje, kot lepšo zapiše avtorica. Je značilno mokrišče Ramsarskega pomena, kjer se voda in kopno povezujeta v skrivnosten ekosistem, ki mu v svetu ni para. V preteklosti je številne biologe in druge raziskovalce zanimala narava jezera kot taka, njegova biotska pestrost, ekosistemske posebnosti, tudi arheologija območja in zgodovina sobivanja človeka z jezerom. Dandanes se k sreči naš odnos do narave in okolja vendarle spreminja, vode in kopno niso le naravni vir dobrin, ki jih lahko izkoristimo, ampak tudi del našega obstoja in bivanja. Zavedamo se, da so dragocene raziskave nujno potrebne za celovito upravljanje in gospodarjenje z okoljem in prostorom, kjer ni prostora zgolj za antropocentrično razumevanje narave. Priča smo tudi resnim opozorilom o podnebnih spremembah, o katerih še ni bilo veliko zapisanega v prvi knjigi o jezeru, v tej monografiji pa se v vseh prispevkih jasno prepoznajo tudi ti elementi okolja. Urednici dr. Gaberščikovi je skupaj z avtorji prispevkov zagotovo uspelo z obširno monografijo postaviti nove temelje za upravljanje z naravo, ne le njeno izkoriščanje. Raziskovalci podajajo strokovne ugotovitve in razlage, na različnih nivojih politike pa je, da jih upoštevajo. Izgovorov, da nečesa ne vemo ni več.

Avtorji najprej predstavijo geološke značilnosti območja, v tem delu Slovenije, ki je tudi zibelka krasoslovja. Jezero je območje klasičnega krasa, ki je ostalo posebno kljub mnogim poskusom melioracij vodotokov prispevnega območja in zapiranja požiralnikov jezera. Posegi niso upoštevali povezanosti kraškega prostora, opozarjajo avtorji, tudi ne dejstva, da je kraški prostor povezan. Odlično je razloženo ravnoesje elementov krajine, procesov v vodi in na kopnem, kar kliče k razumnim posegom, ki naj upoštevajo naravne zakonitosti ranljivega kraškega okolja.

Zelo pregledno je poglavje o podnebjju, temperaturi in tudi o pričakovani dinamiki procesov v prihodnje. Zbrani podatki in uporabljeni modeli že opozarjajo na spremembe padavinskega režima, količin in temperatur območja. Skrbi podrobnejša analiza poplavne dinamike jezera in z njim povezanih tekočih voda, kar bo zagotovo vplivalo na spremembe habitatov tega občutljivega ekosistema. Prav spremembe habitatov so tiste, ki jih tudi avtorji drugih poglavij v monografiji posebno pozorno izpostavljajo.

Cerkniško jezero karakterizirajo geološke in hidrološke posebnosti, ki jih je v preteklosti z različnimi posegi v prostor človek želel spreminjati. Posledični vplivi pa so bili večinoma slabi, saj niso upoštevali značilnega dihanja jezera, ki je zelo zapleteno in ne povsem raziskavo. Avtorji

v hidrološkem prispevku monografije zato opozarjajo, da posegi kažejo pogostejše poplave in daljša sušna obdobja, ki se bodo zagotovo stopnjevala s pričakovanimi podnebnimi spremembami. Veseli pa dejstvo, da avtorji zelo pregledno obdelajo številne podatke Agencije RS za okolje, ki je inštitucija Ministrstva, ki ima v rokah tudi škarje in platno, ko se srečujemo z urejanjem vodnega in obvodnega prostora. Zato po mojem mnenju ta avtorski prispevek močno nagovarja politične odločevalce, na kaj bo treba v prihodnje posebej računati. Vsekakor upam, da je za nami obdobje eksperimentiranja z jezerom in s pritoki, ki je vplivalo na ekosistem kot celoto.

Poglavje v knjigi o divjih čebelah jasno pokaže, da je ekosistem Cerkniškega jezera močno povezan s prispevnimi kopnimi ekosistemi in da vpliva na njihovo habitatsko pestrost in posledično na vrstno pestrost številnih žuželk, med njimi tudi pomembnih opraševalcev, ki sobivajo z jezerom in ljudmi. Z intenzivnim vzorčenjem so potrdili veliko pestrost teh živali, kar 169 različnih vrst so popisali, zagotovo pa ne vseh. Opozorili pa so tudi na ugotovitve, da kar nekaj vrst, ki so bile znane pred leti, niso več našli, domnevajo, da so izginile. Avtorji ne odgovorijo na vprašanje zakaj, pojasnjujejo pa, da Cerkniško jezero s svojo dinamiko ustvarja primerne habitate tudi za to skupino živali, katerih populacijski trendi niso povsem raziskani.

Značilni element presihajočega jezera so rastline, posebej trstičje, ki jih avtorji prikažejo ne le z vidika vrstne pestrosti ampak predstavijo tudi njihove optične lastnosti v spreminjajočem se ekosistemu. Soavtorica dr. Gaberščikova je zbrala veliko število raziskav in podatkov, tudi svojih doktorandov in doktorandk, in jih v poglavju smiselno povzela. S kolegi je iskala odgovore na vprašanja o spektralnih lastnostih rastlin, o vplivu sevanja na plavajoče liste, o zmanjšanju UV sevanja na potopljene rastline. Ugotavlja, da spremembe niso le posledica naravnih procesov dinamike jezera, ampak tudi določenih človekovih posegov v vodostaj.

Poseben izziv je vsekakor upravljanje z jezerom, mokriščnimi habitatmi in kmetijskimi površinami. Avtorja tega poglavja opozarjata na upad vrstne pestrosti, saj se je mozaičnost kmetijske krajine močno spremenila v enolično krajino, ki ne zagotavlja pestrosti habitatov. Ne gre le za spremembe kmetijskih praks na območju, ampak tudi za opuščanje kmetijstva, kar pomeni, da človek ni le vsiljivec v naravi, ampak tudi njen soustvarjalec. Sukcesije, ki vodijo v gozdne sestoje, zmanjšujejo pestrost vrst. Smotrno upravljanje na podlagi znanstvenih dognanj je tudi v primeru Cerkniškega jezera pomembno in odločilno, saj ohranja ravnovesje med naravo in rabo njenih virov. Avtorja za prihodnje izpostavljata varstvo travniških habitatov, če želimo še naprej ohranjati številne prepoznavne in ekosistemsko pomembne vrste, med njimi metulje, posebej mravljiščarje, ki jih izvrstno opišejo avtorji enega od poglavij. Veliko vlogo v tem prostoru ima Notranjski park, ki z znanji lahko uspešno vodi tudi kmetijsko politiko območja.

Sklepna misel

Znanstvena monografija o presihajočem Cerkniškem jezeru je značilen primer poglobljenega raziskovanja in sodelovanja različnih strok in raziskovalcev in bo tudi izvrsten učbenik študentom različnih naravoslovnih in inženirskih smeri. V slovenskem prostoru primanjkuje tovrstne literature, ki ne le opozarja na pravilno razumevanje upravljanja z vodnimi in obvodnimi ekosistemi, ampak tudi nudi nabor slovenskega ekološkega izrazja, ki ga v času globalizacije vse prepogosto izpodriva angleška terminologija.

Zahvala

Zahvaljujemo se recenzentom, rastlinskemu ekologu in botaniku, zaslužnemu profesorju dr. Francu Batiču, fitocenologu, rednemu profesorju dr. Andražu Čarniju, zunanjemu članu Makedonske akademije znanosti in umetnosti, geografinji, izredni profesorici dr. Valentini Brečko Grubar ter strokovnjaku za ekologijo celinskih voda, zaslužnemu profesorju dr. Mihaelu Jožefu Tomanu, da so prispevali k izboljšanju in večji jasnosti vsebine monografije in prepoznali pomembnost sporočila, ki ga monografija prinaša. Zahvaljujemo se Javni agenciji za znanstveno-raziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, ki je monografijo finančno podprla in Biotehniški fakulteti Univerze v Ljubljani, ki je omogočila izid monografije. Zahvaljujemo se tudi Komisiji za založniško dejavnost Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani, ki je sprejela sklep o izdaji monografije in Založbi Univerze v Ljubljani, ki je monografijo izdala.

Seznam avtorjev

Dragan Abram, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, dragan.abram@gmail.com

Mišo Andjelov, Agencija Republike Slovenije za okolje,
Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, miso.andjelov@gov.si

Danilo Bevk, Nacionalni inštitut za biologijo,
Večna pot 121, 1000 Ljubljana, danilo.bevk@nib.si

Matej Blatnik, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU,
Titov trg 2, 6230 Postojna, matej.blatnik@zrc-sazu.si

Nataša Dolinar, Agencija Republike Slovenije za okolje,
Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, natasa.dolinar@gov.si

Peter Frantar, Agencija Republike Slovenije za okolje,
Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, peter.frantar@gov.si

Gaberščik Alenka, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana in Komanova 25, 1000 Ljubljana, alenka.gaberscik@gmail.com

Franci Gabrovšek, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU,
Titov trg 2, 6230 Postojna, franci.gabrovsek@zrc-sazu.si

Mateja Germ, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, mateja.germ@bf.uni-lj.si

Andrej Gogala, Prirodoslovni muzej Slovenije,
Prešernova cesta 20, 1000 Ljubljana, andrej.gogala@guest.arnes.si

Aleksandra Golob, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, aleksandra.golob@bf.uni-lj.si

Primož Gnezda, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, primoz.gnezda@gmail.com

Mateja Grašič, Kmetijski inštitut Slovenije,
Hacquetova ulica 17, 1000 Ljubljana, mateja.grasic@kis.si

Matej Holcar, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, matej.holcar@bf.uni-lj.si

Tomaž Jančar, Notranjski regijski park,
Tabor 42, 1380 Cerknica, tomaz.jancar@notranjski-park.si

Danijel Kablar, Nacionalni inštitut za biologijo,
Večna pot 121, 1000 Ljubljana, danijel.kablar@nib.si

Katja Klančnik Židan, Inštitut za vode Republike Slovenije,
Einspielerjeva ulica 6, 1000 Ljubljana, katja.klancnik@izvrs.si

Blaž Koderman, Nacionalni inštitut za biologijo,
Večna pot 121, 1000 Ljubljana, blaz.koderman@nib.si

Rudi Kraševac, Notranjski regijski park,
Tabor 42, 1380 Cerknica, rudi.krasevec@notranjski-park.si

Matevž Likar, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, matevz.likar@bf.uni-lj.si

Nik Ojdanič, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, nik.ojdanic@bf.uni-lj.si

Metka Petrič, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU,
Titov trg 2, 6230 Postojna, metka.petric@zrc-sazu.si

Paula Pongrac, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana in Institut Jožef Štefan in Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana
paula.pongrac@bf.uni-lj.si

Nataša Ravbar, Inštitut za raziskovanje krasa ZRC SAZU,
Titov trg 2, 6230 Postojna, natasa.ravbar@zrc-sazu.si

Urša Remic, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, ursa.remic@gmail.com

Marjana Regvar, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, marjana.regvar@bf.uni-lj.si

Jošt Stergaršek, Notranjski regijski park,
Tabor 42, 1380 Cerknica, jost.stergarsek@notranjski-park.si

Vekoslava Stibilj, Inštitut Jožef Štefan,
Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana, vekoslava.stibilj@gmail.com

Nina Šraj, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, nina.sray@gmail.com

Rok Šturm, Nacionalni inštitut za biologijo,
Večna pot 121, 1000 Ljubljana, rok.sturm@nib.si

Florjana Ulaga, Agencija Republike Slovenije za okolje,
Vojkova 1b, 1000 Ljubljana, florjana.ulaga@gov.si

Katarina Vogel-Mikuš, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana in Institut Jožef Štefan, Jamova cesta 39, 1000 Ljubljana
Katarina.VogelMikus@bf.uni-lj.si

Igor Zelnik, Oddelek za biologijo, Biotehniška fakulteta, Univerza v Ljubljani,
Jamnikarjeva 101, 1000 Ljubljana, igor.zelnik@bf.uni-lj.si

Katalogni zapis o publikaciji (CIP) pripravili v Narodni in univerzitetni knjižnici v Ljubljani

COBISS.SI-ID 256309507

ISBN 978-961-297-718-4 (PDF)

Naslov publikacije: PRESIHAJOČE JEZERO, *Monografija o Cerknškem jezeru*

Urednica: Alenka Gaberščik

Recenzenti: Franc Batič, Valentina Brečko Grubar, Andraž Čarni, Mihael Jožef Toman

Lektor: Publikacija je bila lektorirana.

Avtorji prispevkov: Dragan Abram, Mišo Andjelov, Danilo Bevk, Matej Blatnik, Nataša Dolinar, Peter Frantar, Gaberščik Alenka, Franci Gabrovšek, Mateja Germ, Andrej Gogala, Aleksandra Golob, Primož Gnezda, Mateja Grašič, Matej Holcar, Tomaž Jančar, Danijel Kablar, Katja Klančnik Židan, Blaž Koderman, Rudi Kraševc, Matevž Likar, Nik Ojdanič, Metka Petrič, Paula Pongrac, Nataša Ravbar, Urša Remic, Marjana Regvar, Jošt Stergaršek, Vekoslava Stibilj, Nina Šraj, Rok Šturm, Florjana Ulaga, Katarina Vogel-Mikuš, Igor Zelnik

Avtorji fotografij: Matej Blatnik, Nataša Dolinar, Alenka Gaberščik, Primož Gnezda, Mateja Grašič, Matej Holcar, Tomaž Jančar, Ana Kafol, Blaž Koderman, Mojca Pibernik, Nataša Ravbar, Jošt Stergaršek, Rok Šturm, Karmen Uranič, Zoran Vidrih

Slika na naslovnici: Prikaz notranjega ustroja vodnih poti (Janez Vajkard Valvasor, 1689)

To delo je ponujeno pod licenco Creative Commons Priznanje avtorstva 4.0 Mednarodna licenca <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.sl>

Izid knjige so omogočili: Javna agencija za znanstvenoraziskovalno in inovacijsko dejavnost Republike Slovenije, Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani

Leto izida publikacije: 2025

Založila: Založba Univerze v Ljubljani

Za založbo: prof. dr. Gregor Majdič, rektor Univerze v Ljubljani

Izdala: Biotehniška fakulteta Univerze v Ljubljani

Za izdajatelja: prof. dr. Marina Pintar, dekanja Biotehniške fakultete Univerze v Ljubljani

Oblikovanje: Alenka Gaberščik

Prelom: Birografika BORI

Prva elektronska izdaja

Ljubljana, 2025

*V prejšnjih izvajanjih o ustroju
in mnogoterih lastnostih našega
jezera so različne čudne stvari,
ki se zdijo tistemu, ki ne premišlja
o njih vzrokih, prav nenavadne in
skoraj neverjetne. Zato sem se
odločil razložiti, kako nastanejo
in kaj jih povzroča ...*

*Vse te operacije ali akcije in
lastnosti (pač čudno vse to na
enem samem jezeru) sem vsako
posebej najmarljiveje raziskal in
opazoval, ne glede na velik trud
in nevšečnosti, ki je bilo z njimi
združeno moje opazovanje ...*

Janez Vajkard Valvasor, 1689

ISBN 978-961-297-718-4



9 789612 977184