

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 (Bandeogh 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 reprodukcijska 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 mešanicam 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 prerasloolistnem 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.

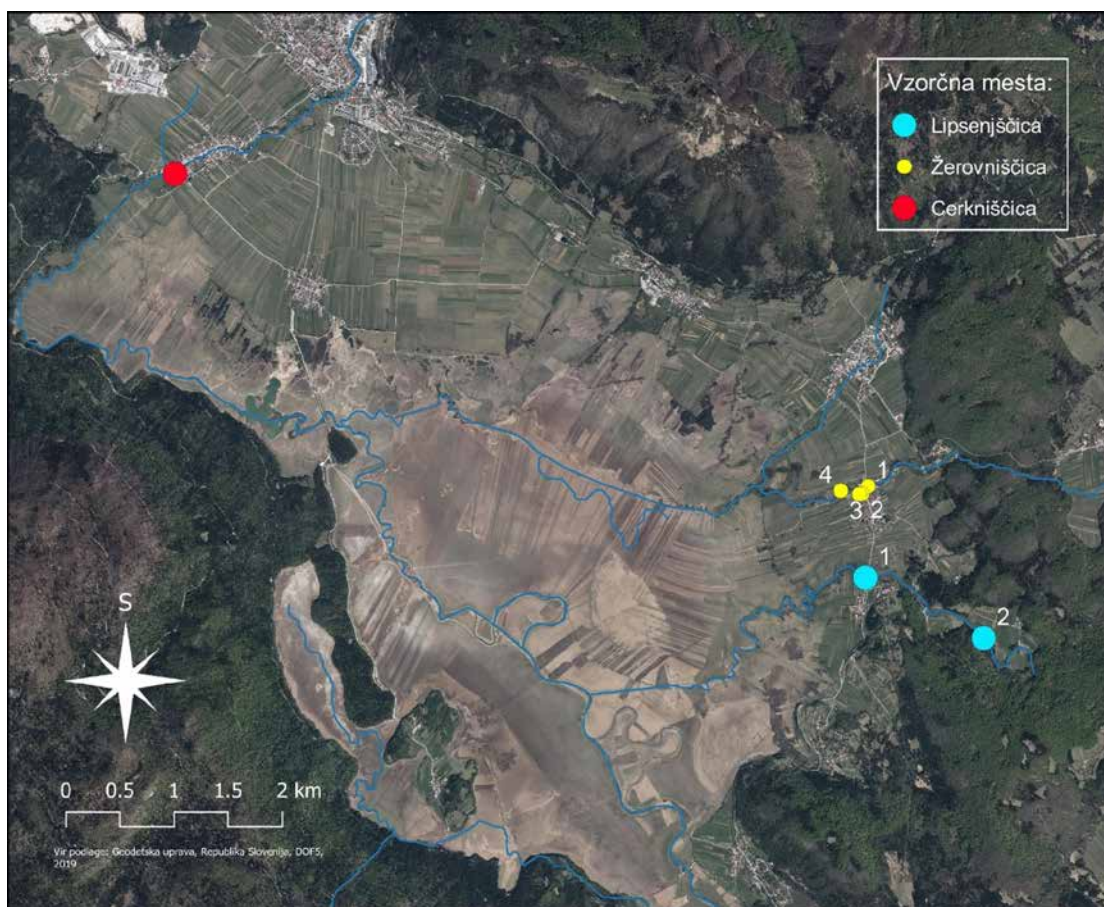
Zmožnost vodnega jetičnika za kopičenje Se

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.

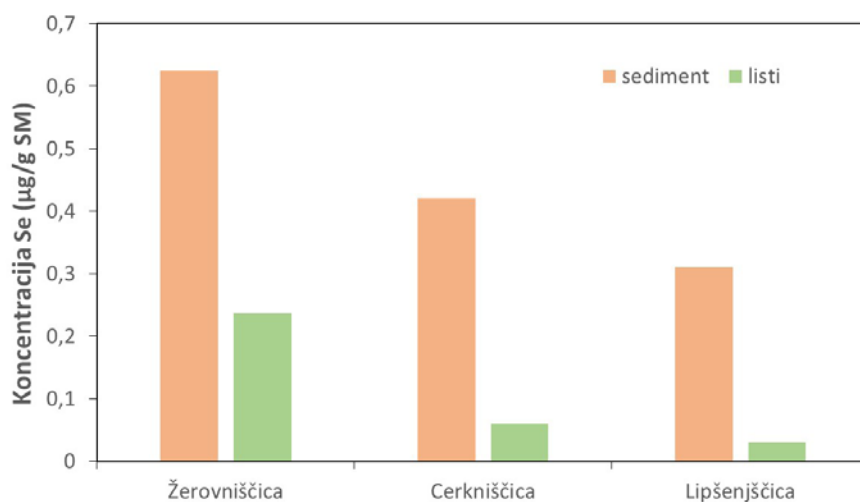
Vzorčno mesto	Se ($\mu\text{g/L}$) julij	Se ($\mu\text{g/L}$) september
Cerkniščica	0,06	0,08
Lipsenj 1	0,07	0,08
Lipsenj 2	/	0,07
Žerovniščica 1	0,09	0,09
Žerovniščica 2	0,07	0,09
Žerovniščica 3	0,14	0,09
Žerovniščica 4	0,08	0,07

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.

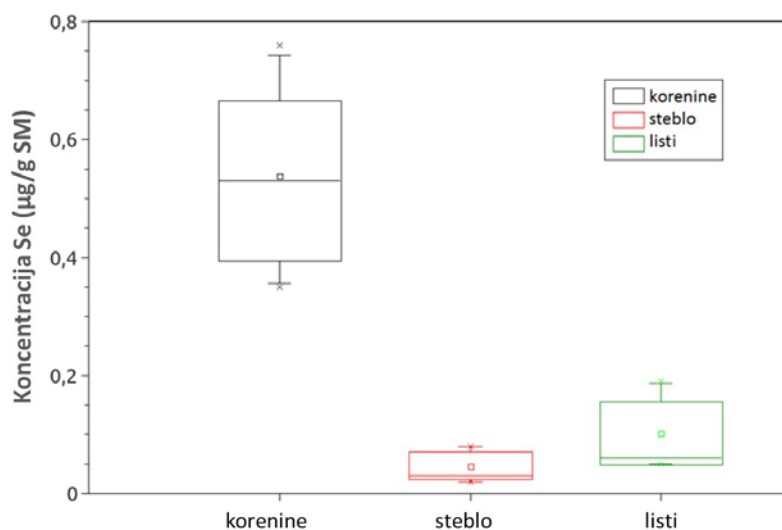
Preglednica 4: Izmerjena vsebnost Se ($\mu\text{g/g}$) v sedimentih in delež delcev sedimenta < 1mm.

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., Gougardchi, 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 70/524/EEC 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>