

# UTJECAJ HIDROTEHNIČKIH ZAHVATA NA VODNI REŽIM BAĆINSKIH JEZERA

**dr. sc. Ognjen Bonacci,**  
**prof. emer.**  
Sveučilište u Splitu,  
Fakultet građevinarstva,  
arhitekture i geodezije  
Matice hrvatske 15,  
Split, Hrvatska  
e-mail: obonacci@gradst.hr

**dr. sc. Tanja Roje-Bonacci,**  
**prof. emer.**  
Sveučilište u Splitu  
Fakultet građevinarstva,  
arhitekture i geodezije  
Matice hrvatske 15,  
Split, Hrvatska

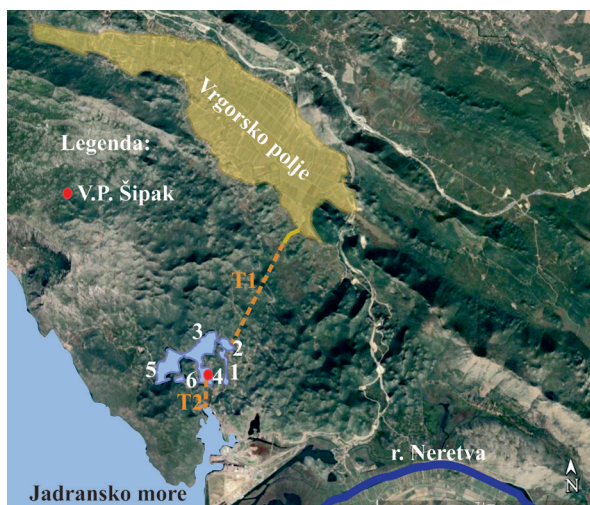
Analizirani su karakteristični (minimalni, srednji, maksimalni) dnevni, mjesečni i godišnji vodostaji opaženi na vodomjeru Šipak, locirani u jezeru Sladinac, jednom od pet povezanih jezera (Plitko, Podgora, Očuša, Sladinac, Crniševo) i jednom nepovezanim jezeru (Vrbnik) u sustavu Baćinskih jezera. Na raspolaganju je stajao niz dnevnih vodostaja od 1. siječnja 1923. do 31. prosinca 2018., s prekidima od 1. listopada 1942. do 31. lipanja 1945. te od 1. siječnja 1959. do 31. prosinca 1972. Analize su usredotočene na to da se kvantificira utjecaj antropogenih zahvata na vodni režim sustava Baćinskih jezera. Tunel Krotuše, kojim se evakuiraju poplavne vode iz Vrgorskog polja te upuštaju u sustav Baćinskih jezera, počeo je s radom 21. studenog 1938. Rekonstruiran je u nekoliko navrata, najopsežnije krajem 1973. godine. Tunel koji iz Baćinskih jezera u Jadransko more evakuira vodu pušten je u rad krajem 1912. Radovi na njegovom proširenju vršeni su u razdoblju od kraja 1938. godine do početka 1940. U razdoblju 1982.-1993. iz ulaza u ovaj tunel uklonjen je prag visine 80 cm koji je sprječavao prodor morske vode u sustav jezera tijekom plima. Detaljnim statističkim analizama zasnovanim na primjeni F- testa (Markowski i Markowski, 1990.) i t- testa (Machiwal i Jha, 2008.) ustanovljen je utjecaj svakog od pojedinih navedenih zahvata na promjenu vodnog režima sustava Baćinskih jezera na vremenskoj skali godine i mjeseca. Utvrđeno je kontinuirano opadanje srednjih godišnjih razina vode mjerenih na vodikazu Šipak. Uočen je stalni porast maksimalnih godišnjih vodostaja.

**Ključne riječi:** hidrologija, vodostaj, antropogeni utjecaj, Baćinska jezera

## 1. UVOD

Jezeru u dubokom Dinarskom kršu, ali i u drugim krškim regijama planete, relativno su rijetka pojava, prvenstveno zbog toga što je površina terena izgrađena od karbonatnih naslaga značajno propusnija nego u područjima pokrivenim drugim vrstama stijena. Takove rijetke i vrijedne mase slatke vode u kršu potrebno je

osobito brižno štiti. Posebno se to odnosi na slučajeve kad se one nalaze u neposrednoj blizini mora, te su stoga potencijalno ugrožena od prodora slane vode. Upravo takav slučaj predstavlja sustav Baćinskih jezera udaljen od Jadranskog mora u manje od jedan kilometar (slika 1).



Slika 1: Karta šireg područja Baćinskih jezera (1-Plitko jezero; 2-jezero Podgora; 3- jezero Očuša; 4-jezero Sladinac; 5-jezero Crniševo; 6-jezero Vrbnik)

Sustav Baćinskih jezera (slika 1) formiran je od šest jezera lociranih u mjestu Bačina, nedaleko grada Ploče, na desnoj obali ušća rijeke Neretve. Radi se o šest slatkom vodom ispunjenih nepravilnih krških depresija. Pošto im se dno nalazi ispod razine Jadranskog mora radi se o kriptodepresijama. Svrstana su među najzanimljivije pojave u hidrografiji krša, jer su nepravilnog oblika, što se osobito odražava na reljefu njihovog dna. Ova jezera predstavljaju akumulacijske prostore koji su denudacijska baza svih padinskih procesa s okolnih brdskih uzvišenja jugoistočnog dijela gorskog hrpta Rilića (Curić, 1995.; Smirčić i sur., 1995.). Sljedećih pet, od ukupno šest Baćinskih jezera, međusobno su spojena površinskim vezama: (1) Plitko, označeno brojem 1 na slici 1; (2) Podgora, označeno brojem 2 na slici 1; (3) Očuša, označeno brojem 3 na slici 1; (4) Sladinac, označeno brojem 4 na slici 1; (5) Crniševo, označeno brojem 5 na slici 1. Šesto jezero Vrbnik (označeno brojem 6 na slici 1) nema površinskog kontakta s ostalim jezerima, ali pripada istom hidrogeološkom sustavu krškog vodonosnika. Curić (1988./1989.) ovo jezero naziva Vrbnik.

Prirodno stanje sustava je postojalo sve do kraja 1912. godine kada je od jezera Sladinac do Jadranskog mora prokopan tunel duljine 124 m i kanal duljine 576 m (Smirčić i sur., 1995.). Svrha izgradnje je bila sprječavanje poplava. U prirodnom stanju maksimalni vodostaj u jezerima dosegao je i do 8 m nad morem (mnm). Nažalost, mjerenih podataka za prirodno, tj. antropogenim zahvatima neporemećeno razdoblje nema.

Ulazni portal tunela nalazi se na južnom rubu jezera Sladinac, koje je najbliže moru, udaljeno oko 700 m. Na ulaznom dijelu tunela izgrađena je ljevkaasta građevina, a na granici jezera i ulazne građevine izgrađen je preljevni prag sa krunom na koti 0,80 m iznad srednje razine mora. Uloga tog praga je sprječavanje prodora morske vode u Baćinska jezera tijekom visokih plima. Na tunel se nastavlja spojni kanal Baćinska jezera - Jadransko more, projektiran na maksimalnu protoku od 70 m<sup>3</sup>/s. U tablici 1 (Bonacci i Švonja, 1984.) izneseni su podatci o površinama vodnih lica A, volumenima vode V za dvije razine vode u njima. U posljednjem stupcu navedene su vrijednosti maksimalnih dubina vode  $H_{maks}$  u jezerima prema podacima iznesenim u radu Curić (1988./1989.). Po površini je najveće jezero Očuša, dok je najdublje jezero Crniševo. Vrbnik je najmanje jezero i jedino nije površinski povezano s ostalim jezerima. Treba napomenuti da je u literaturi moguće naići i na nešto drugačije podatke o maksimalnim dubinama vode.

Paleolimnološkim istraživanjima jezgri sedimenata iz najdubljeg jezera Crniševa rekonstruirani su paleookolišni uvjeti u posljednjih 12.000 godina (Ilijanić i sur., 2015; Miko i Ilijanić, 2015.; Ilijanić i sur., 2017.). Analizom jezgri sedimenta iz jezera Podgora i Sladinac, koja su povezana tunelima s Vrgoračkim poljem i morem, autori su utvrdili prirodni razvoj i antropogene utjecaje u Baćinskim jezerima. Njihovim istraživanjima je ustanovljeno da je jezero Crniševo formirano u pleistocenu. Tijekom holocena prošlo je kroz faze dubokog i plitkog jezera. Na osnovu analiza potkapina sedre uz obalu jezera zaključili su da je isto moglo biti najviše 9 m dublje nego danas. U ranom holocenu,

Tablica 1: Podatci o površinama vodnih lica A, volumenu vode u jezerima V za dvije razine vode H (Bonacci i Švonja, 1984.) i maksimalne dubine jezera  $h_{maks}$  (Curić, 1988./1989.)

Naziv jezera	H = 0,75 mnm		H = 2,50 mnm		$h_{maks}^*$ (m)
	A (ha)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	A (ha)	V (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	
Plitko	9,90	1,65	19,82	4,25	5
Podgora	11,74	7,27	15,33	9,64	10
Očuša	55,23	70,09	62,84	80,43	18
Sladinac	18,00	18,90	20,74	22,29	16
Crniševo	43,94	73,10	50,25	81,34	31
Vrbnik	A = 3,1 ha *				8

\*prema Curić (1988./1989.)

jezero Crniševo karakterizirano je većim donosom materijala iz sliva. Analize minerala gline iz Vrgorskog polja i u jezerima Podgora (danas tunelom spojenog s Vrgorskim poljem) i Sladinac (danas spojenim tunelom i kanalom s morem) ukazuje na povezanost Vrgorskog polja i Bačinskih jezera ponorima u prošlosti. Miko i Ilijanić (2015.) zaključuju da su intenzivne promjene u Bačinskim jezerima tijekom posljednjih 4.500 godina u skladu s klimatskim promjenama koje su se odvijale u tom razdoblju.

Počevši od 1983. godine, tijekom razdoblja od 10 godina opažane su batimetrijske promjene i neke geološke značajke dna Bačinskih jezera (Smirčić i sur., 1995.). Izmjera dna obavljala se na devet poprečnih presjeka u predjelu jezera Podgora i Očuša. Sondiranje uzoraka obavljeno je na devet lokacija. Utvrđeno je smanjenje dubina jezera. Kao razlog se navodi porast dotoka nanosa vodama koje u jezera dotječu tunelom Krotuša iz Vrgorskog polja. Razlike dubina tijekom deset godišnjih kontrolnih premjera pokazale su raznolike vrijednosti. One variraju od 10 cm do 50 cm i različitog su predznaka u istim točkama premjera. Do ovoga dolazi kao posljedica hidrodinamičkih procesa koji vrše premještanje nekonsolidiranog sekundarnoga nanosa.

U razdoblju 2010.–2012. godine ispitivana je kakvoća vode jezera Crniševo primjenom indeksa kvalitete vode (Tomas i sur., 2013.). Indeks kvalitete vode (WQI) predstavlja matematički alat kojim se veliki broj podataka pretvara u pojedinačnu vrijednost koja opisuje kakvoću vode. Prema Piperovom dijagramu (Piper, 1944.) voda jezera Crniševo je karbonatnog tipa. Vrijednosti pH kretale su se u rasponu od 8,0 do 8,4. Mjerenja izvršena tijekom 2011. godine pokazala su da je njena kakvoća bila loša i nepovoljna za piće.

Zbog blizine mora i zbog činjenice da su Bačinska jezera kriptodepresija, važno je pratiti slanost njihovih voda. U razdoblju 2011.–2018. vršeno je mjerenje klorida u jezeru Crniševo. U navedenom razdoblju količina klorida varirala je od minimalno 6 mg/L do maksimalno 841 mg/L s prosječnom vrijednosti od 462 mg/L (Rubinić i sur., 2019.). Sadržaj klorida u Bačinskim jezerima izravno zavisi o stanju dotoka vode iz Vrgorskog polja kroz tunel Krotuša, kao i o lokaciji jezera u prostoru, a prije svega udaljenosti od mora i vezi s vodama koje iz tunela dolaze u sustav jezera.

Klima na analiziranom području je tipična mediteranska s toplim i sušnim ljetima i blagim i vlažnim zimama (Filipčić, 1989.). Godišnje količine oborina jako variraju te se kreću između minimalnih 700 mm i maksimalnih 1800 mm, s prosječnom vrijednosti od oko 1300 mm. Nije opažen statistički značajan trend opadanja vrijednosti godišnjih oborina. Najmanje oborina javlja se u razdoblju od lipnja do kolovoza, s izrazitim minimumom u srpnju. Najviše oborina padne u razdoblju od listopada do prosinca s izrazitim maksimumom u studenom.

Prosječna godišnja temperatura zraka varirala je u prethodnih pedesetak godina između 15 °C i 17 °C. Kao posljedica globalnog zagrijavanja i na ovom je području uočen porast temperatura zraka, osobito od sredine osamdesetih godina prošlog stoljeća (Bonacci, 2010.). Za očekivati je da u narednom razdoblju srednje godišnje temperature zraka neće pasti ispod 17 °C, a realno je očekivati njihov porast za najmanje 1 °C. Minimalne se temperature javljaju u siječnju. Srednje mjesečne temperature varirale su u siječnju između 4 °C i 10 °C s prosječnom vrijednosti od oko 7 °C. Temperature zraka niže od 0 °C javljaju se vrlo rijetko. Najviše temperature zraka javljaju se u srpnju i kolovoza kada srednje mjesečne temperature zraka prelaze 28 °C. U posljednjih dvadesetak godina uočen je porast broja toplih (s pojavom temperatura zraka viših od 25 °C) i vrućih (s pojavom temperatura zraka viših od 30 °C) dana. Porast temperatura zraka u regiji i na analiziranom lokalitetu Bačinskih jezera zasigurno će imati utjecaja na njihov vodni režim. Kao posljedica globalnog zagrijavanja isparavanje s površine vodnih lica jezera bit će povećano, a prihranjivanje podzemnih voda smanjeno. Realno je očekivati snižavanje razine vode u jezerima, osobito tijekom toplog i sušnog razdoblja.

Dana 21. studenog 1938. pušten je u rad tunel Krotuša duljine 2138 m iz Vrgorskog polja u jezero Podgora. Izgradnjom tog tunela željele su se eliminirati poplave u Vrgorskom polju koje su trajale od šest do devet mjeseci, što je onemogućavalo stabilnu (često i bilo kakvu) poljoprivrednu proizvodnju u ovom plodnom krškom polju. U tunelu Krotuša ne postoje objekti za regulaciju protoka. Zbog toga količina vode koja se kroz njega evakuira u prostor Bačinskih jezera ovisi isključivo o razini vode u polju. Dodatni radovi na uređenju odvodnog sustava polja poduzeti su 1945.–1946. koji su rezultirali spajanjem tunela s rijekom Maticom prokopavanjem sedla Prigon. Snižavanjem dna ulaznog portala tunela u razdoblju 1957.–1958. utjecalo se na smanjenje visina i trajanje poplava u polju (Margeta i Knezić, 2001.). Prethodno navedenim radovima razina poplava u Vrgorskom polju smanjena je u prosjeku za 3 m (Bonacci, 1986.; 1987.; 2013.). S ciljem povećanja maksimalnih protočnih kapaciteta tunela s nešto manje od 30 m<sup>3</sup>/s na 44 m<sup>3</sup>/s tijekom 1973. godine pristupilo se rekonstrukciji tunela koja je završena početkom 1974. godine. Analize su pokazale da je ovim zahvatima postignut maksimalni kapacitet od 35 m<sup>3</sup>/s. Tijekom 1989. godine obavljani su radovi na betoniranju dna tunela Krotuša, čime je postignut njegov projektirani kapacitet. Nekim kasnijim radovima u samom polju maksimalna protočnost je podignuta na današnjih 49 m<sup>3</sup>/s. Navedenim dodatnim radovima razina poplava u Vrgorskom polju smanjena je za daljnjih oko 3 m (Bonacci, 1986.; 1987.; 2013.), dakle ukupno oko 6 m u odnosu na prirodno stanje. Trajanje poplava u polju je značajno skraćeno, a razina poplavnih voda je snižena. Činjenica je da poplave i dalje otežavaju intenzivnu

poljoprivrednu proizvodnju. Ovog puta razlog je prvenstveno u nedovoljnom kapaciteta korita Matice Vrgorske za evakuaciju valova velike vode.

Osobito je važno naglasiti da su svi radovi vezani s izgradnjom i funkcioniranjem tunela Krotuša vodili računa isključivo o regulaciji vodnog režima Vrgorskog polja te da uopće nisu niti danas vode računa o utjecaju na vodni režim, kakvoću voda, okoliš i ekosustave Bačinskih jezera. Cilj ovog članka je da stručnoj javnosti detaljno prikaže promjene hidrološkog režima Bačinskih jezera u razdoblju za koje postoje mjerenja na vodomjernoj postaji Šipak lociranoj na jezeru Sladinac u razdoblju od 1923. do 2018. s prekidima u dva razdoblja. Hidrološke analize trebale bi predstavljati osnovnu podlogu i ključne informacije za sve druge analize vezane uz Bačinska jezera, od onih geografskih i hidrogeoloških do bioloških, ekoloških, ali i društvenih. Činjenica je da se o znanstveno zasnovanoj zaštiti ovog fascinantly vrijednog i lijepog krškog fenomena do sada nije vodilo dovoljno brige. Autori se nadaju da bi ovaj rad mogao pomoći pokretanju akcija sustavnog stručno-znanstvenog pristupa upravljanju i zaštiti ovog vrijednog prostora.

## 2. MATERIJALI I METODE

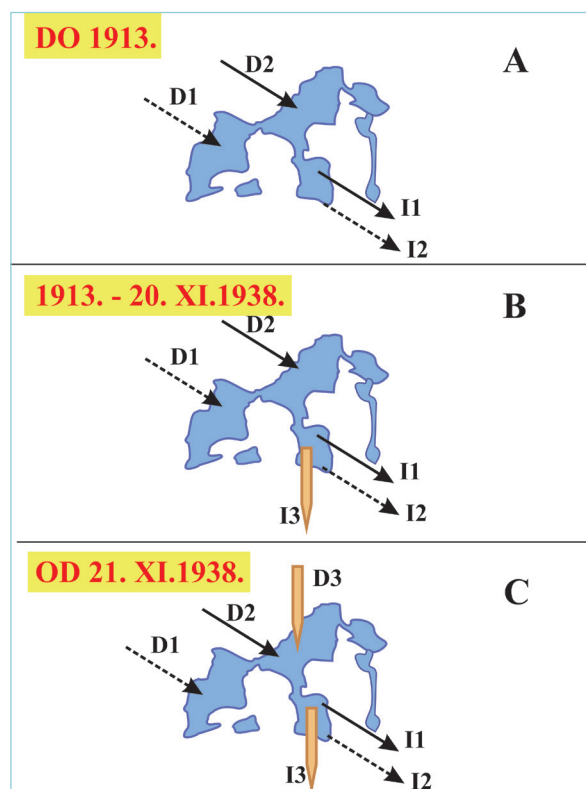
### 2.1. Hidrološki sustav Bačinskih jezera i njegove promjene tijekom vremena

Površina orografskog sliva Bačinskih jezera iznosi  $A=21,4 \text{ km}^2$  (Bonacci i Švonja, 1984.). Međutim, treba imati na umu da su jezera locirana u prostoru dubokog i razvijenog krša te da se hidrološko-hidrogeološka površina zasigurno ne poklapa s onom orografskom.

Štoviše, površina iz koje se jezera prihranjuju vrlo se vjerojatno značajno mijenja u zavisnosti od stanja lokalnih i regionalnih razina podzemnih voda (Bonacci, 1987.). Veze među vodama iz pojedinih jezera složene su, te se mijenjaju u zavisnosti od vodostaja u njima. U Plitko jezero (broj 1 na slici 1) dotječu vode iz stalnog krškog vrela Klokun, a iz jezera istječu u jezero Podgora (broj 2 na slici 1). Treba napomenuti da se vodom iz izvora Klokun opskrbljuje grad Ploče i šira okolica, čime se utječe na bilancu voda ovog jezera, osobito u sušnom razdoblju. Jezero Podgora prima vodu iz stalnog krškog izvora Podgora te iz Vrgorskog polja tunelom Krotuša. Dotok tunelom zavisi o stanju razina vode u Vrgorskom polju te značajno varira, kako tijekom godine tako i u godinama različite vodnosti. Pretežni dio godine nema dotoka tunelom Krotuša u jezero. Iz jezera Podgora voda otječe po površini vodnog lica u najveće jezero Očuša (broj 3 na slici 1). Ovo jezero se prihranjuje iz tri stalna krška izvora (Suša, Crni Bad i Petrova jama) i dva povremena (Vinogradina i ispod Čuješeva stana). Iz jezera Očuša voda širokim kanalom otječe u jezero Sladinac (broj 4 na slici 1), odakle se tunelom i kanalom upušta u Jadransko more. Po volumenu uskladištene vode najveće je jezero Crniševo (broj 5 na slici 1). Ovo

je jezero uskim kanalom povezano s jezerom Očuša, ali su njihove vode površinski rijetko u kontaktu. Taj je zaključak donesen na osnovi mjerenja saliniteta u ova dva jezera. U jezeru Crniševo koncentracija klorida varira u velikom rasponu i značajno je veća nego u jezeru Očuša. Pretpostavlja se da Crniševo ima podzemnu vezu s morem, kojom pri visokim razinama mora slana voda dotječe u jezero, a pri niskim razinama voda iz jezera istječe u more. Najmanje jezero, Vrbnik (broj 6 na slici 1), se nalazi istočno od jezera Crniševo i zapadno od jezera Sladinac i nema površinske veze niti s jednim od Bačinskih jezera.

Prethodno izneseno navodi na zaključak da je hidrološko-hidrogeološka situacija vezana s bilancom voda Bačinskih jezera ekstremno složena. Bitno je shvatiti da manjkav i nekontinuiran monitoring hidroloških, hidrogeoloških i klimatoloških parametara nije omogućio pouzdano definiranje interakcije složenih krških veza površinskih i podzemnih voda koji je uz to pod intenzivnim utjecajem prirodnih i antropogenih zahvata. Prije svega nedostaju mjerenja razina podzemnih voda koje igraju ključnu ulogu u kontroli ovog složenog sustava. Čini se da jezera, iako su neka od njih međusobno povezana površinskim vezama, hidrološko-



Slika 2: Shematski prikaz funkcioniranja hidrološkog režima u tri podrazdoblja: (1) u prirodnom neporemećenom stanju do 1913. godine; (2) od 1913. do studenog 1938. u podrazdoblju kad je funkcionirao tunel i kanal za evakuaciju voda iz Bačinskih jezera u Jadransko more; (3) od prosinca 1938. kada je u funkciju pušten tunel Krotuša do danas. Slovom D označeni su dotoci vode u sustav jezera (D1-dotok podzemnih voda; D2-dotok površinskih voda; D3-dotok vode iz Vrgorskog polja tunelom Krotuša). Slovom I označena su istjecanja vode iz sustava jezera (I1-istjecanje podzemnih voda; I2-ispavanje s površine vodnog lica; I3-istjecanje vode iz sustava jezera tunelom i kanalom u Jadransko more)



hidrogeološki funkcioniraju relativno samostalno. Postojeća vodomjerna letva u samo jednom od jezera ne omogućava detaljno razumijevanje dinamičnih procesa koji se zbivaju u složenom krškom sustavu Bačinskih jezera.

Bez obzira na nedostatke postojećeg monitoringa, promjene u hidrološkom režimu Bačinskih jezera tijekom relativno dugog vremena mogu biti praćene i shvaćene izučavanjem nizova dnevnih vodostaja opaženih na vodokaznoj letvi Šipak lociranoj na istočnoj strani jezera Sladinac. Očitavanje vodostaja vrši se jednom dnevno u pravilu u 7 sati i 30 minuta. U radu su korišteni službeni podatci vodostaja dobiveni od Državnog hidrometeorološkog zavoda iz Zagreba, na čemu im se autori ovim putem zahvaljuju. Korišteni su svi dostupni podatci mjereni u razdoblju od 1. siječnja 1923. do 31. prosinca 2018. Prekidi u radu postojali su u sljedećim podrazdobljima: (1) 1. listopada 1942. do 31. lipanjs 1945.; (2) 1. siječnja 1959. do 31. prosinca 1972. Za vršenje analiza raspolagalo se sa 78 cjelovitih godina i dvije necjelovite godine te s 951 cjeloviti mjesec. Kota nule vodokaza iznosi  $H=0,24$  mm i nije se mijenjala tijekom cijelog razdoblja motrenja.

Ovisno o vremenu izgradnje pojedinih hidrotehničkih zahvata i njihovog utjecaja na bilancu voda Bačinskih jezera, izdvojena su tri ključno različita vremenska podrazdoblja u kojima je hidrološki režim bio bitno različit: (1) prirodni režim koji je postojao do 1913.; (2) režim koji je funkcionirao od proboja tunela i kanala iz jezera u Jadransko more od 1913. do 20. studenog 1938.; (3) vodni režim koji je nastao puštanjem u rad tunela Krotuša iz Vrgorskog polja u jezero Podgora od 21. studenog 1938. do danas. Na [slici 2](#) dat je shematski prikaz funkcioniranja hidrološkog režima Bačinskih jezera u tri navedena podrazdoblja. Treba napomenuti da je unutar dva posljednja navedena podrazdoblja bilo manje ili više značajnih antropogenih zahvata koji su utjecali na promjenu vodnog režima. Ta će problematika biti detaljno razmatrana u poglavlju 3. REZULTATI I RASPRAVE.

Do 1913. godine ([slika 2A](#)) vladao je neporemećeni ili prirodni režim. U ljudskim zahvatima neporemećenom stanju hidrološko-hidrogeološki režim svih šest kriptodepresija bio je upravljani dotokom slatke vode iz brojnih stalnih i povremenih krških vrela smještenih uglavnom na njihovom sjevernom rubu te dotokom i istjecanjem podzemne vode u i iz njih. Površinski dotok javljao se rijetko (i danas je situacija nepromijenjena) i samo poslije intenzivnih kratkotrajnih oborina. Dotok i/ili istjecanje podzemnih voda, ali i dotok voda iz krških izvora koji prihranjuju jezera upravljani je razinom podzemnih voda okolnog lokalnog, ali i regionalnog krškog vodonosnika. U vlažnom razdoblju godine, od listopada do travnja, podzemne vode prihranjuju vode u jezerima, dok je u sušnom i toplom djelu godine proces obrnut. U tom razdoblju vode iz jezera prihranjuje lokalni krški vodonosnik. Isparavanje vode s površine vodnih lica

nezanemarivo je tijekom ljetnog razdoblja, ali o njemu nema nikakvih pouzdanih niti mjerenja, niti analiza. Kako je u cijeloj regiji opažen značajniji porast temperatura zraka u posljednjih četrdesetak godina (Bonacci, 2010.) bit će potrebno u narednom razdoblju dužnu pažnju posvetiti analizi problematike isparavanja.

Prokopavanjem tunela i kanala iz Bačinskih jezera u Jadransko more, koje je izvršeno krajem 1912. godine, prirodni hidrološki režim naglo je i definitivno poremećen. Na [slici 2B](#) dan je shematski prikaz funkcioniranja bilance voda u podrazdoblju od 1. siječnja 1913. do 20. studenog 1938. U ovom se podrazdoblju raspolaže se podatcima dnevnih vodostaja, počevši od 1. siječnja 1923. do kraja podrazdoblja.

Dana 21. studenog 1938. u rad je pušten tunel Krotuša. Tada započinje treće podrazdoblje koje s određenim antropogenim zahvatima traje do danas. Na [slici 2C](#) shematski je prikazano funkcioniranje bilance voda u ovom podrazdoblju. Zbog ratnih prilika vodostaji na vodomjeru Šipak nisu opažani od 1. studenog 1942. do 30. lipnja 1945. Iz nama nepoznatih razloga do prekida motrenja vodostaja došlo je 1. siječnja 1959., a motrenja su nastavljena u siječnju 1973. godine.

U ožujku 1940. završeni su radovi na proširenju kapaciteta tunela iz Bačinskih jezera u Jadransko more kako bi on mogao prihvatiti veće količine voda koje su sada dolazile u sustav Bačinskih jezera iz Vrgorskog polja kroz tunel Krotuša. Detaljnih izvještaja o početku ovih radova nema. Analize karakterističnih godišnjih i mjesečnih vodostaja (minimalnih, srednjih i maksimalnih) su ukazale da su se zahvati na proširenju kapaciteta tunela iz Bačinskih jezera odvijali u razdoblju od studenog 1938. do kraja veljače 1940. Druga rekonstrukcija evakuacijskih objekata iz Bačinskih jezera završena je krajem 1973. godine. Tijekom 1981. godine preljevni prag na ulazu u tunel iz Bačinskih jezera u Jadransko more je srušen, a 1994. godine izgrađen je novi s ribljom stazom. I ovi zahvati značajno su utjecali na promjenu hidrološkog režima, što će nastavnim analizama vodostaja biti dokazano.

## 2.2. Metode statističke analize

Statistička metodologija koja se mogla koristiti u ovom radu diktirana je raspoloživim podlogama, tj. vremenskom duljinom i prekidima u motrenju vodostaja na vodokazu Šipak. Analizu trenda raspoloživog vremenskog niza nije imalo smisla vršiti prvenstveno zbog nehomogenosti niza nastalog pod utjecajem prethodno opisanih antropogenih zahvata tijekom vremena, ali i zbog prekida u motrenju. Zbog toga je pažnja usredotočena na izučavanje značajnosti statističkih razlika između prosječnih mjesečnih i godišnjih karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) vodostaja pojedinih vremenskih podnizova. Podrazdoblja su definirana na osnovi značajnosti utjecaja pojedinih antropogenih zahvata vršenih tijekom vremena. Korišteni su F-test i t-test za računanje statističke značajnosti razlika

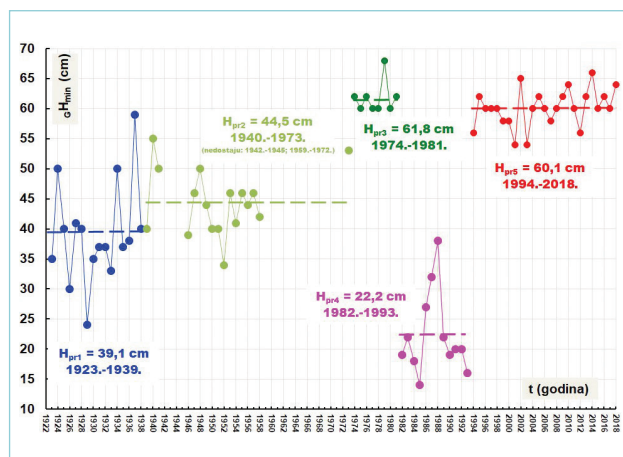
između prosječnih vrijednosti karakterističnih susjednih vremenskih podrazdoblja. U radu je F-testom izučavana jednakost varijanci dvije normalno raspodijeljene populacije (dva podskupa), dok se t-test koristio za kvantitativnu procjenu je li se prosječne vrijednosti dva vremenska podskupa statistički značajno razlikuju. U oba testa kao nivo značajnosti razlika izabrana je vrijednost  $p < 0,01$ , ali je kod t-testa korištena i vrijednost  $p < 0,05$ .

### 3. REZULTATI I RASPRAVA

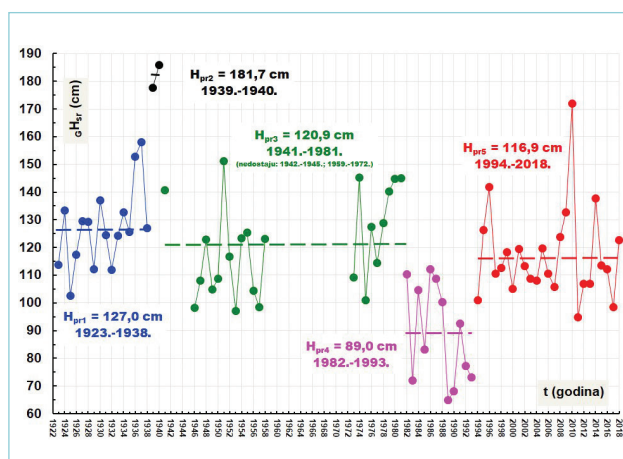
U okviru ovog poglavlja analizirat će se promjene prosječnih vrijednosti karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) vodostaja tijekom različitih vremenskih podrazdoblja. Izbor podrazdoblja diktiran je funkcioniranjem antropogenih zahvata: (1) radova na proširenju tunela iz Bačinskih jezera u Jadransko more; (2) skidanjem i ponovnim uspostavljanjem praga visine 80 cm na ulazu u tunel iz Bačinskih jezera u Jadransko more; (3) puštanjem u rad i rekonstrukcijom tunela iz Vrgorskog polja u Bačinska jezera. Unaprijed je jasno da svaki od navedenih zahvata drugačije utječe na minimalne, srednje ili maksimalne godišnje i mjesečne vodostaje. Precizna saznanja o promjenama bitna su za planiranje budućih zahvata na ovom sustavu. Osnovni je cilj optimalno ili barem bolje od postojećeg upravljanje vodnim resursima i s njima vezanim djelatnostima ovog vrijednog i ranjivog krajobraza s pripadnim ekosustavom i okolišem.

#### 3.1. Analiza godišnjih karakterističnih vodostaja

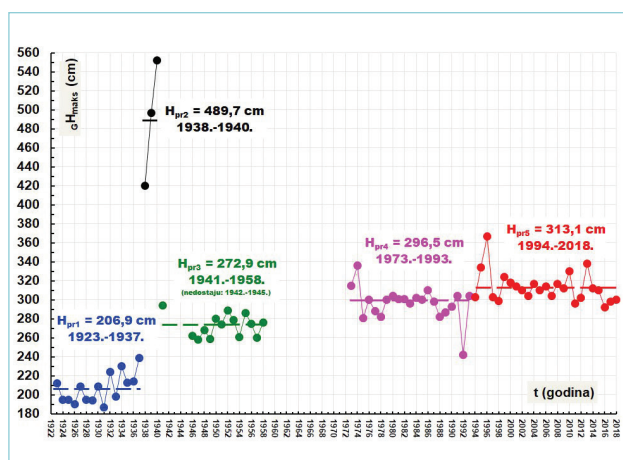
Minimalne godišnje vrijednosti vodostaja opažene na vodomjeru Šipak u razdoblju u kojem se raspolagalo s mjerenjima kretalo se između najniže vrijednosti od 14 cm ili 0,38 mm (opaženo 7.-8. listopada 1985.) i najviše vrijednosti od 68 cm ili 0,92 mm (opaženo 3.-7. rujna 1979.). Na slici 3 prikazano je pet podnizova minimalnih godišnjih vodostaja  $G_{H_{min}}$  opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećih pet podrazdoblja: (1) 1923.-1939.; (2) 1940.-1973.; (3) 1974.-1981.; (4) 1982.-1993.; (5) 1994.-2018. Na svakom od podnizova upisana je prosječna vrijednost i ucrtana je njena linija. U tablici 2 upisane su prosječne vrijednosti  $H_{min}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova minimalnih godišnjih vodostaja prikazanih na slici 3. Crvenom podebljanom bojom označeni su slučajevi statistički značajnih razlika između prosječnih vrijednosti u dva uzastopna podrazdoblja kada je vjerojatnost  $p < 0,01$ . Treba uočiti da puštanjem u funkciju tunela Krotuša, krajem 1938. godine, nije došlo do statistički značajnog porasta minimalnih godišnjih vodostaja. Radovi izvršeni 1974. godine utjecali su pak na statistički značajni porast. U razdoblju od 1982. do 1993. došlo je do značajnog pada minimalnih godišnjih vodostaja. Razlog treba tražiti u uklanjanju ulaznog praga na tunelu iz Bačinskih jezera u Jadransko more. Njegovim ponovnim uspostavljanjem



Slika 3: Pet podnizova minimalnih godišnjih vodostaja  $G_{H_{min}}$  opaženih na vodomjeru Šipak u razdoblju 1923.-2018.



Slika 4: Pet podnizova srednjih godišnjih vodostaja  $G_{H_{vr}}$  opaženih na vodomjeru Šipak u razdoblju 1923.-2018.



Slika 5: Pet podnizova maksimalnih godišnjih vodostaja  $G_{H_{max}}$  opaženih na vodomjeru Šipak u razdoblju 1923.-2018.

1994. godine porasli su i minimalni godišnji vodostaji na razinu koja je bila i u podrazdoblju od 1974. do 1981. Čini se da su u sadašnjem stanju izgrađenosti sustava minimalni godišnji vodostaji stabilizirani oko vrijednost od 60 cm ili 0,84 mm.

Srednji godišnji vodostaji opaženi na vodomjeru Šipak u razdoblju u kojem se raspolagalo s mjerjenjima kretali su se između najniže vrijednosti od 65 cm ili 0,89 mm (opaženo 1984.) i najviše vrijednosti od 185,9 cm ili 2,10 mm (opaženo 1940.). Na slici 4 prikazano je pet nizova minimalnih godišnjih vodostaja  ${}_G H_{sr}$  opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećih pet podrazdoblja: (1) 1923.-1938.; (2) 1939.-1940.; (3) 1941.-1981.; (4) 1982.-1993.; (5) 1994.-2018. Na svakom od podnizova upisana je prosječna vrijednost i ucrtana je njena linija. Isključujući podrazdoblje 1939.-1940., u tablici 3 upisane su prosječne vrijednosti  ${}_sr H_{prosjечно}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova srednjih godišnjih vodostaja prikazanih na slici 4. Crvenom podebljanom bojom označeni su slučajevi statistički značajnih razlika između prosječnih vrijednosti u dva uzastopna podrazdoblja kada je vjerojatnost  $p < 0,01$ . Napominje se da je kratko dvogodišnje razdoblje (1939.-1940.) isključeno iz ove analize. U razdoblju od kraja 1938. godine do proljeća 1940. godine (točne datume nismo mogli utvrditi), vršeni su radovi na proširenju evakuacijskih kapaciteta tunela iz Bačinskih jezera u Jadransko more. Vrlo vjerojatno je u tom razdoblju došlo do djelomičnog ili potpunog zatvaranja tunela, što se odrazilo na značajni porast srednjih godišnjih vodostaja i još značajniji porast maksimalnih godišnjih vodostaja, što je vidljivo na slici 5. S grafičkog prikaza danog na slici 4 moguće je zaključiti da su srednji godišnji vodostaji jezera u stalnom opadanju. Statistički značajan pad uzrokovan skidanjem ulaznog praga u odvodni tunel iz Bačinskih jezera javio se u razdoblju 1982.-1993. Prosječna vrijednost koja je u razdoblju 1941.-1981. iznosila 120,9 cm (1,449 mm) pala je za 31 cm na 89 cm (1,13 mm). Ponovno uspostavljanje praga podiglo je razinu srednjih godišnjih vodostaja u recentnom razdoblju (1994.-2018.), prosječno za 4 cm niže nego što je bila u razdoblju 1941.-1981. Analiza ponašanja raspoloživih podataka vremenskog niza srednjih godišnjih vodostaja jasno ukazuje na konstantno opadanje razine vode u jezerima. Dijelom se taj proces može pripisati i stalnom porastu temperatura zraka u regiji koji je posebno intenzivan u posljednjih četrdesetak godina (Bonacci, 2010.). Ako je ta pretpostavka točna, a čini se da je, očito je da se radi o zabrinjavajućoj pojavi koju bi trebalo žurno i detaljnije objasniti i na koju bi trebalo reagirati.

Maksimalne godišnje vrijednosti vodostaja opaženih na vodomjeru Šipak u razdoblju u kojem se raspolagalo s mjerjenjima kretalo se između najniže vrijednosti od 187 cm ili 2,11 mm (opaženo 14. - 15. studenog 1931.) i najviše vrijednosti od 552 cm ili 5,76 mm (opaženo 12. - 13. veljače 1940.). Na slici 5 prikazano je pet nizova minimalnih godišnjih vodostaja  ${}_G H_{min}$  opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećih pet podrazdoblja: (1) 1923.-1937.; (2) 1938.-1940.; (3) 1941.-1958.; (4) 1973.-1993.; (5) 1994.-2018. Na svakom od podnizova upisana je prosječna vrijednost i ucrtana je njena

linija. Isključujući podrazdoblje 1938.-1940. u tablici 4 upisane su prosječne vrijednosti  ${}_maks H_{prosjечно}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova minimalnih godišnjih vodostaja prikazanih na slici 5. Crvenom podebljanom bojom označeni su slučajevi statistički značajnih razlika između prosječnih vrijednosti u dva uzastopna podrazdoblja kada je vjerojatnost  $p < 0,01$ . Uočava se stalni porast maksimalnih godišnjih vodostaja, što se prvenstveno može obrazložiti stalnim povećanjem kapaciteta tunela Krotuša. Ekstremno visoke vrijednosti maksimalnih godišnjih vodostaja u tri godine

Tablica 2: Prosječne vrijednosti  ${}_min H_{prosjечно}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova minimalnih godišnjih vodostaja prikazani na slici 3

podrazdoblje	${}_min H_{prosjечно}$ (cm)	F-test	t-test
1923.-1939.	39,1		
1940.-1973.	44,5	p=0,1021	p=0,0354
1974.-1981.	61,8	p=0,0699 p=0,0208	<b>p=1,7E-08</b> <b>p=9,0E-12</b>
1982.-1993.	22,2	<b>p=9,9E-04</b>	<b>p=1,0E-10</b>
1994.-2018.	60,1		

Tablica 3: Prosječne vrijednosti  ${}_sr H_{prosjечно}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova srednjih godišnjih vodostaja prikazani na slici 4

podrazdoblje	${}_sr H_{prosjечно}$ (cm)	F-test	t-test
1923.-1938.	127,0		
1941.-1981.	120,9	p=0,6431 p=0,8930	<b>p=9,3E-08</b> <b>p=1,6E-04</b>
1982.-1993.	89,0	p=0,6750	<b>p=3,5E-05</b>
1994.-2018.	116,9		

Tablica 4: Prosječne vrijednosti  ${}_maks H_{prosjечно}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova maksimalnih godišnjih vodostaja prikazani na slici 5

podrazdoblje	${}_maks H_{prosjечно}$ (cm)	F-test	t-test
1923.-1937.	206,9		
1941.-1958.	272,9	p=0,3594 p=0,2314	<b>p=5,3E-13</b> <b>p=1,5E-04</b>
1973.-1993.	296,5	p=0,6945	<b>p=1,7E-03</b>
1994.-2018.	313,1		

Tablica 5: Prosječne vrijednosti razlika između maksimalnih i minimalnih godišnjih vodostaja  ${}_G \Delta H_{prosjечно}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova maksimalnih godišnjih vodostaja prikazani na slici 6

podrazdoblje	${}_G \Delta H_{prosjечно}$ (cm)	F-test	t-test
1923.-1937.	167,9		
1941.-1958.	229,5	p=0,8911 p=0,0227	<b>p=3,2E-13</b> <b>p=3,6E-05</b>
1973.-1993.	257,7	p=0,0548	p=0,4356
1994.-2018.	253,0		

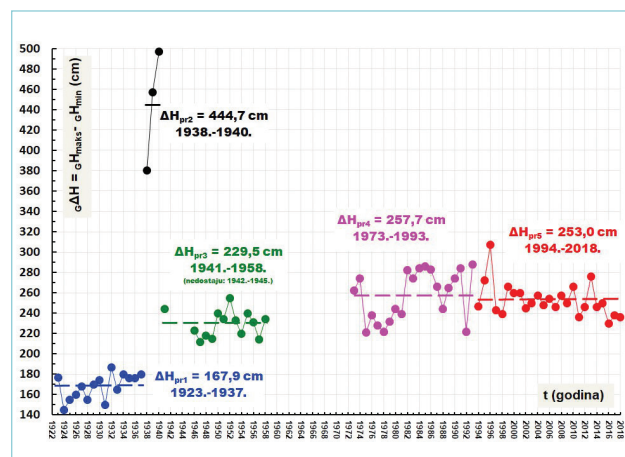
razdoblja 1938.-1940. rezultat su radova na odvodnom tunelu iz Bačinskih jezera, o čemu je bilo govora u prethodnom paragrafu.

Važno je analizirati i ponašanje tijekom vremena maksimalnih godišnjih raspona vodostaja  ${}_G\Delta H$  definiranih izrazom:

$${}_G\Delta H = H_{G_{maks}} - H_{G_{min}} \quad (1)$$

Maksimalni rasponi vodostaja opaženi na vodomjeru Šipak u razdoblju u kojem se raspolagalo s mjerenjima kretali su se između najniže vrijednosti od 145 cm (opaženo 1924.) i najviše vrijednosti od 307 cm ili (opaženo 1996.). Zbog radova koji su vršeni u razdoblju 1938.-1940. godišnji rasponi su bili značajno veći te su se kretali između 380 cm (1938.) i 497 cm (1940.). Na slici 6 prikazane su prosječne vrijednosti razlika između maksimalnih i minimalnih godišnjih vodostaja  ${}_G\Delta H_{prosječno}$  u sljedećih pet podrazdoblja: (1) 1923.-1937.; (2) 1938.-1940.; (3) 1941.-1958.; (4) 1973.-1993.; (5) 1994.-2018. Isključujući podrazdoblje 1938.-1940. u tablici 5 upisane su prosječne vrijednosti  ${}_G\Delta H_{prosječno}$  i rezultati F-testa i t-testa između susjednih vremenskih podnizova

minimalnih godišnjih vodostaja prikazanih na slici 6. Crvenom bojom su označeni slučajevi statistički značajnih razlika između prosječnih vrijednosti u dva uzastopna podrazdoblja kada je vjerojatnost  $p < 0,01$ . Uočava se trend porasta maksimalnih godišnjih raspona vodostaja do 1973. godine od kada se stabilizirao oko vrijednosti od 255 cm.



Slika 6: Pet podnizova maksimalnih godišnjih razlika vodostaja  ${}_G\Delta H = H_{maks} - H_{min}$  opaženih na vodomjeru Šipak u razdoblju 1923.-2018.

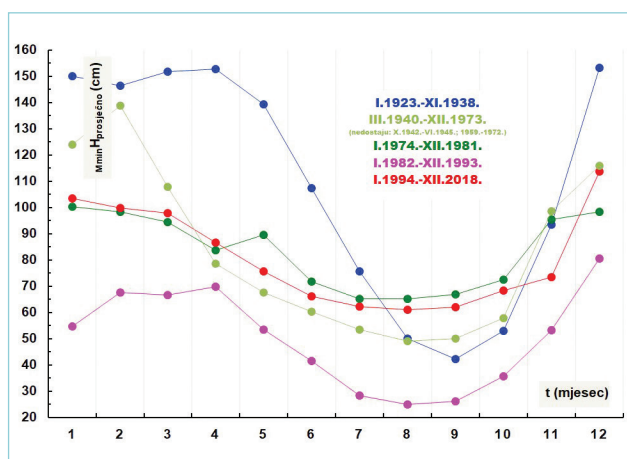
Tablica 6: Matrica karakterističnih prosječnih mjesečnih vodostaja u pet analiziranih podrazdoblja

	podrazdoblje	mjesec											
		I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
min	I.1923.-XI.1938.	150,1	146,4	151,7	152,6	139,3	107,4	75,8	50,0	42,3	53,0	93,4	153,1
	III.1940.-XII.1973.	123,8	138,9	107,9	78,5	67,6	60,2	53,4	49,2	49,9	57,8	98,5	115,9
	I.1974.-XII.1981.	100,4	98,4	94,4	83,8	89,5	71,8	65,3	65,3	66,9	72,5	95,5	98,3
	I.1982.-XII.1993.	54,6	67,6	66,7	69,8	53,4	41,6	28,4	24,9	26,2	35,6	53,3	80,5
	I.1994.-XII.2018.	103,6	99,7	97,8	86,7	75,5	66,0	62,1	60,9	62,0	68,2	73,4	113,6
sr	I.1923.-XI.1938.	161,8	159,9	163,3	160,4	151,4	126,5	94,6	64,3	53,4	74,0	143,8	171,2
	III.1940.-XII.1973.	193,3	189,1	154,8	118,3	93,8	69,7	59,0	52,7	56,9	83,7	180,2	179,3
	I.1974.-XII.1981.	169,7	160,5	145,5	123,5	125,3	81,2	75,7	72,9	79,5	134,5	170,8	186,5
	I.1982.-XII.1993.	108,7	121,8	126,2	128,6	79,2	55,3	36,4	28,5	34,6	82,3	124,9	143,9
	I.1994.-XII.2018.	177,4	166,0	159,0	131,4	97,0	75,0	65,3	64,3	79,7	95,9	136,4	187,4
maks	I.1923.-XI.1938.	179,6	179,8	178,0	169,6	163,8	149,1	111,7	79,0	70,5	103,4	175,6	195,6
	III.1940.-XII.1973.	244,3	232,1	204,3	160,8	127,6	84,9	66,6	57,7	68,0	138,4	241,5	235,9
	I.1974.-XII.1981.	237,4	233,0	226,9	193,8	202,5	98,3	101,1	83,8	108,6	228,6	255,3	268,8
	I.1982.-XII.1993.	197,2	195,3	225,0	218,3	123,2	82,4	50,8	33,7	56,0	159,8	230,8	247,5
	I.1994.-XII.2018.	269,6	252,0	237,6	209,5	145,0	91,3	70,6	71,6	120,9	158,0	245,0	276,0



### 3.2. Analiza mjesečnih karakterističnih vodostaja

U prethodnom poglavlju analizirani su godišnji karakteristični (minimalni, srednji i maksimalni) vodostaji raspoloživog vremenskog niza podataka. Primjenom kraće vremenske skale od mjesec dana nastavno će se ustanoviti kako su izvršeni hidrotehnički zahvati utjecali na preraspodjelu vodnog režima tijekom pojedinih mjeseci godine. U nastavno vršenim analizama karakterističnih mjesečnih vodostaja u obzir nije uzeto razdoblje od prosinca 1938. do veljače 1940. u kojem su vršeni radovi na povećanju kapaciteta tunela koji iz Bačinskih jezera evakuira vodu u Jadransko more. U **tablici 6** upisane su prosječne vrijednosti karakterističnih (minimalnih, srednjih i maksimalnih) vodostaja opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećih pet podrazdoblja: (1) siječanj 1923. - studeni 1938.; (2) ožujak 1940. - prosinac 1973.; (3) siječanj 1974. - prosinac 1981.; (4) siječanj 1982. - prosinac 1993.; (5) siječanj 1994. - prosinac 2018.

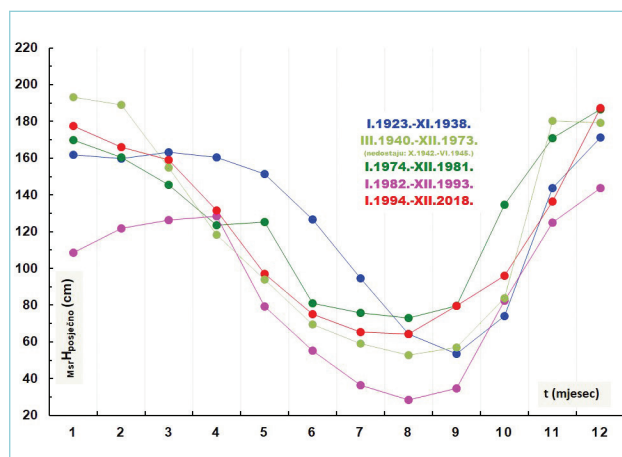


Slika 7: Grafički prikaz pet nizova prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećim podrazdobljima: (1) I. 1923. - XI. 1939. (●); (2) III. 1940. - XII. 1973. (●); (3) I. 1974. - XII. 1981. (●); (4) I. 1982. - XII. 1993. (●); (5) I. 1994. - XII. 2018. (●)

Na **slici 7** grafički je prikazano pet nizova prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja  $M_{min}^{H}$  prosječno opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećim podrazdobljima: (1) siječanj 1923. - studeni 1938. (plava boja); (2) ožujak 1940. - prosinac 1973. (svjetlozelena boja); (3) siječanj 1974. - prosinac 1981. (tamnozeleno); (4) siječanj 1982. - prosinac 1993. (ljubičasta boja); (5) siječanj 1994. - prosinac 2018. (crvena boja). U **tablici 7** upisane su vrijednosti razlika između prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja  $M_{min}^{H}$  prosječno u dva uzastopna podrazdoblja. Crvenim podebljanim brojevima označeno je kad su razlike između dva uzastopna podrazdoblja statistički značajne na razini  $p < 0,01$ . Ljubičastom bojom označene su vrijednosti

kad su ove razlike statistički značajne na razini  $p < 0,05$ . Podcrtane su vrijednosti kod kojih su varijance između dva uzastopna podrazdoblja statistički značajne na razini  $p < 0,01$ .

Povećanje kapaciteta tunela iz Bačinskih jezera u Jadransko more izvršeno tijekom 1939. do početka 1940. godine te istovremeno puštanje u rad tunela Krotuša u studenom 1938. uzrokovalo je snižavanje prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja prethodnog podrazdoblja (I. 1923. - XI. 1938.) u sljedećem podrazdoblju (III. 1940. - XII. 1973.) u dijelu godine od I. do VII. i u XII. mjesecu. U dijelu godine od VIII. do XI. mjeseca vodostaji su ostali gotovo isti ili su bili neznatno viši. Statistički značajne razlike snižavanja prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja ( $p < 0,01$ ) opažene su od IV. do VI. mjeseca. Tunnel Krotuša nije bitno utjecao na minimalne godišnje vodostaje. Oni se javljaju krajem dugotrajnih ljetnih razdoblja kada iz Vrgorskog polja kroz tunnel ionako nema dotoka. Rekonstrukcija tunela Krotuša, završena krajem 1973. godine, utjecala je na preraspodjelu minimalnih godišnjih vodostaja tijekom godine. U trećem podrazdoblju (I. 1974. - XII. 1981.) u odnosu na drugo (III. 1940. - XII. 1973.) vodostaji u I., II., III., XI. i XII. mjesecu statistički su se neznajno smanjili (osim u veljači kad je razina vjerojatnosti bila  $p < 0,05$ ). Od IV. do X. mjeseca došlo je do porasta minimalnih mjesečnih vodostaja, s tim da su ona u VIII. i IX. mjesecu bila statistički značajna na razini  $p < 0,01$ , dok je u VII. i X. razina vjerojatnosti iznosila  $p < 0,05$ . Skidanje praga u četvrtom podrazdoblju (I. 1982. - XII. 1993.) uzrokovalo je snižavanje minimalnih mjesečnih vodostaja u svim mjesecima s tim da je u I. te od V. do XI. razina vjerojatnosti bila  $p < 0,01$ . Ponovnim uspostavljanjem praga od 1994. godine do danas došlo je do statistički značajnog porasta prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja u svim mjesecima godine na razini  $p < 0,01$ .



Slika 8: Grafički prikaz pet nizova prosječnih srednjih mjesečnih vodostaja  $M_{sr}^{H}$  prosječno opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećim podrazdobljima: (1) I. 1923. - XI. 1939. (●); (2) III. 1940. - XII. 1973. (●); (3) I. 1974. - XII. 1981. (●); (4) I. 1982. - XII. 1993. (●); (5) I. 1994. - XII. 2018. (●)

Na slici 8 grafički je prikazano pet nizova prosječnih srednjih mjesečnih vodostaja  $M_{Sr} H_{\text{prosječno}}$  opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećim podrazdobljima: (1) siječanj 1923. – studeni 1938. (plava boja); (2) ožujak 1940. – prosinac 1973. (svjetlozelena boja); (3) siječanj 1974. – prosinac 1981. (tamnozeleno boja); (4) siječanj 1982. – prosinac 1993. (ljubičasta boja); (5) siječanj 1994. – prosinac 2018. (crvena boja). U tablici 8 upisane su vrijednosti razlika između prosječnih srednjih mjesečnih vodostaja  $M_{Sr} \Delta H_{\text{prosječno}}$  u dva uzastopna podrazdoblja. Crvenim podebljanim brojevima označeno je kad su razlike između dva uzastopna podrazdoblja statistički značajne na razini

$p < 0,01$ . Ljubičastom bojom označene su vrijednosti kad su ove razlike statistički značajne na razini  $p < 0,05$ . Podcrtane su vrijednosti kod kojih su varijance između dva uzastopna podrazdoblja razlike statistički značajne na razini  $p < 0,01$ .

U drugom podrazdoblju (III. 1940. – XII. 1973.) u odnosu na prvo (I. 1923. – XI. 1938.) došlo je do snižavanja prosječnih srednjih mjesečnih vodostaja od III. do VIII. mjeseca, s tim da je statistički značajno sniženje na razini od  $p < 0,01$  opaženo od IV. do VII. mjeseca. Do porasta prosječnih vrijednosti srednjih mjesečnih vodostaja došlo je u I. i II. mjesecu te u IX. i XII. mjesecu. Ni u jednom od njih razlika nije

Tablica 7: Matrica razlika između prosječnih minimalnih mjesečnih vodostaja  $M_{\text{min}} \Delta H_{\text{prosječno}}$  u dva uzastopna podrazdoblja

$M_{\text{min}} \Delta H_{\text{prosječno}}$	mjesec											
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
I.1923.-XI.1938.												
III.1940.-XII.1973.	-26,2	-7,5	-43,8	-74,1	-71,7	-47,3	-22,4	-0,83	7,7	4,8	5,1	-37,2
I.1974.-XII.1981.	-23,4	-40,5	-13,6	5,2	21,9	11,6	11,9	16,1	16,9	14,7	-3,0	-17,7
I.1982.-XII.1993.	-45,8	-30,8	-27,7	-13,9	-36,1	-30,2	-36,8	-40,3	-40,7	-36,9	-42,5	-17,8
I.1994.-XII.2018.	49,0	32,1	31,1	16,8	22,1	24,5	33,7	36,0	35,8	32,6	20,1	33,1

Tablica 8: Matrica razlika između prosječnih srednjih mjesečnih vodostaja  $M_{Sr} \Delta H_{\text{prosječno}}$  u dva uzastopna podrazdoblja

$M_{\text{min}} \Delta H_{\text{prosječno}}$	mjesec											
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
I.1923.-XI.1938.												
III.1940.-XII.1973.	31,5	29,3	-8,5	-42,1	-57,6	-56,9	-35,6	-11,6	3,5	9,7	36,4	8,0
I.1974.-XII.1981.	-23,5	-28,6	-9,3	5,1	31,5	11,5	16,7	20,2	22,6	50,8	-9,5	7,2
I.1982.-XII.1993.	-61,1	-38,7	-19,3	5,1	-46,1	-25,9	-39,3	-44,4	-44,9	-52,3	-45,9	-42,6
I.1994.-XII.2018.	68,7	44,2	32,8	2,8	17,8	19,7	28,9	35,7	45,1	13,6	11,5	43,6

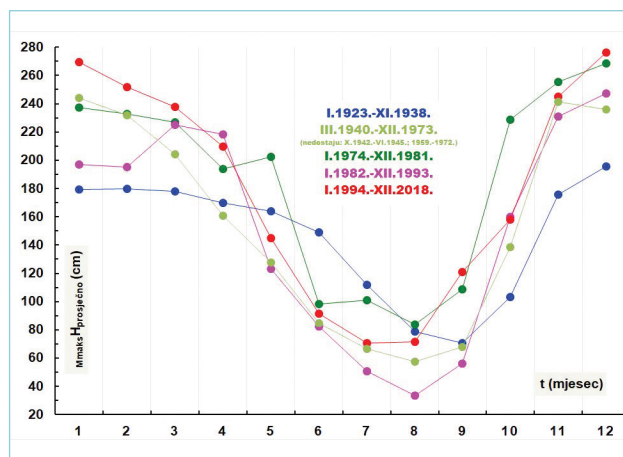
Tablica 9: Matrica razlika između prosječnih maksimalnih mjesečnih vodostaja  $M_{\text{maks}} \Delta H_{\text{prosječno}}$  u dva uzastopna podrazdoblja

$M_{\text{min}} \Delta H_{\text{prosječno}}$	mjesec											
	I.	II.	III.	IV.	V.	VI.	VII.	VIII.	IX.	X.	XI.	XII.
I.1923.-XI.1938.												
III.1940.-XII.1973.	64,7	52,3	26,3	-8,9	-36,1	-64,2	-45,1	-21,3	-2,5	34,9	66,0	40,3
I.1974.-XII.1981.	-6,9	0,9	22,6	33,0	74,9	13,4	34,5	26,0	40,6	90,3	13,7	32,9
I.1982.-XII.1993.	-40,2	-37,7	-1,9	24,6	-79,3	-15,8	-50,4	-50,1	-52,6	-68,9	-24,4	-21,3
I.1994.-XII.2018.	72,4	56,7	12,6	-8,9	21,9	8,9	19,9	37,9	64,9	-1,8	14,1	28,5

bila statistički značajna na razini  $p < 0,01$ , nego samo na razini  $p < 0,05$  u I. i XI. mjesecu. Ovakva preraspodjela srednjih godišnjih vodostaja tijekom godine uvjetovana je istovremenim funkcioniranjem dovodnog tunela Krotuša i povećanja evakuacijskih kapaciteta odvodnog tunela iz Bačinskih jezera. Tunel Krotuša dovodi vodu u sustav Bačinskih jezera samo tijekom hladnog i vlažnog dijela godine od rujna do veljače. U tom je razdoblju i opažen porast srednjih mjesečnih vodostaja. U sušnom razdoblju, kad kroz tunel Krotuša ne dotječe voda ili dotječu male količine, od ožujka do kolovoza, srednji mjesečni vodostaji u drugom podrazdoblju (III. 1940. - XII. 1973.) su u prosjeku niži nego u prvom podrazdoblju (I. 1923. - XI. 1938.). To je posljedica povećanja kapaciteta tunela koji iz jezera vodu evakuiraju u Jadransko more. U trećem podrazdoblju (I. 1974. - XII. 1981.), kad je povećan kapacitet tunela Krotuša, došlo je do daljnje preraspodjele srednjih mjesečnih vodostaja tijekom godine u odnosu na drugo podrazdoblje (III. 1940. - XII. 1973.). Statistički značajna razlika između prosječnih vrijednosti na razini  $p < 0,01$  sada se pomakla od VIII. do X. mjeseca. U četvrtom podrazdoblju (I. 1982. - XII. 1993.) smanjile su se prosječne vrijednosti u svim mjesecima, s tim da su od VII. do X. mjeseca bile statistički značajne na razini  $p < 0,01$ , dok je u V., VI. i XI. mjesecu razina bila  $p < 0,05$ . Vraćanjem ulaznog praga prosječne su se vrijednosti vodostaja u petom podrazdoblju (I. 1994. - XII. 2018.) povećale u svim mjesecima tijekom godine, s tim da su statistički značajne na razini  $p < 0,01$  bile u I. te VII.-IX. mjesecu.

Na slici 9 grafički je prikazano pet nizova prosječnih maksimalnih mjesečnih vodostaja  $M_{maks} H_{prosječno}$  opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećim podrazdobljima: (1) siječanj 1923. - studeni 1938. (plava boja); (2) ožujak 1940. - prosinac 1973. (svjetlozelena boja); (3) siječanj 1974. - prosinac 1981. (tamnozeleno boja); (4) siječanj 1982. - prosinac 1993. (ljubičasta boja); (5) siječanj 1994. - prosinac 2018. (crvena boja). U tablici 9 upisane su vrijednosti razlika između prosječnih maksimalnih mjesečnih vodostaja  $\Delta H_{prosječno}$  u dva uzastopna podrazdoblja. Crvenim podebljanim brojevima označeno je kad su razlike između dva uzastopna podrazdoblja statistički značajne na razini  $p < 0,01$ . Ljubičastom bojom označene su vrijednosti kad su ove razlike statistički značajne na razini  $p < 0,05$ . Podcrtane su vrijednosti kod kojih su varijance između dva uzastopna podrazdoblja razlike statistički značajne na razini  $p < 0,01$ .

U drugom podrazdoblju (III. 1940. - XII. 1973.) u odnosu na prvo (I. 1923. - XI. 1938.) došlo je do snižavanja prosječnih maksimalnih godišnjih vodostaja od IV. do IX. mjeseca, s tim da je statistički značajno sniženje na razini od  $p < 0,01$  opaženo u VI. i VII. mjesecu. Do porasta prosječnih vrijednosti srednjih mjesečnih vodostaja došlo je u I. do II. mjesecu te od X. do XII. mjeseca. Statistički značajan porast na razini  $p < 0,01$  opažen je u I., II. i XI. mjesecu. Rekonstrukcija tunela Krotuša i povećanje

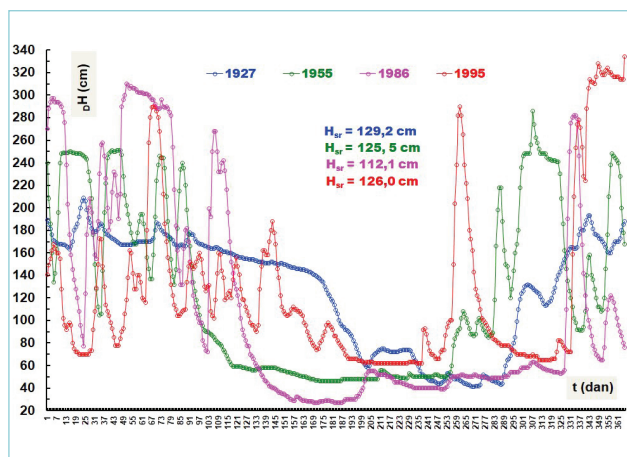


Slika 9: Grafički prikaz pet nizova prosječnih maksimalnih mjesečnih vodostaja opaženih na vodomjeru Šipak u sljedećim podrazdobljima: (1) I. 1923. - XI. 1938.; (2) III. 1940. - XII. 1973.; (3) I. 1974. - XII. 1981.; (4) I. 1982. - XII. 1993.; (5) I. 1994. - XII. 2018.

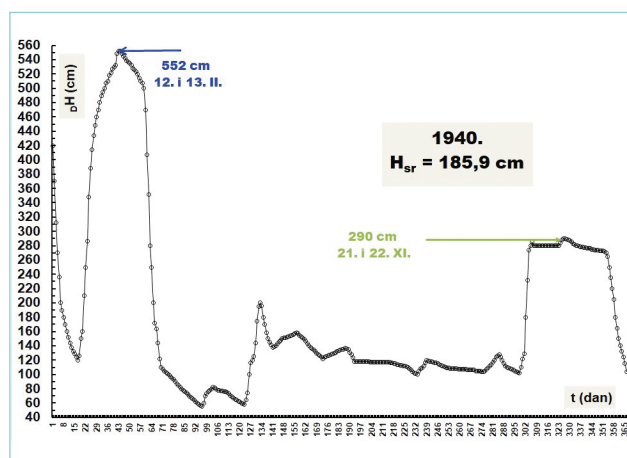
njegovog kapaciteta u trećem podrazdoblju (I. 1974. - XII. 1981.) utjecalo je na porast prosječnih maksimalnih godišnjih vodostaja u svim mjesecima osim siječnja. Statistički značajan porast na razini od  $p < 0,01$  opažen je u VIII. i X. mjesecu, a na razini od  $p < 0,05$  u IV. mjesecu. Snižavanje ulaznog praga u četvrtom podrazdoblju (I. 1982. - XII. 1993.) utjecalo je na snižavanje prosječnih maksimalnih vodostaja u svim mjesecima godine osim u travnju. Statistički značajan pad na razini od  $p < 0,01$  opažen je u VIII. mjesecu, a na razini od  $p < 0,05$  u V. i IX. mjesecu. Ponovnom uspostavljanjem praga u petom podrazdoblju (I. 1994. - XII. 2018.) došlo je do porasta prosječnih maksimalnih mjesečnih vodostaja u svim mjesecima osim u travnju i listopadu. Statistički značajan porast na razini  $p < 0,01$  pojavio se u VII. i VIII. mjesecu, a na razini  $p < 0,05$  u I., II. i IX. mjesecu

### 3.3. Analiza dnevnih vodostaja

Na slici 10 ucrtana su četiri hidrograma dnevnih vodostaja opaženi na vodomjeru Šipak u sljedeće četiri godine: (1) 1927. (plava boja); (2) 1955. (zelena boja); (3) 1986. (ljubičasta boja); (4) 1995. (crvena boja). Izabrane su godine koje su pripadale prvom (I. 1923. - XI. 1938.), drugom (III. 1940. - XII. 1973.), četvrtom (I. 1982. - XII. 1993.) i petom (I. 1994. - XII. 2018.) podrazdoblju. U prvom podrazdoblju, dakle prije puštanja u rad tunela Krotuša, moguće je uočiti blage i dugotrajne poraste hidrograma za razliku od naglih i relativno kratkotrajnih porasta hidrograma u godinama kada je u funkciji bio i tunel Krotuša. Maksimalni vodostaji u tom razdoblju bili su: (1) 286 cm 1955. godine; (2) 310 cm 1986. godine; (3) 334 cm 1995. godine. U godini 1927., dok tunel Krotuša nije postojao, maksimalni se vodostaj podigao na 209 cm, a u cijelom prvom podrazdoblju (I. 1923. - XI. 1938.) nije prešao vrijednost od 239 cm krajem 1937. godine.



Slika 10: Dnevni vodostaji opaženi na vodomjeru Šipak u sljedeće četiri godine: (1) 1927. (2) 1955. (3) 1986. (4) 1995.



Slika 11: Dnevni vodostaji opaženi na vodomjeru Šipak 1940. godine

Hidrogram dnevnih vodostaja u 1940. godini prikazan na slici 11 jasno ukazuje na ulogu povećanja kapaciteta tunela koji iz Bačinskih jezera evakuira vodu u Jadransko more na vodni režim jezera. U prvom dijelu godine, do početka ožujka, maksimalni vodostaj jezera iznosio je 552 cm. Krajem godine vrh hidrograma dosegaio je 290 cm. Razlog ovako velikih razlika maksimalnih vodostaja hidrograma je u činjenici što je tunel za evakuaciju vode iz Bačinskih jezera do kraja veljače ili početka ožujka zbog radova koji su se vršili na njemu ili bio zatvoren ili mu je kapacitet bio značajno smanjen. Krajem 1940. godine bio je u funkciji, što se odrazilo na značajno snižavanje vrha hidrograma.

#### 4. ZAKLJUČCI I SMJERNICE ZA BUDUĆI RAD

Osnovna namjera analiza izvršenih u ovom radu bila je da se kvantitativno ustanovi utjecaj pojedinog

antropogenog zahvata na vodni režim Bačinskih jezera. To predstavlja neophodan preduvjet za poduzimanje nužnih i žurnih zahvata na zaštiti ogromnih, ali nažalost do danas nedovoljno prepoznatih ekoloških, estetskih, socijalnih i ekonomskih vrijednosti ovog lokaliteta kao dijela šire regije delte Neretve.

Današnji vodni režim sustava Bačinskih jezera ne može se kontrolirati, jer ne postoje nikakvi građevinski hidrotehnički objekti na postojećim tunelima koji bi to omogućili. Očito je došlo vrijeme da se o njihovoj izgradnji započne ozbiljno razmišljati. Podloge obrađene u ovom radu i zaključci o utjecaju pojedinog zahvata mogli bi biti od velike koristi za planiranje složenog sustava kontrole vodnih resursa Bačinskih jezera kojima bi se osigurao njihov dugoročni održivi razvoj.

Prije nego se pristupi projektiranju sustava kontrole vodnih resursa Bačinskih jezera, bit će potrebno uspostaviti novi, suvremeni i kontinuirani sustav motrenja brojnih hidroloških, hidrogeoloških, kemijskih i klimatoloških parametara. Zahvaljujući današnjoj tehnologiji to ne bi trebao biti niti skup, niti dugotrajan proces. Opažanja bi trebala trajati najkraće tri, a najdulje pet hidroloških godina (od rujna do kolovoza).

U ovom radu nema smisla detaljnije ulaziti u planiranje sustava monitoringa, ali će se nastavno navesti što bi trebalo mjeriti. Kontinuirano mjerenje vodostaja jezera potrebno je uspostaviti na najmanje dva jezera. Treba nastaviti s mjerenjem vodostaja na vodokazu Šipak u jezeru Sladinac, ovoga puta automatskim registratorom, te uspostaviti automatski registrator razine vode na jezeru Crniševo. Na tom bi se jezeru trebao kontinuirano motriti salinitet, a moguće i neki drugi kemijski parametri. Potrebno je izgraditi meteorološku postaju u kojoj se osobita pažnja treba posvetiti mjerenju isparavanja. Poseban problem danas predstavlja precizna kontrola ulaznih količina vode tunelom Krotuša i izlaznih količina tunelom u Jadransko more. Od osobitog je značaja formirati sustav kontinuiranog monitoringa podzemnih voda. Pretpostavlja se da bi najmanji broj bušotina (ovog puta se ne radi o dubokim piezometrima) koji bi donekle mogao kontrolirati složeno kretanje krških podzemnih voda trebao biti između pet i deset. Dio piezometara trebao bi biti postavljen između jezera i mora, a dio sjeverno od jezera prema planinskom masivu Rilića.

Posebno zabrinjava stalno postepeno snižavanje srednjih godišnjih vodostaja i kontinuirano povećanje maksimalnih godišnjih vodostaja i maksimalnih godišnjih raspona vodostaja. Namjera članka je bila da se ovaj, nažalost, zaboravljenosti i ljepotici našeg krša posveti pažnja koju definitivno zaslužuje te da se time osigura njen dugoročan održivi razvoj. ■



## LITERATURA

- Bonacci, O. (1986.): Hidrološka analiza poplava u poljima u kršu. *Vodoprivreda*, 18(102-103), 219-229.
- Bonacci, O. (1987.): *Karst hydrology with special reference to the Dinaric karst*. Springer Verlag, Berlin, Germany.
- Bonacci, O. (2010.): Analiza nizova srednjih godišnjih temperatura zraka u Hrvatskoj. *Građevinar*, 62(9), 781-791.
- Bonacci, O. (2013.): Poljes, ponors and their catchments. *Treatise on Geomorphology, Vol 6, Karst Geomorphology* (ur. J. F. Shroder, A. Frumkin), 112-120, Academic Press, San Diego, US.
- Bonacci, O.; Švonja, M. (1984.): Promjene vodnog režima Bačinskih jezera. *Građevinar*, 36(2), 53-58.
- Curić, Z. (1988./1989.): Bačinska jezera-dragulj našeg krša, *Priroda*, 77, 3/4, 38-39.
- Curić, Z. (1995.): Hidrogeografske značajke donjoneretvanskog kraja. *Zbornik radova 1. hrvatska konferencija o vodama, Knjiga 2* (ur. D. Gereš), 463-469, Hrvatske vode, Zagreb.
- Filipčić, A. (1989.): Neke osobine klime delte Neretve. *Geografski glasnik*, 51, 179-188.
- Ilijanić, N.; Miko, S.; Hasan, O.; Čupić, D.; Mesić, S.; Širac, S.; Marković, T.; Šparica Miko, M.; Vlašić, A. (2015.): Paleolimnološka istraživanja Bačinskih jezera – jezero Crniševo. *Zbornik radova 6. hrvatske konferencije o vodama* (ur. D. Biondić, D. Holjević, M. Vizner), 437-446, Hrvatske vode, Zagreb.
- Ilijanić, N.; Miko, S.; Hasan, O.; Čupić, D.; Mesić, S.; Širac, S.; Marković, T.; Šparica Miko, M.; Vlašić, A. (2017.): Paleolimnološka priča o dva jezera; zaštićenog Vranskog jezera na Cresu i zaboravljenih Bačinskih jezera. *Zbornik radova znanstveno stručnog skupa Upravljanje jezerima i akumulacijama u Hrvatskoj*. (ur. J. Rubinić), 1-4, Hrvatsko društvo za zaštitu voda, Zagreb.
- Machiwal, D.; Jha, M. K. (2008.): Comparative evaluation of statistical tests for time series analysis: application to hydrological time series. *Hydrological Sciences Journal*, 53(2), 352-366.
- Margeta, J.; Knezić, S. (2001.): Izbor zaštite Vrgorskoga polja od plavljenja, *Hrvatske vode*, 35, 9, 163-175.
- Markowski, C. A.; Markowski, E. P. (1990.): Conditions for the effectiveness of a preliminary test of variance, *The American Statistician*, 44 (4), 322-326.
- Miko, S.; Ilijanić, N. (2015.): Paleolimnološka istraživanja Bačinskih jezera-Paleolimnological research of Bačina Lakes, *Godišnje Izvješće HGI*, 42-43.
- Piper, A. (1944.): A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25 (6), 914-928.
- Rubinić, J.; Radišić, M.; Bušelić, G.; Čuže Denona, M. (2019.): Kriptodepresije jezerskih sustava na području hrvatskog priobalja – hidrološko stanje i rizici od neželjenih promjena. *Zbornik radova 7. hrvatske konferencije o vodama* (ur. D. Biondić, D. Holjević, M. Vizner), 301-309, Hrvatske vode, Zagreb.
- Smirčić, A.; Glavaš, B.; Švonja, M. (1995.): Neke hidrološke i batimetrijske značajke Bačinskih jezera. *Zbornik radova 1. hrvatska konferencija o vodama, Knjiga 2* (ur. D. Gereš), 471-484, Hrvatske vode, Zagreb.
- Tomas, D.; Maldini, K.; Matić, N.; Marijanović Rajčić, M. (2013.): Primjena indeksa kvalitete vode u ocjeni kakvoće vode krških jezera. *Hrvatske vode*, 21(86), 303-310.

### The impact of hydrotechnical interventions on the water regime of Baćina Lakes

**Abstract.** The analysis included the characteristic (minimum, average and maximum) daily, monthly and annual water levels at the water meter Šipak, which is located in Sladinac Lake, one of the five connected lakes (Plitko, Podgora, Očuša, Sladinac and Crniševo Lakes) and one unconnected lake (Vrbnik Lake) in the system of Baćina Lakes. A series of daily water levels from 1 January 1923 to 31 December 2018 was available, with interruptions from 1 October 1942 to 31 June 1945 and from 1 January 1959 to 31 December 1972. The analyses focused on the quantification of anthropogenic interventions on the water regime of the system Baćina Lakes. The tunnel Krotuše, which is used for evacuating flood water from the karst field Vrgorac and letting it into the system Baćina Lakes, started operating on 21 November 1938. It was reconstructed several times, the most comprehensively at the end of 1973. The tunnel evacuating water from Baćina Lakes to the Adriatic Sea started operating at the end of 1912. The works on its extension were carried out in the period from the end of 1938 to the beginning of 1940. In the 1982 - 1993 period, a 80 cm tall sill preventing seawater intrusion into the lake system during tides was removed from the tunnel's entrance. Detailed statistical analyses based on applying the F test (Markowski and Markowski, 1990) and t-test (Machiwal and Jha, 2008) determined the impact of each individual mentioned intervention on the change in the water regime of the system Baćina Lakes on the year-and-month time scale. A continuous decrease in the average annual water levels was measured at the water meter Šipak. A permanent increase in the maximum annual water levels was determined as well.

**Key words:** hydrology, water level, anthropogenic influence, Baćina Lakes

### Der Einfluss der hydrotechnischen Bauten auf das Wasserregime der Baćina-Seen

**Zusammenfassung.** Die charakteristischen (minimalen, mittleren und maximalen) Tages-, Monats- und Jahreswasserstände sind analysiert worden, die am Pegelstand Šipak am See Sladinac (einer von fünf miteinander verbundenen Seen, nämlich Plitko, Podgora, Očuša, Sladinac und Crniševo) und an einem selbständigen See (Vrbnik) im Baćina-Seensystem gemessen wurden. Eine Reihe von Tageswasserständen vom 1. Januar 1923 bis 31. Dezember 2018, mit den Unterbrechungen zwischen 1. Oktober 1942 und 31. Juni 1945 und zwischen 1. Januar 1959 und 31. Dezember 1972, stand zur Verfügung. Die Analysen konzentrierten sich auf die Quantifizierung des Einflusses von anthropogenen Eingriffen auf das Wasserregime des Baćina-Seensystems. Der Tunnel Krotuša, durch welchen Hochwasser aus dem Vrgorac-Feld in das Baćina-Seensystem geleitet wird, wurde am 21. November 1938 geöffnet. Er wurde mehrmals renoviert, die größte Renovation fand Ende 1912 statt. Der Tunnel, durch welchen das Wasser aus den Baćina-Seen ins Adriatische Meer geleitet wird, wurde Ende 1912 geöffnet. Die Verbreitungsarbeiten wurden im Zeitraum zwischen Ende 1938 und Beginn 1940 durchgeführt. Von 1982 bis 1993 wurde am Tunneleingang eine 80 cm hohe Schwelle entfernt, die das Eindringen des Meereswassers in das Baćina-Seensystem bei Flut verhinderte. Mit weiteren statistischen Analysen anhand vom F-Test (Markowski und Markowski, 1990) und t-Test (Machiwal und Jha, 2008) wurde der Einfluss jedes einzelnen technischen Eingriffs auf die Änderung des Wasserregimes des Baćina-Seensystems auf der Zeitskala von Jahr und Monat festgestellt. Es wurde eine kontinuierliche Verringerung von mittleren am Pegelstand Šipak gemessenen Jahreswasserständen festgestellt. Es wurde auch eine ständige Erhöhung der maximalen Jahreswasserstände beobachtet.

**Schlüsselwörter:** Hydrologie, Wasserstand, anthropogene Einflüsse, Baćina-Seen