

SAMOČIŠČENJE CERKNIŠKEGA JEZERA KOT KOMBINACIJA RASTLINSKE ČISTILNE NAPRAVE IN SEKVENČNEGA REAKTORJA

SELPURIFICATION PROCESSES IN LAKE CERKNICA WITH COMBINATIONS CONSTRUCTED WETLAND AND OF SEQUENCE RECTOR

doc. dr. Darko Drev, univ. dipl. inž. kem. teh.

IZVRS, darko.drev@izvrs.si

Hajdrihova 28 c, 1000 Ljubljana

izr. prof. dr. Jože Panjan, univ. dipl. inž. grad.

Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo

Jamova 2, 1000 Ljubljana, joze.panjan@ul-fgg.si

Znanstveni članek

UDK: 502.171:531.62

Povzetek | Cerkniško jezero je presihajoče – periodično jezero, ki lahko doseže površino 26 km² in volumen 80 km³. Za jezera je značilno, da se sčasoma starajo. Cerkniško jezero pa nima lastnosti pravih jezer pa tudi običajnih močvirij ne. Zato so vsi fizikalni, kemijski in biološki procesi specifični. Poglavitna posebnost, ki ima največji vpliv na razvoj rastlin in živali, je, da je dno menjaje suho in poplavljen. Pri samočiščenju smo ga obravnavali kot rastlinsko čistilno napravo in kot sekvenčni reaktor s periodo polnjenja in praznjenja na šest mesecev. Osnovni procesi samočiščenja hranil v jezeru so usedanje suspendiranih snovi na dno, vgradnja hranil v rastline in delna denitrifikacija. Ponavljajoče se polnjenje in praznjenje jezera vzdržujejo ekosistem na zgodnji, relativno produktivni stopnji razvoja, nekje med »mladostjo in zrelostjo« jezera oziroma oligotrofno do eutrofno. Največjo obremenitev za jezero predstavlja kmetijstvo, ki prispeva ca. 66 % fosforja in 53 % dušika in naselja s ca. 33 % fosforja in 44 % dušika. V Cerknškem jezeru se na podlagi naših izračunov (samo)očisti okoli 24 % fosforja in 40 % dušika.

Summary | Lake Cerknica is a intermittent – periodical lake, which may reach the surface of 26 km² and volume of 80 km³. It is characteristic for lakes to age over time. Lake Cerknica is neither a typical lake nor marshland. Therefore, all its physical, chemical and biological processes are rather specific. The main feature having the greatest impact on the development of plants and animals is that its bottom alternately dry or flooded. Regarding selfpurification it was treated as a purifying plant and a sequential reactor with a period of approximately 6 months. The basic processes of selfpurification are: suspended solids settling at its bottom, the installation of nutrients into plants, and partial denitrification. Repeated filling and emptying maintained the lake ecosystem at an early, relatively productive, stage of development, somewhere between "youth and maturity," or it is oligotrophic to eutrophic. Agriculture, which contributes approximately 66 % of phosphorous and 53 % of nitrogen and surrounding villages with approximately 33% phosphorous and 44 % nitrogen represent the greatest load for the lake. On the basis of our calculations only about 24 % phosphorus and 40 % nitrogen is purified in Lake Cerknica.

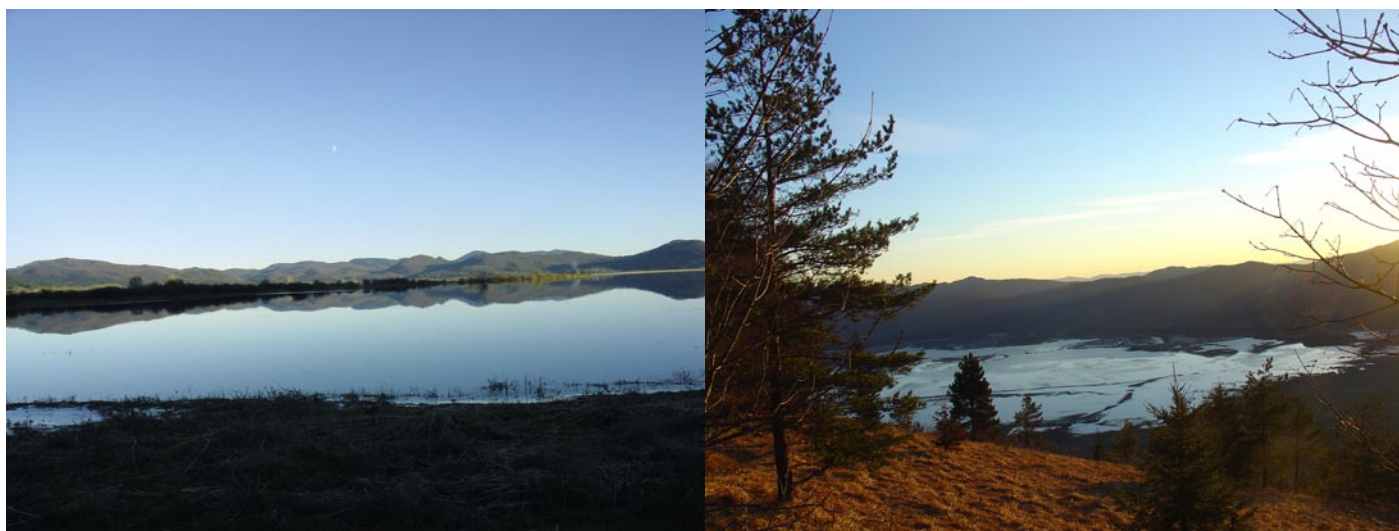
1 • UVOD

Cerkniško jezero je presihajoče – periodično jezero s periodo približno šest mesecev. V »namočeni« polovici leta je največje slovensko naravno jezero, ki meri okoli 26 km², s prostornino približno 80 km³ in največjo globino malo manj kot 20 metrov. Osnovna ekološka značilnost jezera je veliko nihanje vodne gladine, dno je menjaje se suho in poplavljenno, velikost poplavljenih površin pa se zelo spreminjajo. Edini površinski pritok na Cerkniškem polju je reka Cerkniščica. Voda priteka v jezero predvsem iz kraških izvirov, razporejenih ob robu, odteka pa samo podzemeljsko, skozi ponore v dnu in robu jezera. Ob močnem deževju se jezero napolni v nekaj dneh (Gaberšček, 2002). Voda ostaja v njem povprečno štiri do pet mesecev, v glavnem od marca do junija in

od oktobra do konca januarja. Pričetek nastajanja jezera je približno nad koto 548 m.n.m, kar pomeni ca. 0,7 km² površine. Cerkniško jezero je plitvo in neslojevito (nestratificirano), s povprečno globino med 1,5 do 3 m, v takih jezerih je recikluracija hranil in s tem tudi rast fitoplanktona mnogo večja kot v globljih jezerih (Kovač, 2005).

Vodni sistem najlažje očisti naravni del onesnaženja, medtem ko antropogeni del onesnaženja z vedno novimi spojinami jezero močno obremeni. V sušnem obdobju se pospeši aerobna razgradnja nakopičenih organskih snovi. Ob ponovni napolnitvi jezerske kotanje ostane na dnu rastlinje ali pa strnišče, ki da detritus. Iz zemlje in razpadajočih ostankov se izlužijo hranilne snovi, ki so podlaga za

razvoj rastlinskega planktona ((Mander, 2003), (Moss, 1989)). Ker jezero ni globoko, pomladansko sonce hitro ogreje vodo in plitvo dno. Vetrovi in potoki plitvo vodo dobro premešajo, kisika je dovolj in tudi ogljikovega dioksida. Primarna produkcija na jezeru je zato velika. Na splošno velja, da večja ko so nihanja vodne gladine, večja je produktivnost sistema. Najbolj pomembne za čiščenje vode so bakterije, ki imajo prednost pred drugimi organizmi zaradi razmerja med površino in telesno težo ter zmožnostjo hitrega razmnoževanja. Višje podvodne rastline s svojimi listi in stebli delujejo predvsem kot sito in substrat za mikroorganizme. Glavna povzročitelja slabšanja kakovosti Cerkniškega jezera sta predvsem intenzivno kmetijstvo in urbanizacija ((Drev, 2009), (Merrington, 2002)). Pri prevelikih količinah voda s hranili lahko pride do eutrofikacije, to je do preobremenjenosti in rušenja ekoravnotežja – cvetenja alg.



Slika 1 • Pogled na Cerkniško jezero jeseni in pozimi (foto: Panjan)

2 • METODE DELA

Meritve onesnaženja Cerkniškega jezera potekajo v okviru programa monitoringa kakovosti jezer pod okriljem Agencije republike Slovenije za okolje – ARSO. Upoštevali bomo obdobje med letoma 1989 in 1999.

Ob višjem vodostaju se kaže znižanje vrednosti BPK-ja, medtem ko na KPK vodostaj nima izrazitega vpliva. Meritve kažejo večje onesnaženje s hranili na pritokih kot v samem jezeru.

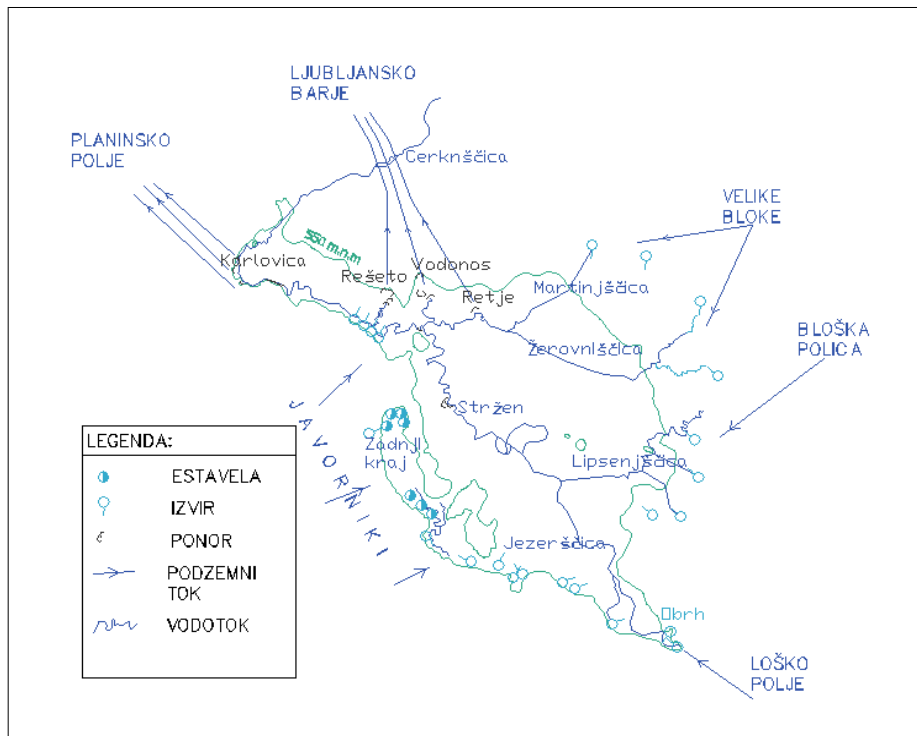
Sistem Cerkniškega jezera želimo predstaviti kot kombinacijo rastlinske čistilne naprave – RČN, in skvenčnega reaktorja – SBR, kot veliko biološko čistilno napravo, ki preko usedanja in z mikroorganizmi, rastlinami ter apnenčastimi in dolomitnimi tlemi »vsrkava« in izloča hranila ter spreminja onesnaženje (suspendirane snovi, pH, BPK, KPK ...) oziroma omogoča samočiščenje.

Upoštevani so naslednji samočistilni procesi:

- usedanje (mehansko odlaganje suspendiranih snovi na dno),
- odstranjevanje N in P skozi rastlinje (s košnjo),
- denitrifikacija (izguba N₂ v ozračje),
- odstranjevanje hranil skozi alge.

Skupna bilanca za Cerkniško jezero je realna v času, ko jezero obstaja, to je v povprečju devet mesecev na leto. Takrat je jezero celovito in vode so premešane. V času nizkih vodostajev, ki se pojavijo dvakrat na leto, pa je jezero razdeljeno na več podsistemov. Površinski sistemi vodotokov so ločeni in zato lahko govorimo o treh podsistemih, in sicer Cerkniščice, ki

se steka v Karlovinci, Strženi, ki presahne na poti do Jamskega zaliva, in še Zadnji kraj, ki je brez površinskega vodotoka in se vanj stekajo vode iz Javornikov, glej sliko 2.



Slika 2 • Prikaz površinskih vodotokov, podzemnih vodnih zvez, ponorov in izvirov na Cerknjskem polju (Kovač, 2005)

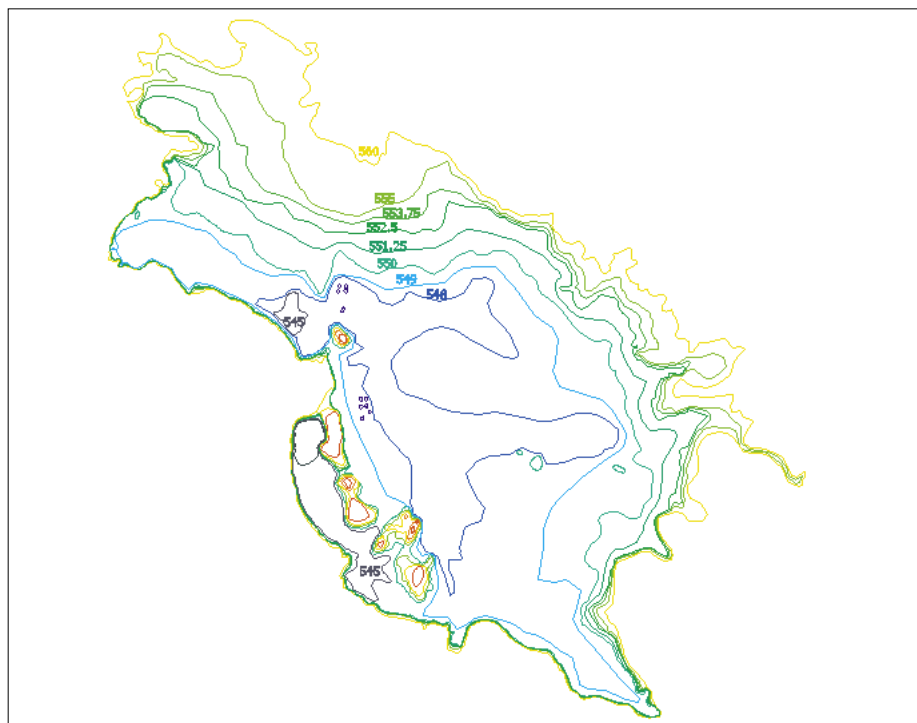
3 • PRIMERJAVA PROCESOV SAMOČIŠČENJA Z RČN IN TEHNIČNIMI REAKTORJI SBR

Samočistilni procesi so v Cerknjskem jezeru dinamični zaradi polnjenja in praznjenja. Sposobnost Cerknjskega jezera, da zmanjša organsko onesnaženje, predela in odstrani velik del hranil, lahko primerjamo z nekaterimi tehnološkimi načini čiščenja odpadne vode, kot so rastlinske čistilne naprave – RČN, ali lagune, zaradi polnjenja in praznjenja pa so podobni tudi sekvenčnim reaktorjem SBR. Zato bomo poizkušali naravne procese v jezeru primerjati in opisati s temi tehničnimi postopki čiščenja.

3.1 Hidrološki parametri

Računanje površine in volumna

Gladina jezera niha, zato se jezerska površina in volumen med letom neprestano spreminjata. Osnovne podatke smo pridobili iz topografskih kart 1 : 25.000, iz katerih so odčitane izohipse 546, 550, 552,5, 550 in 560 m.n.m. in v avtoCAD-u izrisane ter izračunane površine ploskve in njihovi volumni, glej sliko 3. Vsa nihanja so izmerjena na merilni postaji v Dolejnem Jezeru z nadmorsko višino 545,556 m.



Slika 3 • Izohipse Cerknjskega jezera – polja (Kovač, 2005)

Nihanje gladine

Nihanje vodostaja se iz leta v leto spreminja. Visok vodostaj lahko nastopi vsako leto ob drugem času, tako da ne moremo z gotovostjo trditi, v katerem mesecu bo jezero prazno ali polno. Zelo je odvisno od meteorološkega leta. Tako je za večletna opazovanja za avgust značilen najnižji vodostaj v letu, slika 5, vendar je bil leta 1989 v avgustu vodostaj višji kot v večini drugih mesecev. Vsi podatki so dobljeni iz meritev gladin vode v obdobju med letoma 1989 in 1999.

Povprečno globino jezera (H_{npovp}) na nadmorski višini (n) je določena po enačbah od 3.1 do 3.4.

$$H_{npovp} = \frac{\sum_{i=545}^n \Delta H_i * P_i}{\sum_{i=545}^n P_i} \quad (1)$$

Tu pomenita:

$$P_i = \text{površina dna na višini } i \quad (2)$$

$$\Delta H_i = H_n - i \quad (3)$$

$$i = \text{od kote } 545 \text{ do } H_n \quad (4)$$

Sprememba volumna pa je enaka:

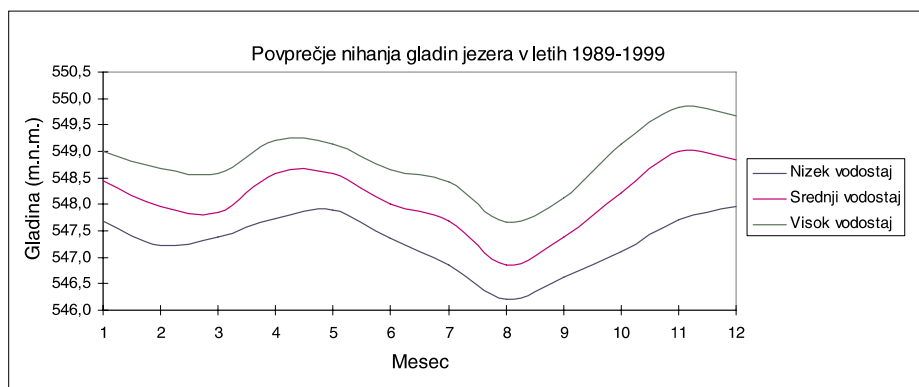
$$\frac{dV}{dt} = Q_{vtok} - Q_{iztok} \pm dR = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (5)$$

kjer sta:

$$Q_{vtok} = \text{padavine} \cdot \text{koeficient odtoka} \cdot \text{prispevna površina} \quad (6)$$

$$Q_{iztok} = Q_{iztok} (\text{zmogljivost ponorov, višina vode}) \quad (7)$$

R = razlika med dotokom in odtokom



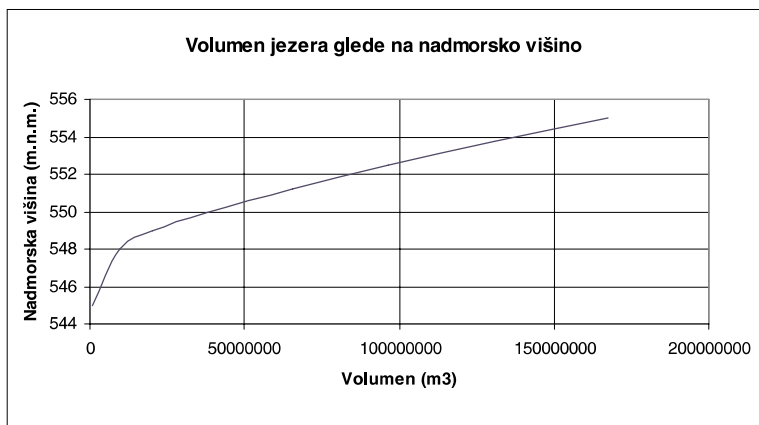
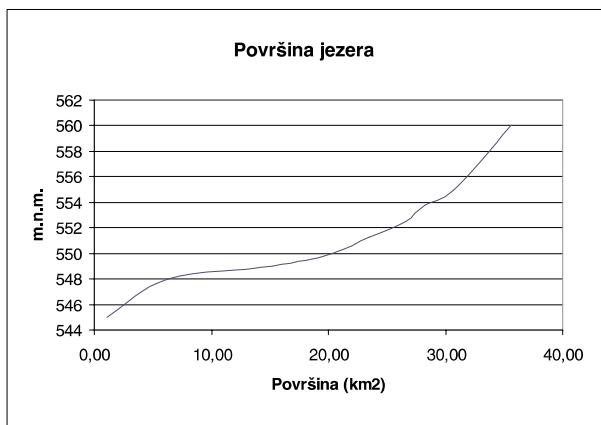
Slika 4 • Povprečno nihanje gladin Cerknika jezera na vodomerni postaji Dolenje Jezero v obdobju 1989–1999

Višina – kota	globina	površina	
(m.n.m.)	(cm)	(m ²)	(km ²)
545	0	1056827	1,06
546	100	2812645	2,81
547	200	4568464	4,57
548	300	6324282	6,32
549	400	15186310	15,19
550	500	20258178	20,26
551,25	625	23480840	23,48
552,5	750	26589039	26,59
553,75*	875	28203119	28,20

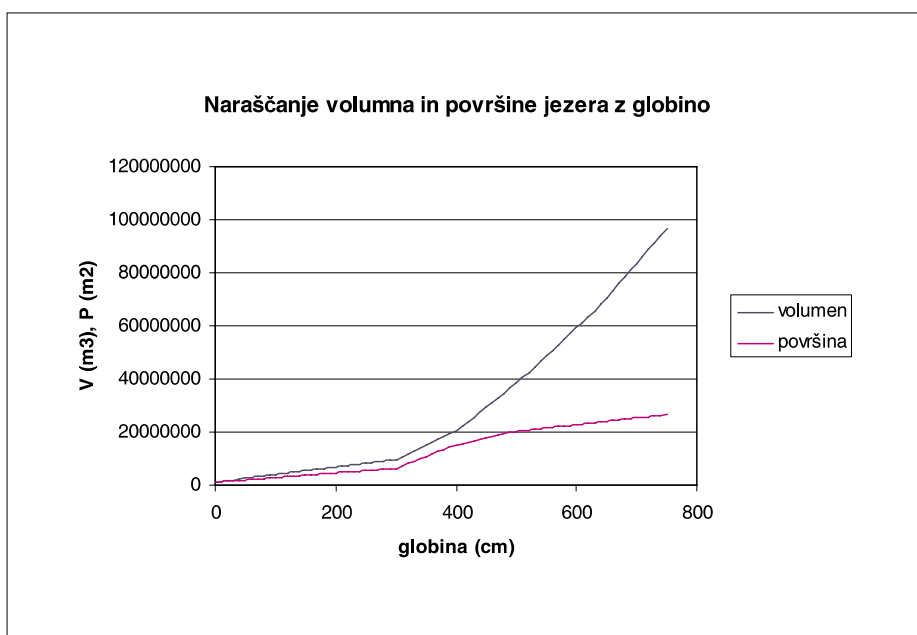
Preglednica 1 • Izračun površine Cerknika jezera glede na povprečni vodostaj v obdobju 1989–1999 (Kovač, 2005)

Površine in volumni pri različnih nadmorskih višinah					
Nadmorska višina (m.n.m.)	Višinska razlika	P _{ovršina}	ΔP	V _{volumen}	V _{kumulativ} *
	(m)	10 ⁶ (m ²)	10 ⁶ (m ²)	10 ⁶ (m ³)	10 ⁶ (m ³)
545	1,00	1,057	0	1,057	1,057
548	3,00	6,324	0,149	8,661	9,718
549	4,00	15,186	8,862	10,755	20,473
550	5,00	20,258	5,072	17,722	38,195
551,25	6,25	23,481	3,223	27,337	65,532
552,50	7,50	26,589	3,108	30,984	96,516
553,75	8,75	28,203	1,614	34,214	130,730

Preglednica 2 • Izračun volumnov Cerknika jezera glede na koto vodostaja (*) Gabršček (2009), Jezero, ki presiha, stran 34, podaja naslednje volumne: kota 549 m.n.m. ca. 11 mili. m³, na koti 550 m.n.m. ca. 28 mili. m³ in na koti 553 m.n.m. ca. 100 mili. m³)



Slika 5 • Diagram površine in volumna jezera glede na koto gladine



Slika 6 • Prikaz naraščanja volumna in površine jezera z globino (Kovač, 2005)

Pri izračunu volumnov so lahko precejšnje razlike med posameznimi avtorji zaradi pomanjkanja podatkov (ni natančnih geodetskih izmer), ter zaokroževanja pri korigiranju volumna. Največja možna napaka oziroma razlika je ob nizkem vodostaju (med kotama 545 m.n.m. do 548 m.n.m.) oziroma pri manjših volumnih jezera, ki lahko znaša tudi več deset odstotkov. Glavni vzrok so kotanje in požiralniki, ki niso natančno določljivi in lahko prinesejo velik delež k napaki volumna. Nad koto nadmorske višine 549 m pa se napaka zmanjšuje in je po oceni od 5 do 10 %, čeprav takrat sodeluje pri odtokih večje število ponorov. Osnovni nadzor velikostnega razreda volumnov smo naredili na podlagi podatka iz Programa monitoringa kakovosti jezer za leto 2003, ARSO, ko je bil izračunan volumen jezera pri površini 24 km², ca. 76.106 m³, po naših izračunih pa je pri površini 23,5 km² volumen enak ca. 65,53.106 m³ in na podlagi podatkov (Gabršček, 2009), glej opombo pri preglednici 2.



Slika 8 • Cerknica jezero v obdobju, ko si ga lahko predstavljamo kot rastlinsko čistilno napravo ali mokrišče (foto: Kovač)

3.2 Primerjava jezera z rastlinsko čistilno napravo in/ali mokriščem

Rastlinske čistilne naprave s površinskim tokom dobro opravljajo čiščenje BPK, suspendiranih delcev, bakterij in nitratov, medtem ko pri odstranjevanju amonijaka in fosforja le delno. Trstičevje je pomembno predvsem, ker nudi prostor, na katerem se razvija aerobni biofilm (Valsami-Jones, 2004). V mokriščih je nitrifikacija zaradi organskih odpadkov, močvirskih rastlin, ki služijo kot izmenjevalci kationov, pospešena.

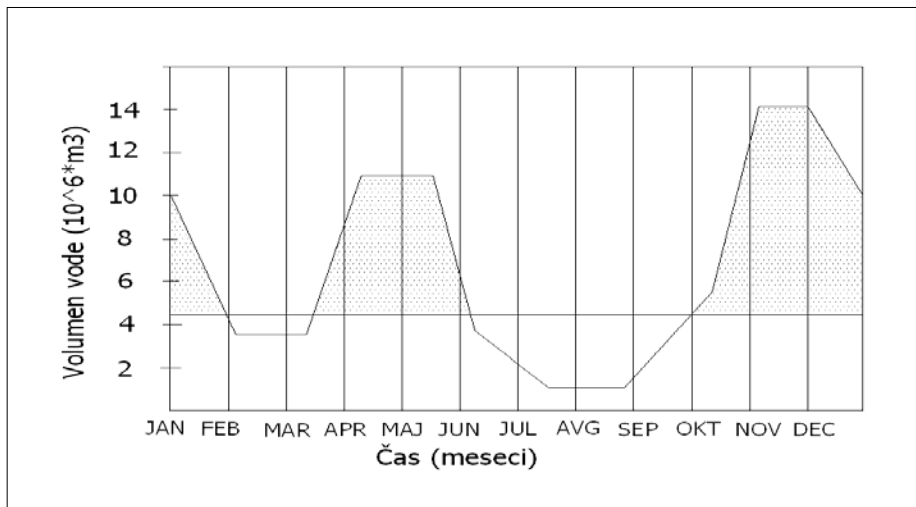
Za Cerkniško jezero v primerjavi s čiščenjem onesnažene odpadne vode v rastlinskih čistilnih napravah ali mokriščih lahko ugotovimo, da pride do:

- usedanja suspendiranih snovi,
- filtracije in kemičnega obarjanja na kontaktih voda–substrat in voda–rastline,
- kemične transformacije snovi,
- adsorpcije in ionske izmenjave na površini rastlin, substrata, sedimenta in organskega drobirja,
- rastlinje, detritus in pritoki zagotavljajo povratni substrat v jezeru ali njegovem dnu,
- razbitja in transformacije polutantov z organizmi in rastlinami,
- odstranjevanja hranil zaradi mikroorganizmov in rastlin,
- plenjenja in naravnega odmiranja patogenih organizmov,
- rastline dovajajo kisik v prst preko koreninskega sistema,
- rastline dovajajo kisik tudi mikrobnim biomasi, ki porablja nečistoče za svojo rast.

3.3 Primerjava jezera z reaktorjem SBR

Osnovna podobnost med SBR in Cerkniškim jezerom je periodično polnjenje in praznjenje »reaktorske posode«, v kateri potekajo vse faze čiščenja (polnjenje, mešanje, aeracija, reakcija, usedanje, praznjenje) (Panjan, 2004).

Gladina hitreje narašča, kot upada, ob normalnih pogojih praznjenja jezero upada za okrog šest cm na dan, napolni pa se v nekaj dneh. Pri poplavah znaša maksimalni dotok 210 do 240 m³/s, srednji letni pretok je 16,4 m³/s, minimalni dotok pa 2 m³/s (Gabršček, 2009). Pretočna sposobnost ponikev in požiralnikov, ki odvajajo vodo proti Rakovemu Škočjanu in nato naprej proti Planinskemu polju, znaša maksimalno 74 m³/s, odtok proti Ljubljanskemu barju pa ca. 16,1 m³/s. Vendar pa dejanska pretočna sposobnost požiralnikov nikoli ni dosežena. Maksimalni odtok torej znaša ca. 40 do 90 m³/s. Pri maksimalnih poplavah znaša razlika med dotokom in odtokom od 120 do 200 m³/s, kar je vzrok obstoja presihajočega jezera.



Slika 9 • Prikaz faz povprečnega polnjenja in praznjenja Cerkniškega jezera v obdobju 1989–1999

Na sliki 9 so prikazane povprečne faze polnitve in praznitve za desetletno obdobje 1989–1999.

Tako lahko ugotovimo s primerjavo delovanja med Cerkniškim jezerom in reaktorjem SBR naslednje:

- Ko je $Q_{\text{dotok}} > Q_{\text{iztok}}$, poteka v jezeru polnjenje, in nasprotno, ko je $Q_{\text{dotok}} < Q_{\text{iztok}}$, se jezero prazni.
- Sistem Cerkniškega jezera se najbolj ujema s sistemom SBR s kontinuiranim polnjenjem in/ali praznjenjem.
- Medtem ko en cikel pri SBR traja nekaj ur (ca. šest ur), traja na Cerkniškem jezeru od ca. štiri do deset mesecev, povprečno šest mesecev. Povprečno sta dve polnitvi na leto, ena aprila, druga novembra, in dve praznitvi, ena julija in druga februarja.
- Bazen SBR je enotno premešan, medtem ko je Cerkniško jezero lahko občasno pri nizkih vodostajih razdeljeno na več zalivov in je voda različno obremenjena.
- Cerkniško jezero ima več pritokov in odtokov, medtem ko ima SBR praviloma en pritok in en odtok.
- Volumen suspenzije aktivnega biološkega blata brez »odpadne« vode je v Cerkniškem jezeru manjši v primerjavi z volumnom dane »odpadne« vode v SBR.
- V jezeru je dovolj organskih snovi (ogljika) za izvedbo III. faze čiščenja.

3.4 Statistična analiza izmerjenih parametrov hranil glede na vodostaj in izračuni samočiščenja ter nekaterih parametrov evτροφnosti

Statistična analiza izmerjenih parametrov hranil glede na vodostaj

S statistično analizo izmerjenih parametrov smo ugotavljali tudi medsebojno soodvisnost oziroma korelacijo glede na vodostaj. Povezavo med dvema skupinama podatkov lahko določimo s kovarianco vzorca.

$$\text{Cov}(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_x) \cdot (y_i - \bar{y}_y) \quad (8)$$

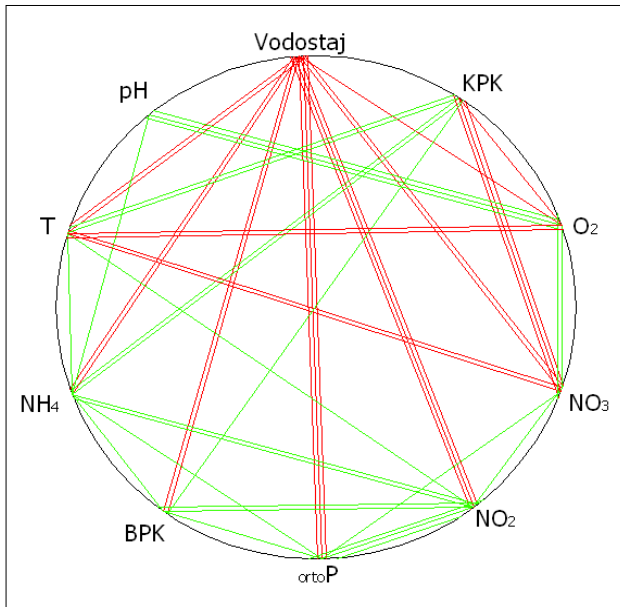
Bredimenzionalna mera povezanosti med dvema skupinama podatkov je korelacijski koeficient.

$$\rho_{x,y} = \frac{\text{Cov}(X, Y)}{s_x \cdot s_y} \quad (9)$$

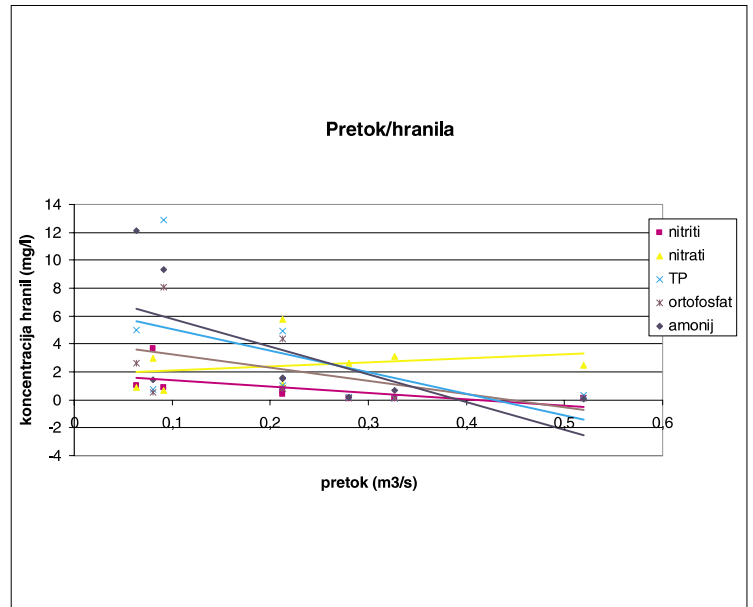
Vrednosti blizu ena pomenijo močno linearno povezavo (oziroma korelacijo) med dvema skupinama podatkov, negativna korelacija pa pomeni, da večje vrednosti ene količine pogojujejo manjše vrednosti druge. Če je vrednost okoli nič, pomeni, da linearne povezave med podatki ni. Statistična pomembnost oziroma značilnost pove, kako zanesljiva je statistična povezava, ki je izračunana po enačbi:

$$R = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (10)$$

Statistične analize kažejo povezanost med nivojem vode in obremenjenostjo s hranili (dušikom in fosforjem), slika 7. To drži predvsem za fosforjeve spojine, katerih koncentracije so pri višjem vodostaju nižje. Nekoliko manj to drži za dušikove spojine, predvsem nitrate. Pri višjem vodostaju se kaže znižanje vrednosti BPK, medtem ko na KPK vodostaj nima izrazitega vpliva.



Slika 7 • Povezava med kakovostnimi parametri in vodostajem v jezeru (Kovač, 2005) (Linearna povezava med posameznimi parametri, kjer pomeni rdeča črta negativno povezavo, zelena pozitivno, več črt pa močnejšo povezavo.)



Slika 10 • Odvisnost med pretokom Cerknjšice in koncentracijo hranil v pritoku

Izračuni samočiščenja in nekaterih parametrov evτροφnosti

Totalna redukcija hranil na celotnem vodnem ekosistemu se izračuna po osnovni bilančni enačbi:

$$R = \sum Q_{dotok} * C_{dotok} - \sum Q_{iztok} * C_{iztok} \quad (11)$$

Pri čemer je:

R – količina hranil, ki se v sistemu reducirajo (kg/leto)

Q_{dotok} – povprečni letni dotok

C_{dotok} – povprečna koncentracija hranil na dotoku

Q_{iztok} – količina vode na iztoku

C_{iztok} – povprečna koncentracija hranil na iztoku

Stopnjo čiščenja lahko izračunamo po naslednji enačbi:

$$\eta = 100 - \frac{\sum Q_{vtok} * C_{vtok}}{\sum Q_{iztok} * C_{iztok}} * 100 \quad (12)$$

Tako smo dobili rezultate letne redukcije hranil, kot jih prikazuje preglednica 3.

Ob napolnitvi jezerske kotanje ostane na dnu rastlinje, ki daje veliko detritusa, ki je podlaga za razvoj rastlinskega planktona. Sončna energija seže do dna. Veter in potoki plitvo vodo dobro premešajo. Jezero se zaradi presihajoče narave in nenadnih motenj ne stara in ostaja na relativno produktivni stopnji razvoja, nekje med mladostjo in zrelostjo.

Za izračun stopnje evτροφnosti smo uporabil podatke o meritvah onesnaženja Cerknjškega jezera, značilne parametre povodja in hidrološke parametre jezera po hidroloških kriterijih (1). Pri tem so najbolj pomanjkljivi podatki o obremenitvah prispevne površine. Nepopolne so tudi meritve onesnaženja jezera. Zaradi pomanjkanja podatkov o spreminjanju dotoka med letom srednji zadrževalni čas ne kaže povsem natančnih vrednosti. Pri izračunu je podana povprečna vrednost pretoka med letom (18 m³/s).

V preglednici 4 so prikazana razmerja med koncentracijami hranilnih snovi v dotokih in iztoku. V primeru, da je razmerje N : P večje kot 7, se fosfor šteje kot limitirajoči element za rast alg. Razmerje N : P je na iztoku manjše kot na dotoku, kar pomeni, da se v sistemu jezera bolj intenzivno porablja dušik kot fosfor. Razmerje med celokupnim fosforjem in ortofosfatom ter med nitrati in celokupnim dušikom ostaja na iztoku približno enako kot na dotoku. Bistveno se zmanjša razmerje med amonijem in nitriti ter nitrati

	P_{tot}	ortoP	NH_4	NO_2	NO_3	N_{tot}
Redukcija (kg/leto)	20230	7951	107304	-6570	683559	268631
Čiščenje (%)	24	20	42	-30	38	40

Preglednica 3 • Letna redukcija hranil v Cerknjškem jezeru, izračunana glede na koncentracije snovi v dotoku in odtoku

Razmerja	$N_{tot}:P_{tot}$	$P_{tot}:ortoP$	$NH_4:NO_2$	$NO_3:NO_2$	$NO_3:N_{tot}$	$NO_3:NH_4$
dotok	7,87	2,06	11,65	82,16	2,76	7,05
iztok	6,30	1,97	5,16	38,95	2,79	7,55

Preglednica 4 • Razmerja med koncentracijami snovi na dotoku in iztoku

Stopnja trofiranosti	1	2	3a	3b	4	5
	oligotrofne	mezotrofne	evtrofne	evtrofne	politrofne	hipertrofne
			slojevite	neslojevite		
1.) Hidrografija	slojevite: holomiktično ali meromiktično			nestbilno slojevite (polimiktične)		
Srednja globina z (m)				3		
Maksimalna globina z (m)			< 20			
Srednji zadrževalni čas:						
$\bar{\tau} = \frac{\text{volumen jezera}}{\text{letni dotok}}$	1,92	0,25				
2.) Prispevno področje						
Volumski kvocient:						
$V_q = \frac{\text{prispevna površina}}{\text{volumen voda}}$		6	18	44		
(km ² *10 ⁶ m ⁻³)						
Površinski kvocient:						
$F_q = \frac{\text{prispevna površina}}{\text{površina voda}}$	10	27	63			
Delež gozda % v prispevnem podr.	≥ 80					
3.) Obremenitev						
$B = \frac{\text{populacijski ekvivalent}}{\text{volumen voda}}$		433	1370	3318		
(PE*10 ⁶ m ⁻³)						
Vnos N (gN/(m ² *a))	0,62					

Preglednica 5 • Izračuni evτροφnosti za klasifikacijo stoječih voda po hidroloških kriterijih

in nitriti. Zanimivo je, da so na iztoku večje koncentracije nitrata kot na dotoku, kar bi lahko razložili, da gre v primeru Cerkniškega jezera za samočiščenje, ki ne poteče do konca. Amonijev in nitritni dušik se oksidirata v nitratni dušik, ker je v vodi raztopljenega dovolj kisika.

Meritve tudi kažejo – predvsem za občasne nizke pritoke – relativno zelo visoke koncentracije hranil. Ob nizkem vodostaju so vode, ki se iztekajo v podzemlje, bolj onesnažene kot takrat, ko je polje poplavljen.

Najizrazitejše je to na pritoku Cerkniščica, na merilni postaji Karlovica, pred ponorno jamo. Tam so koncentracije hranil v času, ko jezero presahne (pod nadmorsko višino 548 m), nekajkrat višje od koncentracij v času, ko je jezero polno. Za 3-krat je višji BPK5, 1,7-krat so višje koncentracije skupnega dušika, 2,5-krat več je amonija, 17,2-krat več nitritov, 1,8-krat več nitratov, 5,4-krat več skupnega fosforja in 4,5-krat več ortofosfatov.

Prav tako smo vstavil podatke o Cerkniškem jezeru za klasifikacijo stoječih voda po nekaterih trofičnih kriterijih ((Panjan, 2004), (Ilič, 2008), (Drev, 2008)). V tem primeru lahko določimo le nekaj parametrov, saj ni znano razmerje volumen hipolimnija–volumen epilimnija, ker ju praktično ni oziroma ni stratificirano ... Tako smo določili le celotni fosfor, klorofil, pH, amonij in nitrate.

Iz preglednice 5 je razvidno, da se jezero uvršča od oligotrofne stopnje pa do politrofne stopnje, praktično pa ne doseže hipertrofne stopnje, razen za amonij.

Kisik doseže najnižjo vrednost avgusta, to je tudi mesec, ko je vodostaj jezera najnižji.

Od julija do septembra so praviloma dosežene najvišje koncentracije amonija, BPK5, KPK in suspendiranih snovi. To je posledica najnižjega vodostaja, najvišjih letnih temperatur in posledično najnižje koncentracije raztopljenega kisika v vodi. Kisik doseže najnižjo vrednost avgusta, to je tudi mesec, ko je vodostaj

jezera najnižji. V jezeru se kaže tudi trend upadanja koncentracij amonija in povišanje visokih koncentracij ortofosfata, medtem ko druge snovi v obdobju 1993–2003 ne kažejo določenega trenda.

Dušikove snovi se večinoma odstranijo s pomočjo mikroorganizmov in gredo v atmosfero, preostali del pa se vgradi v rastline in se kot organski dušik usede na dno. Fosfor, ki se usede na dno v partikulirani obliki, se povečini odstrani iz vodnega telesa z obarjanjem z magnezijevimi, železovimi in kalcijevimi ioni. Drugi del se vgradi v rastline.

Glede na letno količino odstranjenih hranil, ki smo jih izračunali, smo ocenili delež samočiščenja Cerkniškega jezera (Drev, 2008). Največji delež, približno 57 %, predstavlja usedanje suspendiranih snovi. Naslednji večji delež, ca. 33 % za fosfor in ca. 18 % za dušik, se odstrani skozi rastline. Nato predstavlja okoli 17 % denitrifikacija. Skozi alge pa se izloči ca. 10 % fosforja in ca. 7 % dušika.

Stopnja trofiranosti	1	2	3a	3b	4	5
	oligotrofne	mezotrofne	evtrofne	evtrofne	politrofne	hipertrofne
			slojevite	neslojevite		
Celotni fosfat – P (mg/l) ⁴	0,008	0,037	0,07			
Klorofil-a ⁶⁶⁵ (mg/m ³)	1,5					
pH-vrednost v epilimniju		7,7 - 8,2				
Amonij v epilimniju NH ₄ ⁺ (mg/l)			0,4	0,01	0,4	
Nitrat NO ₃ ⁻ :						
– maks. konc. (mg/l)	6,9					
– povpr. letna konc. (mg/l)	2,04					

Preglednica 6 • Izračuni evtrofnosti s pomočjo preglednice za klasifikacijo stoječih voda po trofičnih kriterijih

4 • SKLEP

Primer Cerkniškega jezera je zelo zahteven za raziskave, predvsem zaradi kraškega značaja dna jezera, ki onemogoča natančno določanje prispevne površine, dotoka in odtoka. Vsakršno računanje je zahtevno, saj je Cerkniško jezero vsak dan drugo jezero, z drugačnim volumnom, površino in globino. Samočistilne sposobnosti sistema Cerkniškega jezera se spreminjajo glede na velikost jezera. V času, ko je jezero presušeno, odteka voda iz najbolj obremenjenega vodotoka – Cerkniščice, neposredno v kraško podtalje brez čiščenja v jezerskem

sistemu, koncentracije hranil pa so nekajkrat večje kot v času, ko je jezero polno. V času, ko je jezero polno, se voda »razredči« in zmeša s preostalo, manj obremenjeno vodo.

Glede na izračune skozi Cerkniško jezero letno potuje 300 do 600 ton dušika in 40 do 80 ton fosforja (Drev, 2009). Od tega se od 20 do 45 % hranil zadrži v jezeru, odvisno predvsem od višine vodostaja in letnega časa. Najbolj se odstrani oziroma transformira amonij, ki se v povprečju odstrani za okoli 40 %. Amonij se preobrazi v nitrate, ki kažejo – v primerjavi z

dotoki v jezeru – 30-odstotno povečanje. To je posledica kratkega časa zadrževanja v jezeru, zaradi česar denitrifikacija ne poteče v celoti. Ekosistem slabše odstranjuje fosforjeve snovi kot dušikove. Tla se namreč zasitijo z ortofosfatnimi ioni. To je verjetno predvsem zaradi možnosti denitrifikacije in hlapnosti amonijaka, medtem ko se lahko fosforjeve snovi trajno odstranjujejo edino skozi požeto rastlinje.

Ocenili smo deleže samočiščenja Cerkniškega jezera. Največji delež, približno 57 %, predstavlja usedanje suspendiranih snovi. Naslednji večji delež, ca. 33 % za fosfor in ca. 18 % za dušik, se odstrani skozi rastline in okoli 17 % z denitrifikacijo. Skozi alge pa se izloči (usede) ca. 10 % fosforja in ca. 7 % dušika.

5 • LITERATURA

- Drev, D., Slane, M., Panjan, J., Die Untersuchung über die ländlichen Badegewässer und entsprechenden Massnahmen zu deren verbesserung in Sloweinien, *Wasserwirtschaft* 98, 12/2008, str. 36-40, 2008.
- Drev, D., Kovač, M., Panjan, J., Ocena masnih obremenitev Cerkniškega jezera s hranili, *Gradbeni vestnik*, letnik 58, št. 5, str. 114–122, 2009.
- Gaberščik, A., *Jezero, ki izginja*, Monografija o Cerkniškem jezeru, Društvo ekologov Slovenije, Ljubljana, 333 strani, 2002.
- Ilič, D., Panjan, J., Ocena vpliva fosforja iz kmetijstva na evtrofikacijo površinskih voda v Krajinskem parku Goričko, *Gradbeni vestnik*, letnik 57, str. 310–316, 2008.
- Kovač, M., Preliminarna ocena samočistilne sposobnosti odstranjevanja dušika in fosforja v cerkniškem jezeru, UL FGG, diplomsko delo, 71 strani, 2005.
- Mander, U., Jenssen, P., *Constructed Wetlands for Wastewater Treatment in Cold Climates*, WIT Press, 2003.
- Merrington, G., Winder, L., Parkinson, R., Redman, M., *Agricultural pollution, Environmental problems and practical solutions*, Spon press, 2002.
- Moss, B., *Ecology of fresh waters*, Blackwell Science, 1998.
- Panjan, J., *Osnove zaščite voda*, UL FGG, 102 strani, 2004.
- Valsami-Jones, E., *Phosphorus in Environmental Technologies*, IWA Publishing, Cornwall, UK, 656 strani, 2004.
- ARSO, Program monitoringa kakovosti jezer za leto 2003, 2003.