

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).

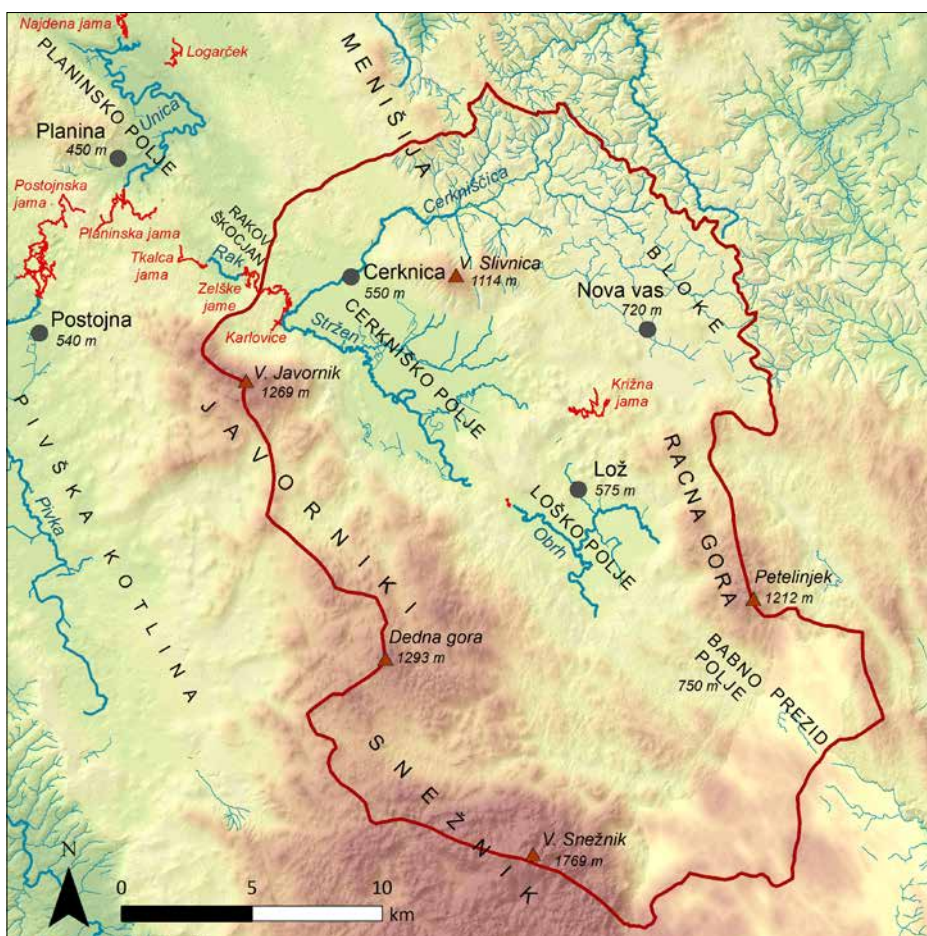
Vse te raziskave so pokazale, da je napajanje Cerknškega polja zaradi številnih dotokov in odtokov zelo zapleteno. K še večji kompleksnosti so prispevali raznoliki človekovi posegi, ki so zaradi različnih interesov pogosto sami sebi nasprotujoči in kljub želji po boljšem nadzoru nad poplavljanjem kažejo 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).

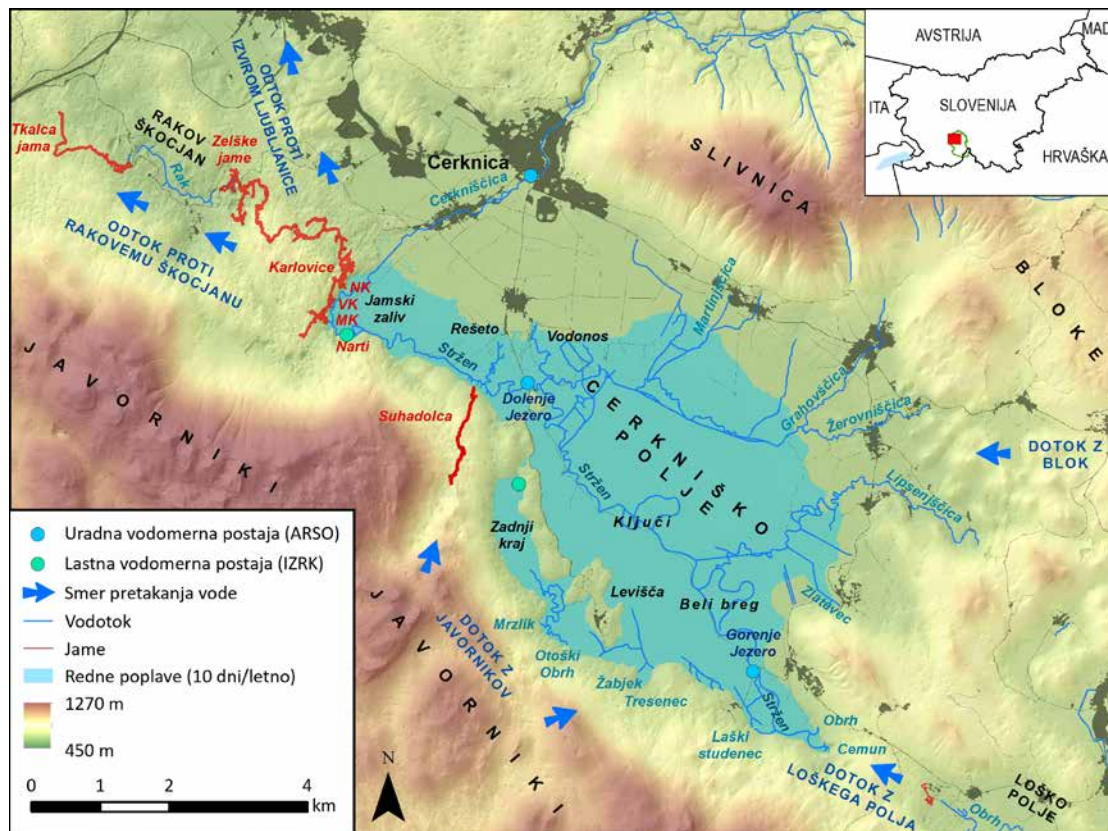
Občasne dotoke vode na Cerkniško polje predstavljajo tudi estavele v Zadnjem kraju (slika 5). Estavele so kraški pojavi z dvojno vlogo – po intenzivnih padavinah te delujejo kot izviri, v času upadanja vodostaja pa kot požiralniki (Kranjc, 2002a).

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).



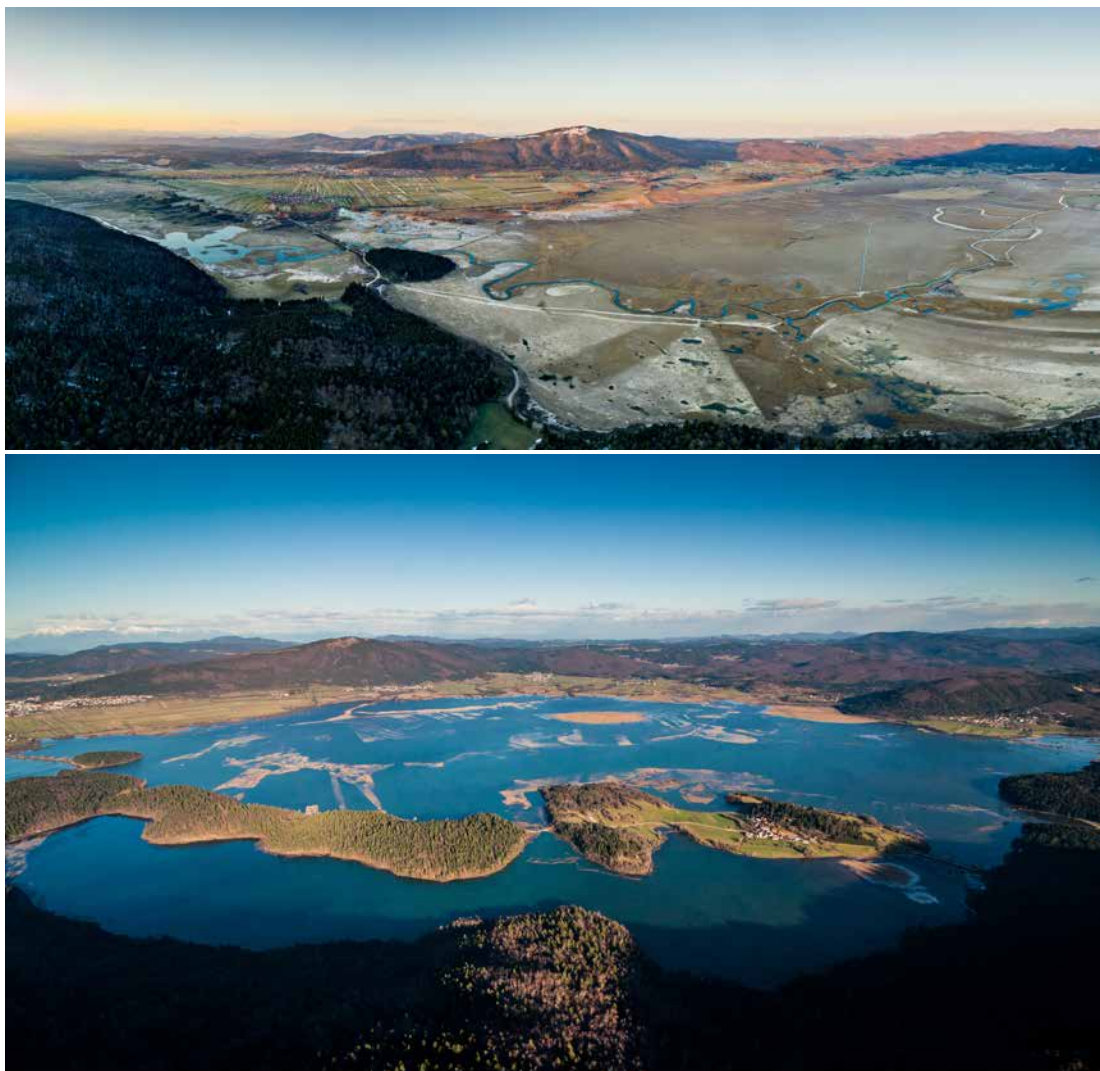
Slika 4: Levo izvir Suhadolce ob visokih vodah in delni zaledenitvi jezera, desno ponorno območje Jamski zaliv z vhodom v Veliko Karlovico, kamor prek kanalizirane struge dotekata Stržen (dotok z leve) in Cerkniščica (dotok z desne) (foto: Matej Blatnik).



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: Cerkniško 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).

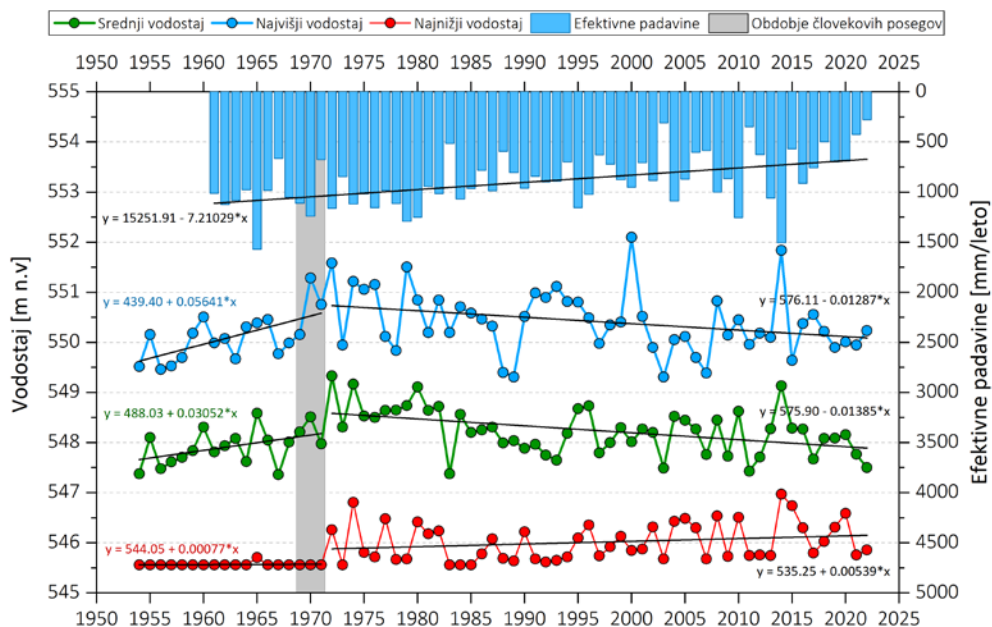
Dinamika vodostajev, pretokov in temperature vode

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).

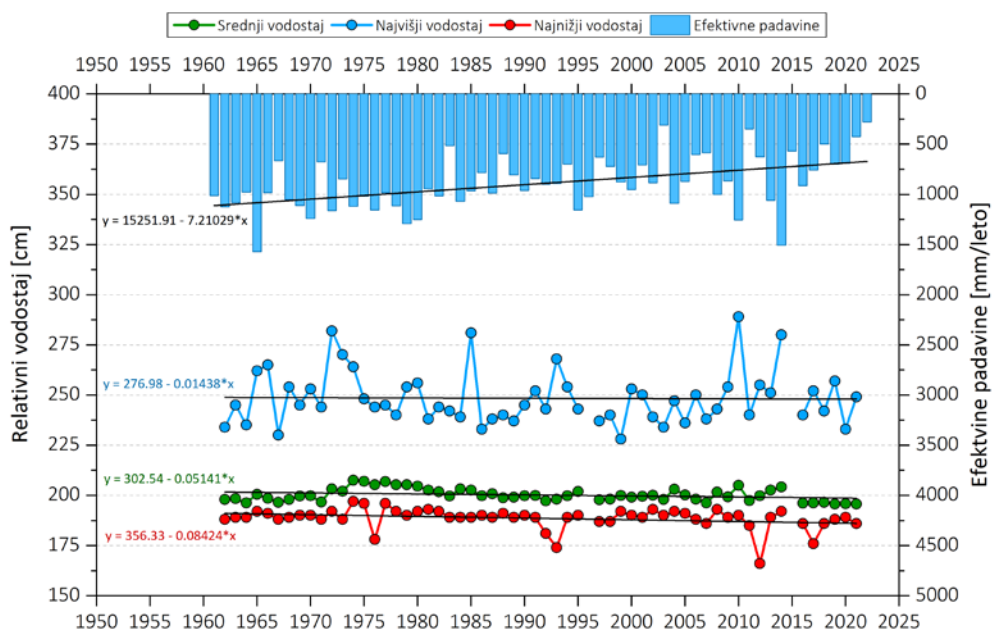
Najvišji letni vodostaji so se gibali od 549,31 m (kar ustreza 8 milijonom m³ uskladiščene vode) v letih 1989 in 2003 do 552,1 m (71 milijonov m³ uskladiščene vode) leta 2000. Do leta 1971 je bil linearni trend pozitiven in je kazal stopnjo naraščanja +56 cm v 10 letih, po letu 1971 pa negativen s hitrostjo 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).

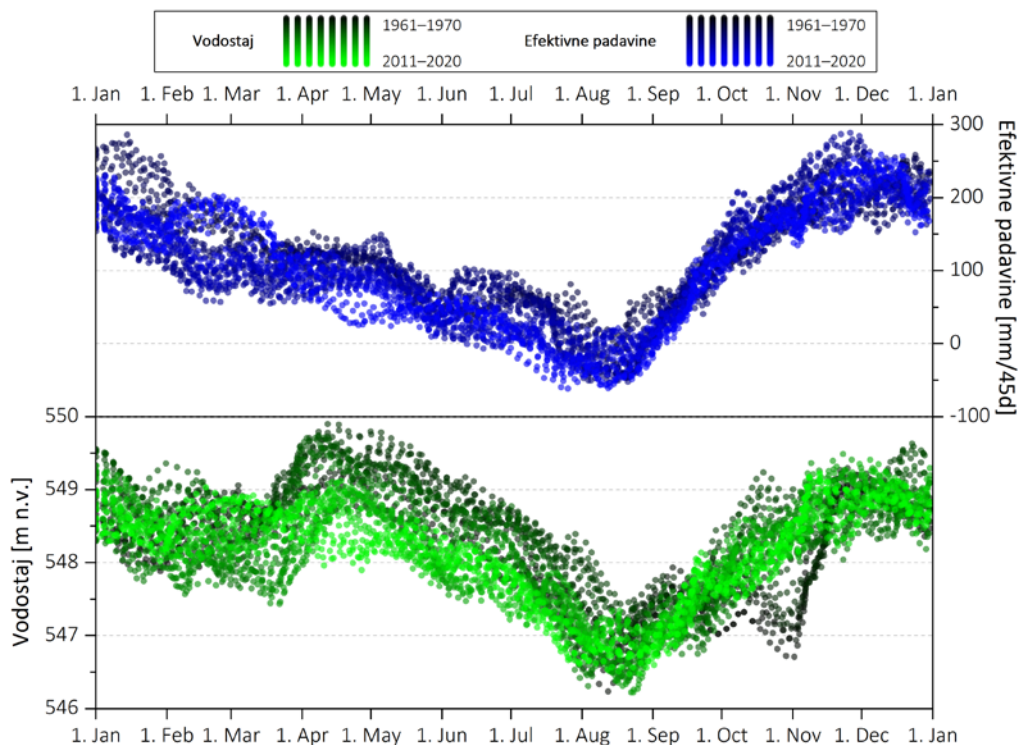


Slika 9: Srednji, najvišji in najnižji vodostaji za posamezna leta in izračunani trendi (črne črte z enačbami) za hidrološko postajo na Cerkniščici v obdobju 1961–2022.

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.

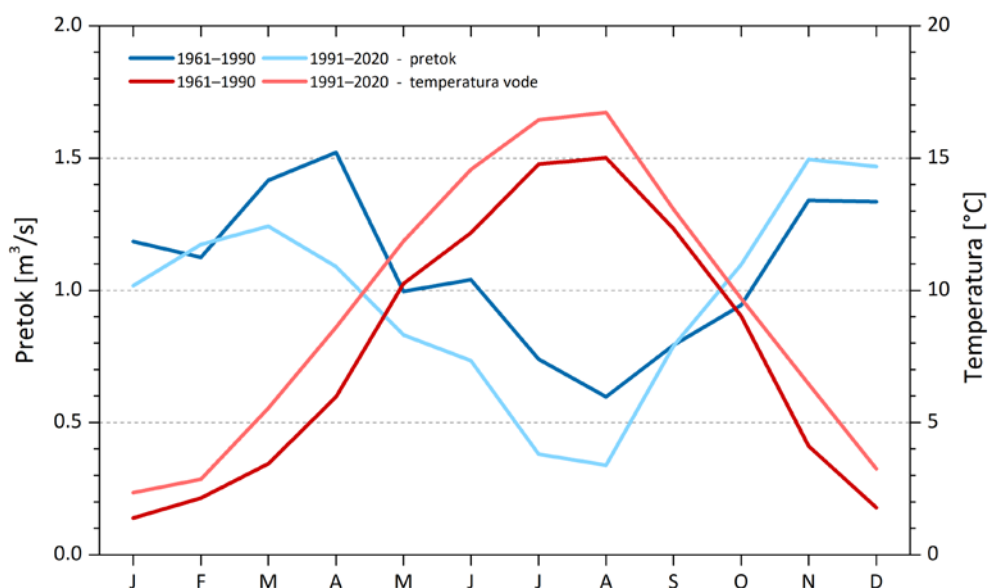


Slika 10: Sezonska porazdelitev efektivnih padavin (modre točke) in vodostaja (zeleni točke) na vodomerni postaji Dolenje Jezero po desetletjih v obdobju 1961–2020.

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.

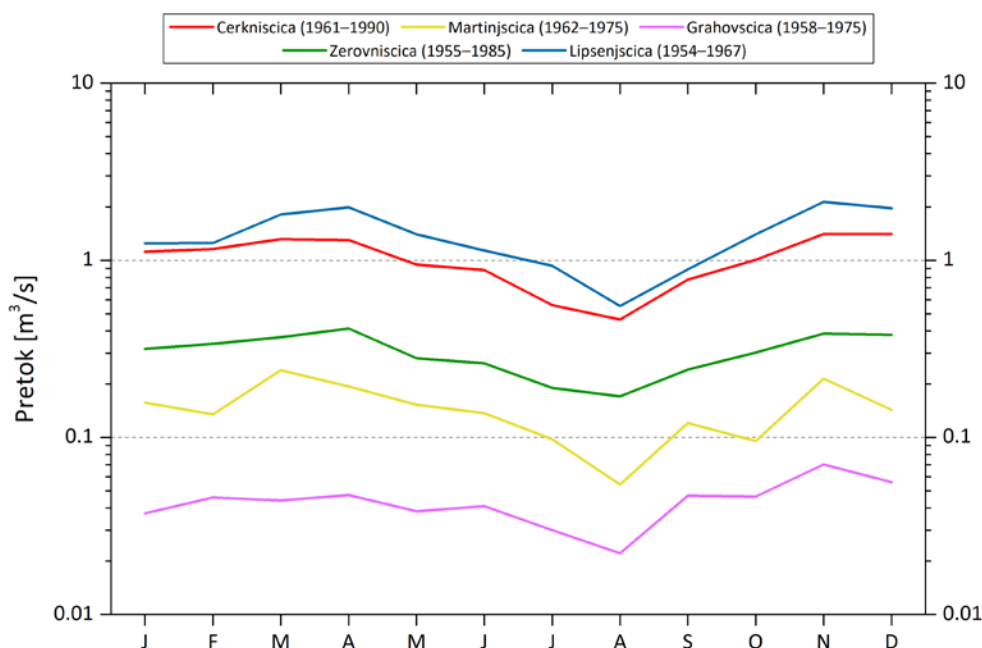
Letna dinamika vodostaja in pretoka Cerkniščice je podobna kot dinamika vodostaja na Cerkniškem jezeru. V dveh referenčnih obdobjih (1961–1990 in 1991–2020) so bili največji pretoki Cerkniščice pozno jeseni in spomladi, najmanjši pa poleti. Medsebojna primerjava obeh referenčnih obdobji kaže, da so bili 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

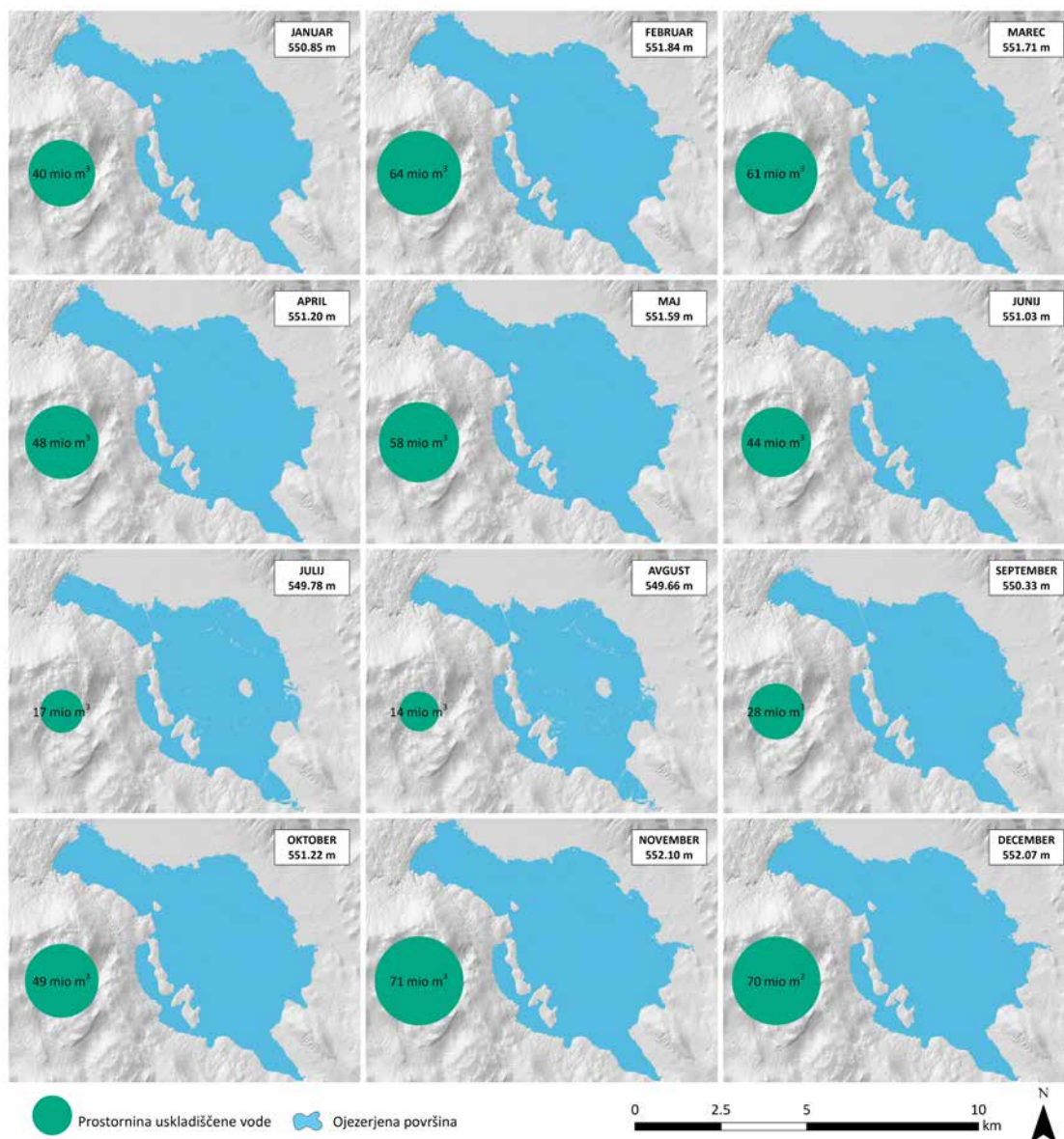
Najvišji vodostaji za posamezne mesece imajo podobno porazdelitev kot srednji. Ti so bili izmerjeni pozno jeseni (november, december) in spomladi (od februarja do maja) (slika 13). Jeseni, pozimi in spomladi so bili najvišji vodostaji večinoma zabeleženi po letu 2000, kar kaže na to, da so tovrstni ekstremi 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

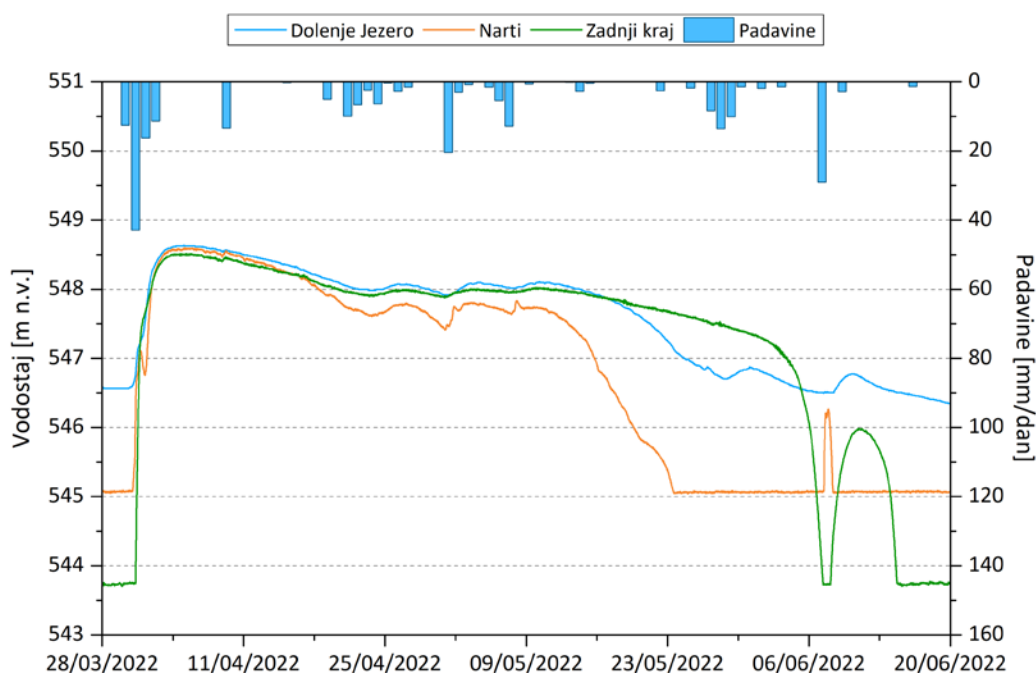
(konec aprila, maja in v začetku junija 2022 na sliki 14) se razlika v gladini vode vse bolj povečuje in v času najnižjih vod znaša tudi do 2,5 m. V tem obdobju jezero tudi presahne, tako da se voda vrne v strugo Stržena.



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 Drvošcem in Otokom. Smer toka vode je namreč odvisna od tega, ali je vodna gladina v Zadnjem kraju višja ali nižja.

Geokemične značilnosti vode

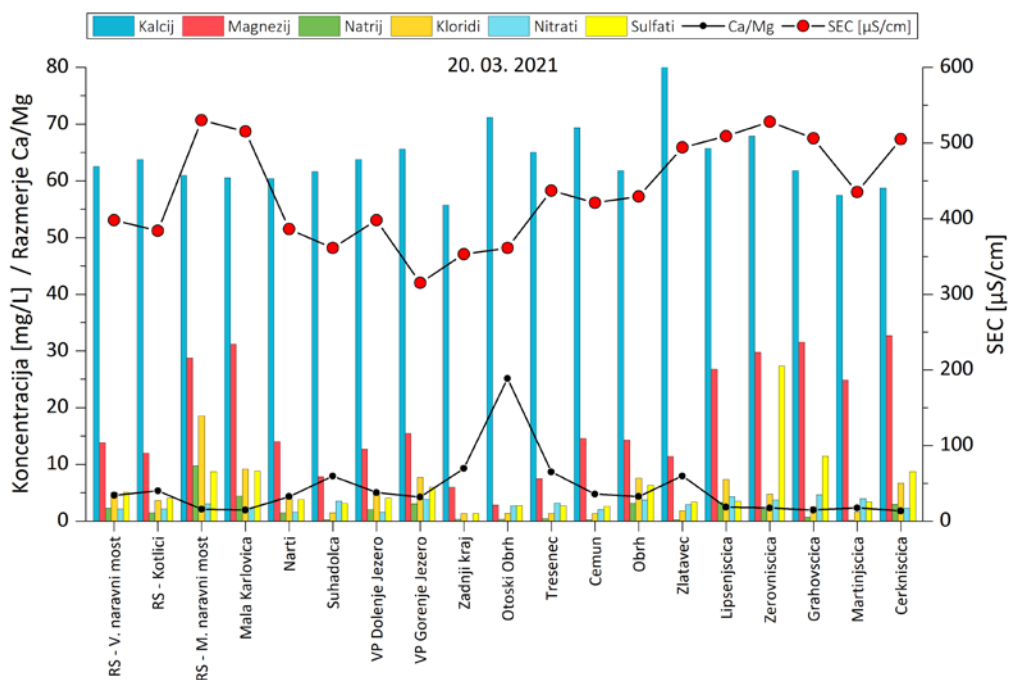
Časovna in prostorska dinamika vodostajev se zaradi različnega zaledja izvirov odraža tudi v spremenljivosti geokemične lastnosti vode. Največji vpliv nanjo ima različna geološka sestava zaledij izvirov (na vzhodnem delu hidrološkega zaledja je predvsem dolomitna, na preostalem območju pa apnenčasta), 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).

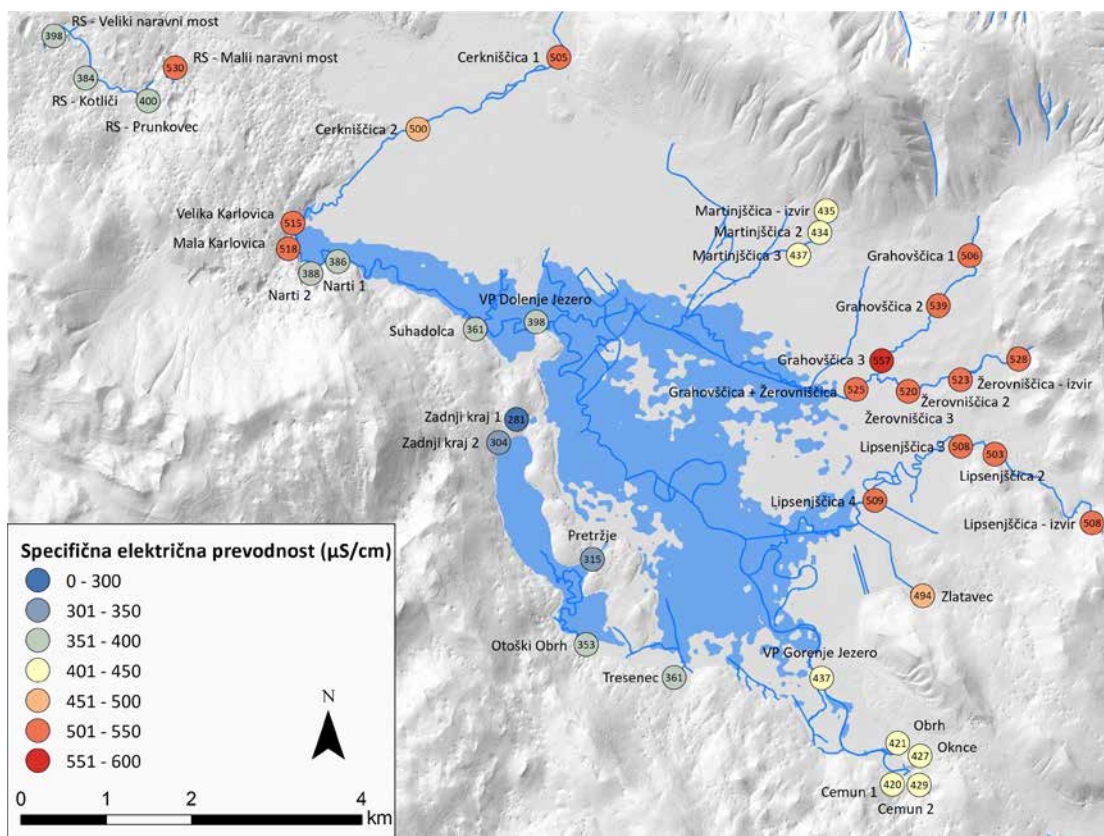
Natrij in kloridi imajo zelo podobno nihanje v koncentracijah na skoraj vseh obravnavanih mestih (Pearsonov koeficient korelacije med njima je 0,99). Koncentracije obeh so na vseh vzorčnih mestih relativno majhne (pod 5 mg/l za natrij in pod 10 mg/l za kloride), večje ali manjše relativne vrednosti pa 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.

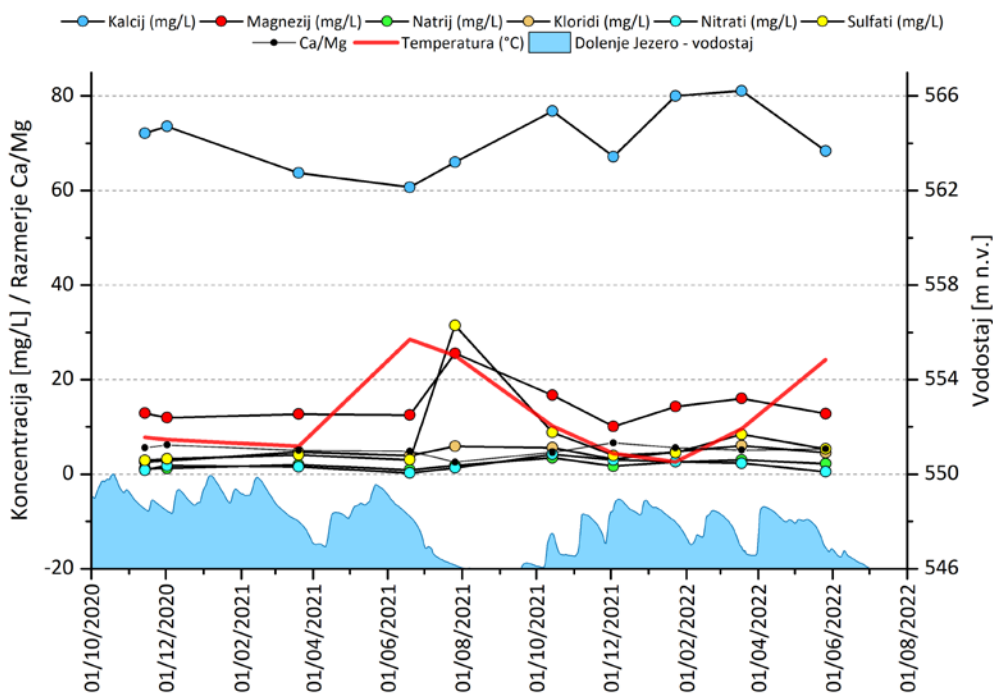


Slika 15: Lastnosti vode na obrobju Cerkniškega polja in Rakovega Škocjana dne 20. 3. 2021. SEC – specifična električna prevodnost.

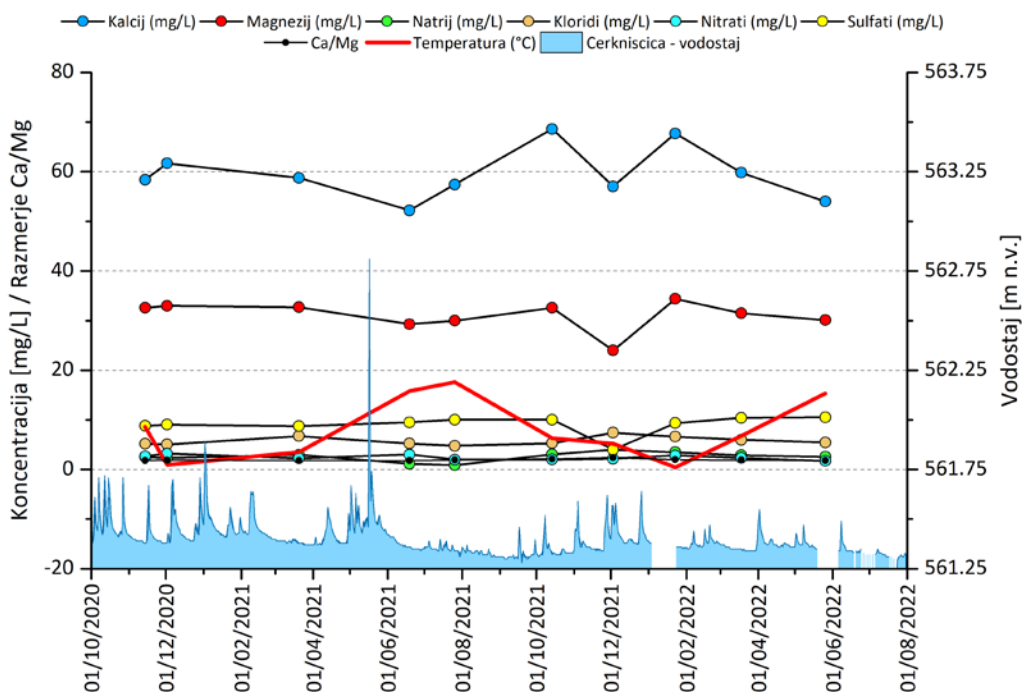


Slika 16: Ročne meritve električne prevodnosti na dotokih in ponornih območjih Cerkniškega polja in dolvodno ležečega Rakovega Škocjana na dan 20. 3. 2021.

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.

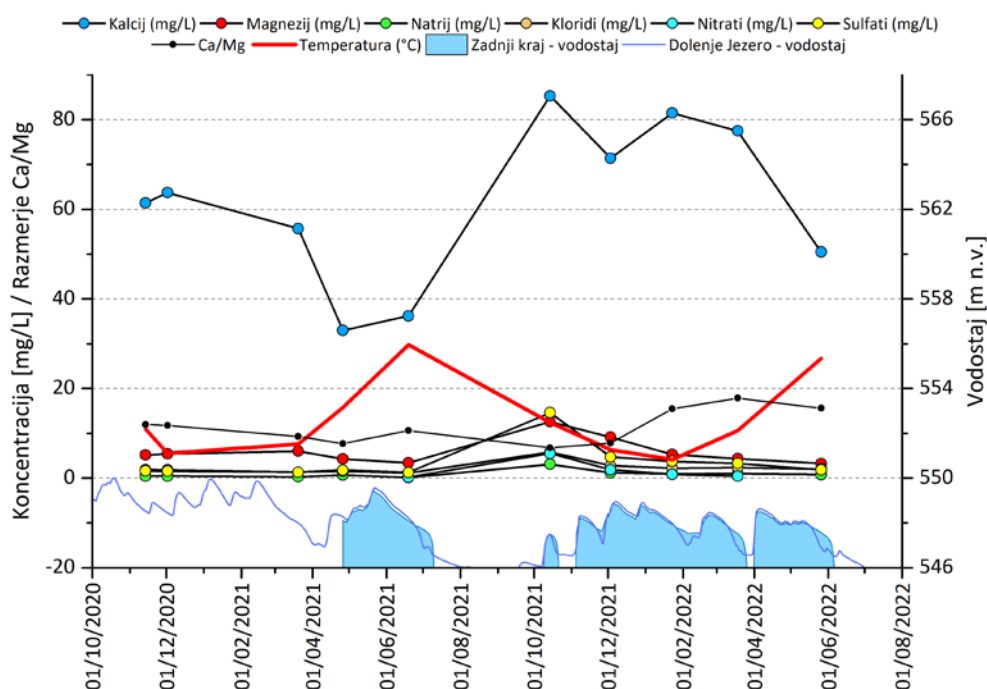


Slika 18: Sezonske spremembe izbranih lastnosti vode Cerkniščice.

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.

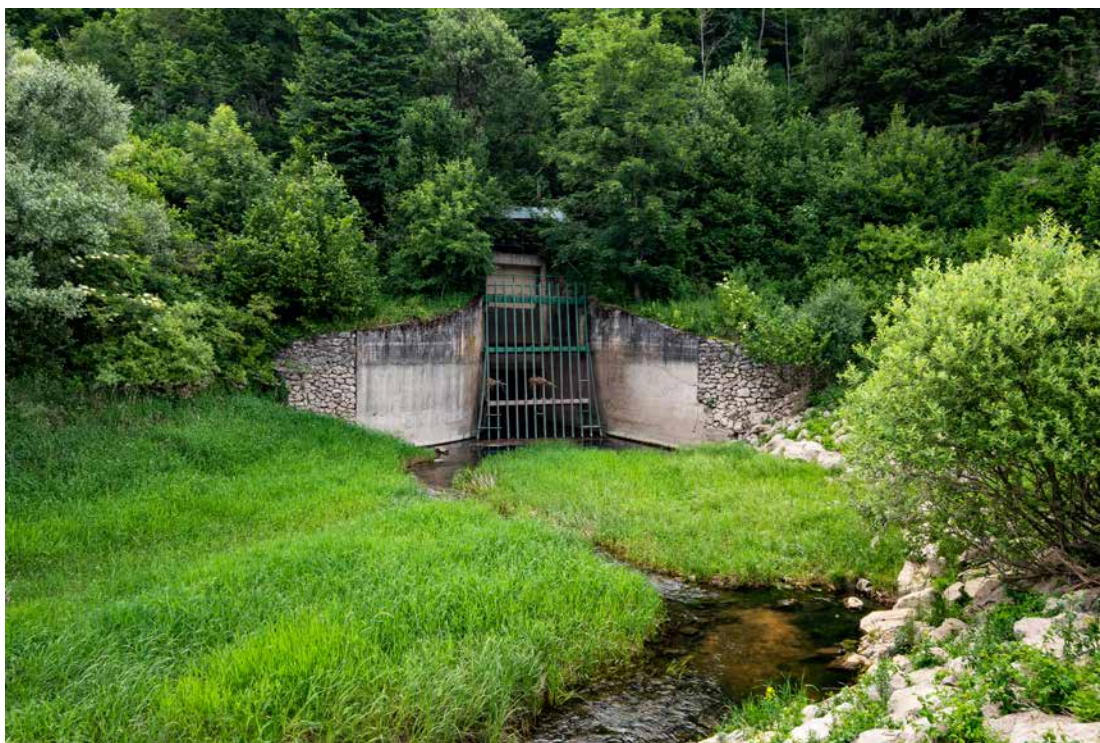
V Zadnjem kraju (slika 19) so najbolj opazna nihanja v koncentracijah kalcija. Najmanjše so bile zaznane pozno spomladi, največje (skoraj dvakratne) pa jeseni in pozimi. V obeh primerih so bili vodostaji relativno visoki, tako da višina vode tu ni imela neposrednega vpliva. V poletnem sušnem obdobju 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: Sezonske 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

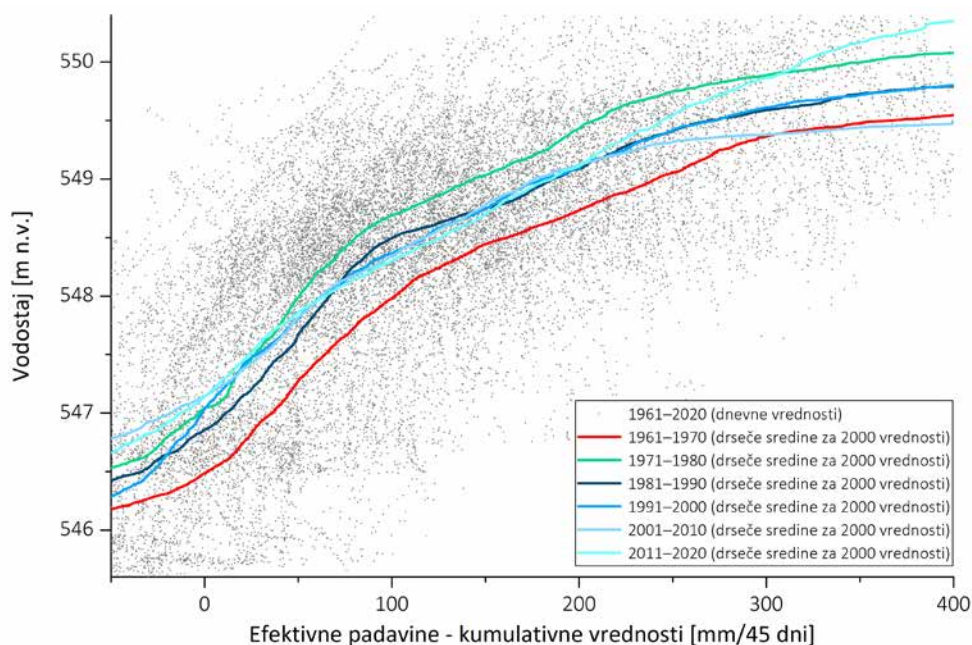
Habič (1974) je že v času poskusne ojezeritve Cerkniškega polja poskusil ovrednotiti človekove posege na polju, najbolj pa ga je zanimal učinek posegov opravljenih ob koncu 60-ih let 20. stoletja. Ocena je bila napravljena na podlagi večkratne izmere pretoka Raka v Rakovem Škocjanu, ki naj bi odražal 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 odtekanje 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 krask ZRC SAZU.