

SEDRA PLITVIČKIH JEZERA – FANTASTIČAN SPOJ KEMIJE I BIOLOGIJE

dr.sc. Maja Vurnek

Javna ustanova

Nacionalni park Plitvička jezera,

Josipa Jovića 19, Plitvička Jezera, Hrvatska

maja.vurnek@np-plitvicka-jezera.hr

Sedra (engl. *tufa*) u slatkovodnim ekosustavima nastaje dinamičnom interakcijom kemijskih i bioloških čimbenika te ovisi o elementima koji trebaju biti prisutni poput zasićenja vode kalcijevim karbonatom, odgovarajuće pH vrijednosti i niske koncentracije organske tvari dok će postojanje biološke komponente poput mahovina, algi kremenjašica i nekih beskralježnjaka također imati važnu ulogu u nastajanju sedrenih barijera. Plitvička jezera kao najveći i najstariji nacionalni park te područje iznimne prirodne vrijednosti, uvršteno na Listu svjetske prirodne baštine UNESCO-a, upravo jedinstvenu univerzalnu vrijednost prepoznaje u sedrenim barijerama i procesu njihovog nastanka. Kaskadni jezerski sustav nastao je uslijed povoljnih uvjeta za taloženje kalcijevog karbonata (sedre). Rast sedrenih barijera ovisi i o hidrološkim prilikama, a nepovoljno djeluju erozijski procesi kao i promjene povezane s povećanjem koncentracije hranjivih tvari dušika i fosfora, a koje dovode do eutrofikacije. Proces osedavanja u kaskadnom sustavu Plitvičkih jezera nije ugrožen, ali svakako je nužno kontinuirano pratiti moguće promjene.

Ključne riječi: sedrene barijere, nacionalni park, slatkovodni ekosustav, kalcijev karbonat, sedrotvorni organizmi

1. UVOD

Vodeni sustav Plitvičkih jezera smješten je u središnjem planinskom ili visokom Dinarskom pojasu te pripada rijeci Savi odnosno crnomorskom slivu (Bonacci, 2014.) i upravo je jedno od najdojmljivijih vodenih područja Republike Hrvatske zbog prepoznatljivih vizura slapova, jezera i sedrenih barijera. Područje Plitvičkih jezera zaštićeno je kao nacionalni park od 8. travnja 1949. godine u površini od 29.630,8 ha (PU NPPJ, 2019.). No, na ovoj ukupnoj površini upravo je s najmanjim udjelom (manje od 1 %) zastupljen vodeni sustav, dok najveći dio površine zauzimaju šumska područja (81 %), travnjaci (oko 15 %) i površine izmijenjene antropogenim aktivnostima (oko 3 %) poput naselja, prometnica i slično (PU NPPJ, 2019.). Vrijednost prirodnog bogatstva vode u krškom području prepoznata je i na svjetskoj razini upisom Nacionalnog parka Plitvička jezera u listopadu 1979. godine na Listu svjetske baštine UNESCO-a (engl.

United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) kojim je i službeno priznata prirodna posebnost Plitvičkih jezera. Netaknuti niz jezera nastalih pregrađivanjem uslijed rasta sedrenih barijera kao rezultat kontinuirane interakcije između vode, zraka i sedimenta (geološke podloge), prisustvo mahovina, algi i bakterija te netaknutost procesa stvaranja sedre, upravo je ono što oblikuje glavne kriterije kojima se opisuje jedinstvena univerzalna vrijednost posebno definirana za svako područje prirodne baštine (WHC, 2019.). Također, prirodna vrijednost nacionalnog parka istaknuta je bogatom biološkom raznolikošću biljnih i životinjskih vrsta kojima je ovo zaštićeno područje stanište te tako na području nacionalnog parka nalazimo tri velike zvijeri medvjeda, vuka i risa, razne druge sisavce (preko 50 vrsta), ptice (168 vrsta), ribe (9 vrsta), vodozemce i gmazove, a posebno je bogat svijet vodenih i kopnenih

beskralježnjaka (PU NPPJ, 2019.). Važno je istaknuti kako je cjelokupno područje Nacionalnog parka dio Natura 2000 ekološke mreže s 21 ciljnom vrstom ptica, 28 ciljnih vrsta biljaka i životinja te 20 stanišnih tipova (NN 80/2019.).

Vodeni sustav Plitvičkih jezera koji obuhvaća krške izvore, vodotoke (potoke i rječice) te jezera, predstavlja slatkovodni ekosustav nacionalnog parka, raznolik upravo onoliko koliko su po svojim hidrološkim, kemijskim i biološkim karakteristikama raznolika staništa poput izvora, tekućica i jezera. Upravo je dodatna zaštita slivnog područja jezerskog sustava prepoznata 1997. godine kada su proširene granice nacionalnog parka na današnju površinu, za otprilike 10.000 ha te je proširenje ujedno uključilo i ne gospodarene dijelove šumskih površina (IUCN-WCMC, 2000.). Za glavna izvorišta nacionalnog parka, krške izvore Bijela i Crna rijeka smještene južno od jezerskog sustava, ovim su proširenjem granica dodatno zaštićena njihova slivna područja, iako se slivno područje Bijele rijeke ipak treba dodatno dokazati bojanjem (trasiranjem) podzemnih sustava, obzirom da istraživanja provedena 80-ih godina prošlog stoljeća nisu dala jasne rezultate za izvor Bijele rijeke, dok je za izvorište Crne rijeke slivno područje na području Brezovačkog polja (Dešković i dr., 1981.). Krški izvori ovih rijeka su za jezerski sustav neizmjerljivo vrijedni kako u hidrološkom tako i u ekološkom smislu, a nakon njihovog spoja nastaje rijeka Matice koja nakon naselja Plitvički Ljeskovac utječe u Prošćansko jezero (slika 1).

Količina vode u jezerskom sustavu Plitvičkih jezera procijenjena je na 22,95 milijuna m³ (Babinka, 2007.),

a upravo se u jezerskom sustavu odvija jedan od najdojmljivijih procesa kojim je i uvjetovan nastanak kaskadnog jezerskog sustava, a to je proces stvaranja odnosno taloženja sedre i rasta sedrenih barijera (slika 2).

Jezerski sustav sastoji se od 16 jezera, koji prema nadmorskoj visini, ali i sastavu geološke podloge dijelimo na Gornja i Donja jezera, pri tome se Gornja jezera nalaze na dolomitnoj podlozi dok su Donja jezera na vapnencima. Prvo gornje jezero u sustavu, Prošćansko jezero, nalazi se na 636 m n.v. i ima 68 ha, dok je najveće jezero u sustavu Gornjih jezera jezero Kozjak na 535 m n.v. s površinom od 82 ha te je ujedno i najdublje jezero s 47 m dubine. Nakon zadnjeg jezera u sustavu, Novakovića broda, spuštamo se preko vodopada zvanih Sastavci na izvor rijeke Korane na 475 m n.v. u koju također dotječu i vode potoka Plitvica preko vodopada Veliki slap (slika 3).

Karakteristični su i pritoci jezerskog sustava, pojedini povremeni, ali i oni stalni poput rijeke Matice i potoka Sušnja koji utječu u Prošćansko jezero, potoka Rječica i povremenog potoka Matijaševac koji utječu u jezero Kozjak, dok će potokom Plitvica dotjecati voda u kanjon vodopadom Veliki slap, ujedno i najvišim vodopadom u Republici Hrvatskoj (PU NPPJ, 2019.).

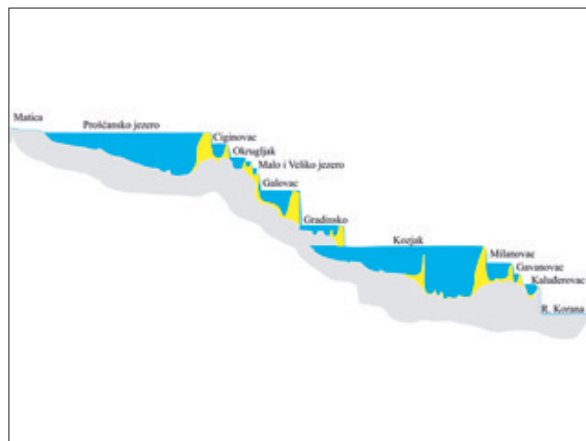
Ovako kompleksan jezerski kaskadni odnosno baražni vodeni sustav i bogatstvo vode u krškom području, svakako predstavlja neiscrpan istraživački poligon posebno sa stajališta što boljeg razumijevanja procesa nastanka sedrenih barijera. Zbog iznimne heterogenosti i varijabilnosti geoloških, morfoloških, hidrogeoloških, hidroloških, hidrauličkih, ekoloških i



Slika 1 Utjecanje rijeke Matice u Prošćansko jezero (arhiva NPPJ)



Slika 2: Sedrena barijera i vodopad Veliki prštavci na Gornjim jezerima (arhiva NPPJ)



Slika 3: Jezerski sustav odijeljen sedrenim barijerama (žuto). Na prikazu nisu vidljiva sva jezera zbog položaja presjeka (arhiva NPPJ)

drugih čimbenika, promatranje krških sustava uvijek zahtijeva interdisciplinarni pristup (Bonacci i dr., 2008.).

2. SEDRA

Definicije sedre kao pojma su raznovrsne i ovise o stajalištu pojedinih autora koji u objašnjavanje pojma uključuju različite čimbenike (temperaturu, hidrološko stanje, način zasićenja itd.). Autor Pentecost (2005.) sedru definira kao: „Kemijski istaložen kontinentalni vapnenac nastao oko malih pukotina, izvora, duž rijeka i potoka, povremeno u jezerima i sastoji se od kalcita ili aragonita, niske do umjerene međukristalne poroznosti i često s visokom poroznošću unutar vadoznog ili plitkog freatičkog okoliša. Taloženje se odvija primarno kroz prijenos ugljikovog dioksida iz ili u podzemni izvor što dovodi do prezasićenja kalcijevim karbonatom s nukleacijom/rastom kristala ispod potopljene površine.“ Ipak, ova definicija ne uključuje opis biološkog čimbenika, pa stoga autori Ford i Pedley (1996.) opisuju sedru kao „Slatkovodne kalcitne naslage, uglavnom nastale u kasnom kvartaru kao produkt istaloženog kalcijevog karbonata pri temperaturnim uvjetima bliskim temperaturi okoliša i često sadrže ostatke mikro i makrofita, beskraljježnjaka i bakterija.“

U engleskoj literaturi nailazimo na pojmove *tufa* i *travertine*, koji se ipak prema pojedinim znanstvenicima različito definiraju. Tako se pojam *tufa* koristi za opis svih slatkovodnih kalcitnih karbonata, s niskim udjelom magnezija i nastalih u hladnijim ili temperaturnim uvjetima bliskim okolišu, dok se pojam *travertine* koristi za opis slatkovodnih termalnih i hidrotermalnih naslaga kalcijevog karbonata uz fizikalno-kemijske i mikrobnog precipitate, ali bez makrofitskih ili životinjskih ostataka (Ford i Pedley, 1996.). Pojam travertin potječe od talijanske riječi *travertino* koja je izvedena od latinske riječi *lapis tiburtinus* ili kamen iz Tivolija, prema gradu u kojem se i nalaze ove naslage. Važno je istaknuti kako su naslage travertina bile vrlo često građevni materijal još od doba Grka i Rimljana, ali i sedrene naslage ili „vapnenačka“ sedra također je služila kao građevni materijal zbog porozne strukture i jednostavnog

oblikovanja (Anzalone i dr., 2007.). Sedra se kao građevni materijal povremeno koristila i na području Nacionalnog parka Plitvička jezera za izgradnju nekih građevina, a posebno su s velikom pažnjom korišteni blokovi sedre u impresivnoj gradnji zidova branič-kule Krčingrada (Pleše, 2011.). Nedavno obnovljen Radekin mlin iznad Velikog slapa sa sedrenim zidovima, također je izvrstan svjedok nekadašnje graditeljske baštine uz plitvičke vodotoke (slika 4).

Travertinske naslage nalazimo široko rasprostranjene u središnjem i južnom dijelu Italije (Anzalone i dr., 2007.) te u Turskoj i istočnoj Grčkoj, dok različite oblike sedrenih tvorevina (vapnenačke sedre) nalazimo u Španjolskoj (dolina Tajuña, provincija Guadalajara, prirodni park Ruidera) i Siciliji te naravno na Plitvičkim jezerima (Pedley, 2009.). Aktivne sedrene naslage nalazimo i u sjeveroistočnoj Engleskoj (Perri i dr., 2012.), dok je za područje Republike Hrvatske posebno važno istaknuti Nacionalni park Krka s rijekom Krkom (Horvatinčić i dr., 2000.; Lojen i dr., 2009.), ali sedrene naslage ćemo naći i u drugim krajevima Dinarskog krša.



Slika 4: Obnovljen Radekin mlin uz potok Plitvica iznad Velikog slapa (Jurica Cindrić)

2.1. Taloženje kalcijevog karbonata – sedre

Procesu taloženja kalcijevog karbonata prethodi niz drugih reakcija u kojima glavnu ulogu ima ugljikov dioksid (CO₂) koji prelazi iz plinovitog u tekuće stanje te u tekućem stanju reagira s vodom. Kao produkt ove reakcije nastaje karbonatna kiselina. Karbonatna kiselina otapa karbonatne stijene te nastaje otopina kalcijevih i bikarbonatnih iona (Ford i Williams, 2007.). Primarni proces taloženja kalcijevog karbonata u prirodnim vodama opisuje se sljedećom kemijskom reakcijom, jednadžba (1) (Chen i dr., 2004.):



Za proces taloženja kalcijevog karbonata važno je da vode budu gotovo 5 do 10 puta prezasićene ovim spojem, a takvo visoko zasićenje rezultat je izlaženja CO₂ iz vode. Uklanjanje CO₂ iz vode može biti potaknuto turbulencijama i miješanjem vode (primjerice na slapovima) te metaboličkim preuzimanjem uslijed fotosinteze biljaka (Chen i dr., 2004.).

Procesom evaporacije kojim se smanjuje volumen vode i povećava koncentracija iona u vodi, može nastati prezasićenost vode kalcijevim karbonatom što će također potaknuti njegovo taloženje. No, proces evaporacije zbog iznimno brzog prolaženja vode preko slapova nije na takvim lokacijama značajan. Utjecaj na taloženje kalcijevog karbonata imat će i površina područja kontakta zrak-voda. Što je ta površina veća, ujedno je i stopa taloženja veća, dok je veličina površine kontakta podloga-voda zanemariva za proces taloženja (Chen i dr., 2004.).

Na slapovima je taloženje kalcijevog karbonata vrlo visoko. Razlozi za to su što je površina kontakta voda-zrak te brzina strujanja vode povećana i to doprinosi „učinku prozračivanja“, „učinku niskog tlaka“ i „učinku jakog protoka“ te se tako ubrzava oslobađanje CO₂ i vode postaju prezasićene kalcijevim karbonatom koji se zatim taloži (Lu i dr., 2000.).

Praćenjem brzine taloženja sedimenta odnosno sedre u površinskim vodama Plitvičkih jezera, uočeno je kako je ta brzina gotovo 5 do 10 puta veća u površinskim vodama nego u dubinama jezera iz razloga što je izlaženje CO₂ iz

vode puno brže pa je stoga i stopa taloženja kalcijevog karbonata viša. Količina prirasta sedimenta ujedno se razlikuje sezonski te je prirast veći u ljetnim mjesecima (30 – 50 g mjesec⁻¹), a uočeno je kako i brzina protoka ima utjecaja na prirast, što ostavlja prostora za dodatne razlike u procesu taloženja ovisno o mikro-uvjetima na pojedinim dijelovima sedrenih barijera (Horvatinčić i dr., 2014.) (slika 5).

Matoničkin Kepčija i dr. (2005.) utvrđuju prema praćenju stopi osedavanja u jezerskom sustavu Plitvičkih jezera, kako je stopa osedavanja 4,4 puta viša na sedrenim barijerama Donjih jezera u odnosu na Gornja jezera te je najniža stopa osedavanja uočena u hladnijem dijelu godine (0,13 mg dm⁻² d⁻¹), a najviša u toplijem dijelu godine (prosječno 8,91 mg dm⁻² d⁻¹). Obrazac razlika u godišnjem taloženju kalcijevog karbonata nije samo zamijećen za sedru Plitvičkih jezera, već je i u istraživanju sedrenih naslaga u Japanu utvrđena viša stopa taloženja u razdoblju ljeto – jesen, dok je slabija stopa karakteristična za zimu – proljeće (Kano i dr., 2003.).

2.2. Biološka komponenta u procesu taloženja

Vodene mahovine poput *Palustriella commutata* (Hedw.) Ochyra (= *Cratoneuron commutatum* (Brid.) G. Roth.), *Eucladium verticillatum* (With.) Bruch & Schimp. i *Ptychostomum pseudotriquetrum* (Hedw.) J.R. Spence & H.P. Ramsay (= *Bryum pseudotriquetrum* (Hedw.) G. Gaertn., B. Mey. & Scherb.) poznate su kao sedrotvorni organizmi između čijih se površina razvija biofilm mikroorganizama poput cijanobakterija, algi kremenjašica i mikroskopskih zelenih algi poput alge *Oocardium stratum* (Golubić i dr., 2008.). Istraživanjem sedrenih barijera Plitvičkih jezera potvrđeno je prisustvo 161 svojte bentičkih algi među kojima su bile najbrojnije alge kremenjašice (*Bacillariophyceae*) sa 104 svojte, a zatim cijanobakterije (*Cyanophyceae*) s 41 svojtom (Stanković i dr., 2017.). Najučestalija vrsta mahovina sedrenih barijera Plitvičkih jezera je upravo mahovina *Palustriella commutata* koja je zastupljena s velikom biomasom (slika 6). Način na koji mahovine aktivno sudjeluju u procesu stvaranja sedre nalazi se u procesu oduzimanja ugljikovog dioksida (CO₂) iz iona otopljenog



Slika 5: Detalj sedrene barijere obrasle mahovinom (A) i jezerski sediment koji se taloži na dnu i na drveću (B) (arhiva NPPJ)



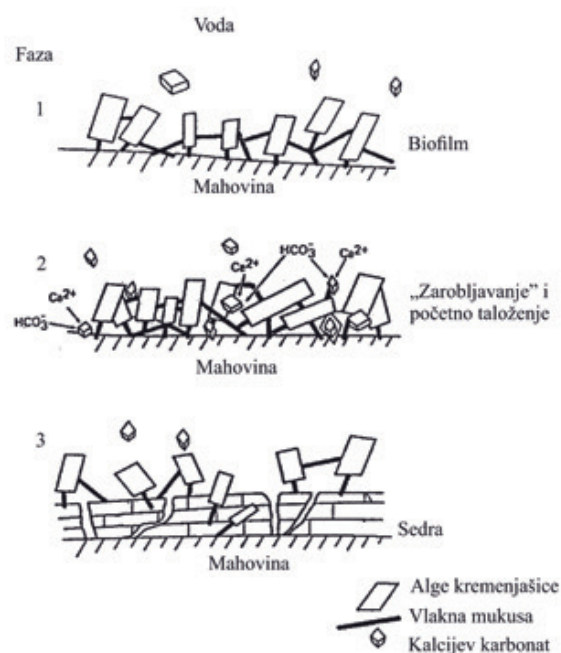
Slika 6: Sedrene barijere Gornjih jezera obrasle mahovinom *Palustriella commutata* (Antun Alegro)

hidrogenkarbonata (HCO_3^-) pri čemu se kao produkt takve reakcije izlučuje kalcijev karbonat (CaCO_3) na površini biljke (Alegro i dr., 2019.).

Kako biofilm mikroorganizama povezuje kristale istaloženog kalcijevog karbonata, donji dijelovi mahovine postaju spužvasti karbonatni sediment, no one i dalje nastavljaju rasti izvan kalcificiranih dijelova. Tako nastaje zanimljiv oblik sedrenih naslaga koji pri dnu ima osedrenu mahovinu, a prema površini se probijaju živa stabalca mahovine koja dalje rastu. Nastajanje sedrenih barijera usko je povezano s biološkim čimbenicima upravo preko staničnog produkta mukusa kojega stvaraju razne alge i koji omogućuje „zarobljavanje“ kristala karbonata te se tako stvaraju jezgre oko kojih se dalje taloži kalcijev karbonat odnosno sedra (Emeis i dr., 1987.) (slika 7). Chafetz i dr. (1994.) smatraju kako se kalcit (sedra) taloži na bilo koji supstrat prisutan u vodi i taj prvi kontakt je upravo s biološkom komponentom poput cijanobakterija, algi, mahovine, lišća ili korijena. Organizmi koji nastanjuju mjesta gdje dolazi do intenzivnog taloženja kalcijevog karbonata karakterizira i brži rast kako bi bili bolje prilagođeni faktoru „zatrpanja“ (Matoničkin i dr., 1971.).

Povezanost istaloženih kristala kalcita i organske odnosno biološke komponente još je dodatno potvrđena testom postavljanja bakrenih pločica u vodu u odnosu na stakalca ili kalcitne pločice jer cijanobakterije i alge unutar samo nekoliko sati koloniziraju materijale poput stakla, dok nikako ne bakrene pločice te se na njima ne stvara talog sedre i organske tvari (Janssen i dr., 1999.). No, ne sudjeluje samo biljna komponenta u procesu taloženja odnosno „hvatanja“ kristala kalcita. Organizmi poput ličinki kukaca (*Insecta*) mušica svrbljivica

iz porodice *Simuliidae* (*Diptera*) i tulara iz porodice *Hydropsychidae* (*Trichoptera*) na svilene niti koje izlučuju za potrebe prehrane filtriranjem, ujedno „lijepo“ kristale kalcita te tako sudjeluju u procesu osedavanja (Matoničkin Kepčija i dr., 2005.). Osedreni ostaci ovih organizama mogu biti svjedoci paleotokova što može pomoći u rekonstrukciji nekadašnjeg sedrenog okoliša (Drysdale i dr., 2003.).



Slika 7: Faze taloženja kalcijevog karbonata na biofilm algi kremenjašica u mahovinama i nastanak sedre (preuzeto i prerađeno iz Emeis i dr., 1987.)



Slika 8: Pogled na kaskadni sustav Gornjih jezera odijeljenih sedrenim barijerama (arhiva NPPJ)

3. SEDRENE BARIJERE

Formama autohtonih naslaga sedre mogu se smatrati nakupine na izvorima (termalnim), grebeni, kaskade, jezerski sediment te barijere. Barijere će karakterizirati lokalizirano vertikalno srastanje što dovodi do zatvaranja vode u bazene i jezera, što ipak izostaje kod kaskada i čini osnovnu razliku između kaskada i barijera. Za formu kao što su barijere koristi se i pojam „baražno“, a one se duž vodotoka pojavljuju u serijama, ponekad u pravilnom i predvidivom obrascu. Veće riječne barijere stvaraju spektakularna jezera među kojima su najpoznatija upravo Plitvička jezera (Pentecost, 2005.) (slika 8).

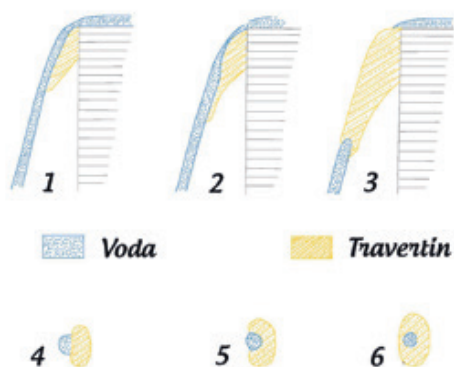
Među prvim značajnim imenima u istraživanju sedrenih barijera Plitvičkih jezera, svakako se ističe ime akademika prof. Ive Pevaleka, koji je predano istraživao vodeni ekosustav u prvoj polovini 20. stoljeća. Profesor Pevalek iznosi zapažanja o biogenom taloženju vapnenca, o biološkim tipovima sedre koju dijeli na kratoneuronsku sedru (od mahovine *Cratoneuron commutatum* (Hedw.) Roth) i briumsku sedru (*Bryum pseudotriquetrum* (Hedw.) P. Gaertn.) te o morfološkim oblicima sedre poput zastora, žljebova i cijevi uz koje donosi opise njihovog nastajanja (slika 9). Također, prof. Pevalek donosi na osnovi svojih istraživanja algi i mahovina odgovor na pitanje što je suština Plitvičkih jezera i zaključuje kako: „Suština Plitvica leži u sedri i sedrotvornom bilju“ (Pevalek, 1958.).

Također, važno je napomenuti kako su i mnogobrojni drugi istraživači sudjelovali u razumijevanju specifičnog vodenog ekosustava Plitvičkih jezera poput Emilija i

Stilinovića (sanitarna kakvoća vode), Kostić-Brnek, Matoničkin, Pavletić, Habdija (limnologija), kao i Petrik i Iveković (hidrologija, hidrokemija) te mnogi drugi (Habdija i dr., 2011.). U drugoj polovini 20. stoljeća autori Srdoč i dr. (1985.) dali su odgovore na pitanje koji su uvjeti potrebni u vodi kako bi proces stvaranja sedre bio aktivan te je tako definirano da je za proces važna:

- prezasićenost vode kalcijevim karbonatom iznad 3 (indeks zasićenja od 5 do 7),
- pH-vrijednost vode iznad 8,0 i
- koncentracija otopljene organske tvari u vodi niža od 10 mg L⁻¹ ugljika.

U vodenom sustavu Plitvičkih jezera, koji ujedno obuhvaća glavne izvore Bijele i Crne rijeke te izvor potoka Plitvice, različiti su uvjeti za taloženje kalcijevog karbonata. Na krškim izvorima nema taloženja iz razloga što je otopina CaCO₃ u ravnoteži (indeks zasićenja je oko 1). U tokovima rijeka i potoka koje nastavljaju svoj put iz izvorišta, taloženje CaCO₃ nije značajno jer iako dolazi do prezasićenosti u korist kalcijevog karbonata, ipak uvjeti poput odgovarajućeg pH nisu prisutni. I konačno, u jezerskom sustavu s mnogobrojnim slapištima, taloženje kalcijevog karbonata te daljnji nastanak sedre intenzivan je, dok se zbog već prethodno navedenih fizikalnih karakteristika poput strujanja vode i biološke komponente, razlikuje od lokacije do lokacije. Prema kemijskim karakteristikama, koncentracija CO₂ i HCO₃⁻ se nizvodno smanjuje kao rezultat isplinjavanja CO₂, a u istom sustavu značajan je i pad ukupne i kalcijeve



Slika 9: Postanak sedrene cijevi: 1 – 3 pogled sa strane, 4 – 6 u presjeku (preuzeto i prerađeno iz Pevalek, 1958.)

tvrdće praćene u stupcu vode (Srdoč i dr., 1985.; Barešić i dr., 2011.).

Veliki naglasak u istraživanjima sedre stavljen je i na utvrđivanje starosti sedrenih barijera. Rast sedre podudara se s toplim geološkim razdobljima te prema mjerenju izotopa ^{18}O zaključuje se kako sedra nastaje u klimatskim prilikama sličnim današnjima. Prema mjerenju izotopa ^{14}C u većem dijelu površinskih naslaga Plitvičkih jezera, može se zaključiti kako te naslage pripadaju razdoblju holocena, odnosno stare su između 6.000 i 8.000 godina. Datiranjem uzoraka sedre metodom

$^{230}\text{Th}/^{234}\text{U}$ s područja Plitvičkog Ljeskovca i iznad gornjih tokova Bijele rijeke, zaključilo se kako naslage pripadaju Riss/Würm razdoblju. Pojedine naslage sedre, primjerice na lokalitetu Krčingrad, imaju starost veću od 300.000 godina (Srdoč i dr., 1985.; Horvatinčić i dr., 2000.).

Pogledom u jezerski sustav iz zraka, mogu se uočiti još jedne neobične sedrene forme u obliku potopljenih sedrenih barijera. Takve barijere su svakako svjedoci nekadašnjeg izgleda jezerskog sustava, a posebno je zanimljiva potopljena barijera najvećeg plitvičkog jezera Kozjak (slika 10). Prema trenutnim procjenama, prije gotovo 400 godina, barijera je bila aktivna i razdvajala jezero Kozjak na dva jezera. Međutim, puknućem barijere ili vjerojatnije intenzivnim rastom barijere nizvodno prema jezeru Milanovac, došlo je do rasta razine vode što je uvjetovalo spajanje dvaju jezera te je sedrena barijera potopljena, a jezero Kozjak je postalo jedno jezero (PU NPPJ, 2019.).

Mnogobrojne manje barijere npr. slapova Milke Trnine također su s vremenom potopljene uslijed rasta razine vode i/ili nakon intenzivnih erozivnih procesa u prošlosti, što je za posljedicu ostavilo današnji značajno različit izgled tog dijela jezerskog sustava (slika 11).

4. MOGUĆE UGROZE

Stvaranje sedre kao osjetljivi biodinamički proces svakako je moguće zaustaviti ili usporiti uslijed utjecaja na pojedine čimbenike koji su ključni ne samo za kemijsko



Slika 10: Potopljena sedrena barijera jezera Kozjak (arhiva NPPJ)



Slika 11: Slapovi Milke Trnine fotografirani 30-ih godina prošlog stoljeća (A) i današnji izgled slapova bez manjih barijera (B) (arhiva NPPJ)

taloženje kalcijevog karbonata (Srdoč i dr., 1985.) već i za biološko vezanje kristala i rast sedre (Emeis i dr., 1987.). Narušavanje kompleksne biološke komponente mahovina, algi i cijanobakterija zasigurno će utjecati na proces stvaranja sedre. Promjene u koncentraciji organskih tvari odnosno njihovo povećanje, svakako bi usporilo proces stvaranja sedre, dok bi veći dotok hranjivih soli poput spojeva dušika i fosfora imalo izravan učinak na cijeli sustav i izazvalo niz promjena u njegovoj trofiji. Pojam eutrofikacije objašnjava se kao proces obogaćivanja vodnog tijela hranjivim solima, što rezultira pojačanim rastom fitoplanktona i makrofitske vegetacije. Eutrofikacija je ujedno i ozbiljan problem koji direktno utječe na biljni i životinjski svijet obzirom na smanjivanje koncentracije otopljenog kisika što u konačnici uzrokuje značajne promjene u bioraznolikosti te u hranidbenim odnosima unutar vodenog ekosustava. Kontinuirana eutrofikacija također dovodi do izdizanja sedimenta jezera što rezultira zamočvarenjem te nastupa prelazak iz vodenog ekosustava u kopneni ekosustav (Ansari i dr., 2011.). U slučaju Plitvičkih jezera, jezerski sediment koji se taloži bi u geokronološki vrlo kratkom razdoblju doveo do zatrpavanja jezera, odnosno smanjivanja njegove dubine, ali s obzirom da je zamijećeno kako je vertikalni rast sedrenih barijera i taloženje sedre intenzivno i brže

upravo na sedrenim barijerama nego u jezerima, to se ipak ne događa (Horvatičić i dr., 2014.).

Za sada, Prošćansko jezero se prema pokazateljima poput prozirnosti, koncentraciji ukupnog fosfora, klorofila *a* i otopljenog kisika nalazi u oligotrofnom ka mezotrofnom stanju, dok je jezero Kozjak po istim pokazateljima opisano kao oligotrofno jezero (Habdića i dr., 2011.).

Prirodan proces starenja jezera, odnosno prelazak u više trofičke razine (eutrofikacija) za ovaj sustav je vjerojatno neizbježan, no podaci upućuju na niske koncentracije hranjivih soli ponekad i ispod granice detekcije analitičke metode u odnosu na podatke iz 80-ih godina prošlog stoljeća (Brozinčević i dr., 2013.), a zamijećen je i negativan trend praćenih pokazatelja hranjivih soli dušika i fosfora za vodeni ekosustav Plitvičkih jezera u posljednjih 11 godina, što svjedoči o očuvanosti trenutnih oligotrofnih uvjeta (Vurnek i dr., 2021.).

Jedna od značajnijih ugroza svakako su klimatske promjene koje su pokrenute djelovanjem čovjeka, a koje između ostalog dovode do porasta temperature vode te do ekstremnih vremenskih prilika (IPCC, 2018.). Ove promjene zasigurno će u budućnosti još više utjecati na osjetljiv slatkovodni sustav Plitvičkih jezera. Usporedbom podataka temperature vode u jezerskom sustavu za



Slika 12: Odlomljena sedrena barijera iz Milinog jezera u Gradinsko jezero (A) i presušene sedrene barijere nizvodno od Milinog jezera (B) (arhiva NPPJ)

razdoblje 1981. – 1986. i 2010. – 2014., uočen je porast srednje temperature vode za 1,5 °C (Sironić i dr., 2017.), dok rezultati praćenja kakvoće vode koje nacionalni park provodi od 2006. godine također upućuju na pozitivan trend temperature vode na lokacijama lotičkih biotopa sedrenih barijera (Vurnek i dr., 2021.).

Naravno, na rast i razvoj sedrenih barijera veliki utjecaj ima i hidrologija sustava odnosno promjene brzine strujanja vode i protoka, kao i mehanički utjecaj na barijere poput erozije ili odlamanje barijera uslijed djelovanja leda. Upravo jedno značajno odlamanje sedrene barijere dogodilo se u recentnom razdoblju nakon intenzivnog otapanja snijega početkom travnja 2018. godine te se tom prilikom dio barijere na Gornjim jezerima u duljini od približno 15 m odlomio, a zatim je nastao dublji kanal kojim je voda u većoj mjeri otjecala. Razina vode u Milinom jezeru se u danu snizila za 50 cm, a posljedično su potpuno presušila manja nizvodna jezera te sedrene barijere jer je izostalo karakteristično prelijevanje vode preko manjih slapova (Brozinčević i dr., 2018.) (slika 12).

Iz svega navedenog, jasno se može istaknuti kako moguće ugroze za stvaranje i rast sedrenih barijera, odnosno ugrozu procesa osedavanja možemo naći u potencijalnim kemijskim (povećanje organske tvari, povećanje koncentracije hranjivih soli, povećanje temperature vode), biološkim (nestanak sedrotvornih organizama poput mahovina, algi, bakterija,

beskralježnjaka) i hidrološkim odnosno hidrogeološkim promjenama (nagle promjene protoka, erozivni procesi).

5. ZAKLJUČAK

Proces stvaranja sedrenih barijera kojim su se oblikovala jezera i slapovi, ukazuje na neizmjernu vrijednost ovog zaštićenog područja kako u međunarodnom tako i u nacionalnom smislu. Iz tog razloga, očuvanje sedrenih barijera, slapova, jezera, ali i cijelog vodenog ekosustava iznimno je visoko na listi prioriteta upravljanja nacionalnim parkom. U konačnici, cjelokupni šumski ekosustav s velikim površinama bukovo-jelovih šuma, omogućuje nastanak tla bogatog organskom tvari kroz koji će voda u obliku oborina ili topljenjem snijega otapati ugljikov dioksid i karbonatne stijene bogate kalcijem i takve podzemne vode bit će obogaćene s CO₂, a zatim će se izviranjem na krškim izvorima uspostaviti ravnoteža s CO₂ iz zraka i doći će do prezasićenja karbonatima (Barešić, 2009.). Uz sve potrebne fizikalno-kemijske i biološke uvjete duž jezerskog sustava, ti karbonati će se taložiti u obliku sedre i razvijat će se sedrene barijere. Stoga je iznimno važno očuvati kompleksan proces nastajanja sedre, pratiti čimbenike koji ukazuju na njegov tijek i dalje istraživati nepoznato kako bi dobili što više odgovora i na moguće ugroze odgovorili na vrijeme. ■

6. LITERATURA

- Ansari, A. A., Gill, S. S., Khan, F. A. (2011.): Eutrophication: Threat to Aquatic Ecosystems. *Eutrophication: causes, consequences and control* (ur. A. A. Ansari, S. S. Gill, G. R. Lanza, W., Rast W.), 143-170, Springer Science+Business Media B.V.
- Anzalone, E., Ferreri, V., Sprovieri, M., D Argenio, B. (2007.): Travertines as hydrologic archives: The case of the Pontecagnano deposits (southern Italy). *Advances in Water Resources* 30, 2159-2175.
- Alegro, A., Šegota, V., Koletić, N., Rimac, A., Vuković, N. (2019.): Flora i vegetacija mahovina i vaskularnih biljaka sedrenih barijera Plitvičkih jezera. *Završno izvješće za 2016., 2017. i 2018. godinu*, Hrvatsko botaničko društvo, Zagreb.
- Babinka, S. (2007.): Multi-Tracer Study of Karst Waters and Lake Sediments in Croatia and Bosnia Herzegovina: Plitvice Lakes National Park and Bihać Area. *Disertacija*, Universität Bonn, Bonn.
- Barešić, J. (2009.): Primjena izotopnih i geokemijskih metoda u praćenju globalnih i lokalnih promjena u ekološkom sustavu Plitvičkih jezera. *Disertacija*, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Barešić, J., Horvatinčić, N., Roller-Lutz, Z. (2011.): Spatial and seasonal variations in the stable isotope composition of dissolved inorganic carbon and in physico-chemical water parameters in the Plitvice Lakes system. *Isotopes in Environmental and Health Studies* 47(3), 316-329.
- Bonacci, O., Pipan, T., Culver, D. C. (2008.): A framework for karst ecohydrology. *Environmental Geology* 56, 891-900.
- Bonacci, O. (2014.): Karst hydrogeology/hydrology of Dinaric chain and isles. *Environmental Earth Sciences* 74(1), 37-55.
- Brozinčević, A., Vurnek, M., Zwicker Kompar, G., Bušelić, G., Rubinić, J. (2013.): Changes in dynamic of fluctuation in water level of Kozjak and Prošćansko lakes and possible influences. *Proceedings of 3rd International Conference: Waters in Sensitive & Protected Areas* (ur. Z. Nakić, J. Rubinić), 136-141, Zagreb.
- Brozinčević, A., Frketić, T., Markić, N., Vurnek, M., Miculinić, K. (2018.): Promjene hidroloških uvjeta i morfologije jezera i sedrenih barijera Plitvičkih jezera. *Zbornik radova Znanstveno-stručnog skupa s međunarodnim sudjelovanjem Hidrologija u službi zaštite i korištenja voda te smanjenja poplavnih rizika – Suvremeni trendovi i pristupi* (ur. J. Rubinić, I. Ivanković, G. Bušelić), 17-24, Miodio d.o.o., Rijeka.
- Chafetz, H. S., Srdoč, D., Horvatinčić, N. (1994.): Early diagenesis of Plitvice Lakes waterfall and barrier travertine deposits. *Géographie physique et Quaternaire* 48(3), 247-255.
- Chen, J., Zhang, D. D., Wang, S., Xiao, T., Huang, R. (2004.): Factors controlling tufa deposition in natural waters at waterfall sites. *Sedimentary Geology* 166, 353-366.
- Dešković, I., Milenković, V., Marušić, R. (1981.): Značaj, svrha i neki rezultati hidrokemijskih, hidroloških i sanitarnih istraživanja površinskih i podzemnih voda Nacionalnog parka Plitvička jezera. *Vodoprivreda* 13(69-71), 7-19.
- Drysdale, R. N., Carthew, K. D., Taylor, M. P. (2003.): Larval caddis-fly nets and retreats: a unique biosedimentary paleocurrent indicator for fossil tufa deposits. *Sedimentary Geology* 161, 207-215.
- Emeis, K.-C., Richnow, H. H., Kempe, S. (1987.): Travertine formation in Plitvice Lakes National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. *Sedimentology* 34, 595-609.
- Ford, T. D., Pedley, H. M. (1996.): A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Reviews* 41, 117-175.
- Ford, D., Williams, P. (2007.): *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. John Wiley & Sons, Ltd, England
- Golubić, S., Violante, C., Plenković-Moraj, A., Grgasović, T. (2008.): Travertines and calcareous tufa deposits: an insight into diagenesis. *Geologia Croatica* 61(2-3), 363-378.
- Habdija, I., Primc, B., Plenković-Moraj, A., Ternjej, I., Matonićkin Kepčija, R., Gligora Udovič, M., Sertić-Perić, M., Kralj Borjčević, K., Dujmović A., Brozinčević, A., Dražina, T., Žutinić, P., Vurnek, M. (2011.): Funkcionalna organizacija planktonske zajednice u jezeru Kozjak i jezeru Prošće kao indikator ekološkog stanja hidrosustava Plitvičkih jezera (Nacionalni park Plitvička jezera). *Studija*, Prirodoslovno-matematički fakultet, Zagreb.
- Habdija, I., Stilinović, B., Primc Habdija, B., Matonićkin Kepčija, R., Špoljar, M., Miliša, M., Sertić-Perić, M. (2011.): Prilog poznavanju istraženosti i faunističke i ekološke raznolikosti protozoa i invertebrata u akvatičkim staništima na sedrenim barijerama i u jezerima NP Plitvička jezera. *Zbornik radova Znanstveno-stručnog skupa Nacionalnog parka Plitvička jezera* (ur. B. Šutić, I. Mataija, Z. Šikić, A. Dujmović, V. Ružić, A. Brozinčević), 295-310, Kerschhoffset Zagreb d.o.o., Plitvička Jezera.
- Horvatinčić, N., Barešić, J., Krajcar Bronić, I., Obelić, B., Rajtarić, A., Sironić, A., Vdović, N., Karašić, S., Milunović, M., Ivanić, M., Sondi, I. (2014.): Utjecaj klimatskih promjena i stanja u okolišu na biološko inducirano taloženje sedre i sedimentacijske procese u Plitvičkim jezerima. *Završno izvješće*, Institut Ruđer Bošković, Zagreb.
- Horvatinčić, N., Čalić, R., Geyh, M. A. (2000.): Interglacial growth of tufa in Croatia. *Quaternary Research* 53, 185-195.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change (2018.): Summary for Policymakers. *Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*, IPCC, 1-24.
- IUCN-WCMC – International Union for Conservation

- of Nature-World Conservation Monitoring Centre (2000.): World Heritage Nomination – IUCN Technical Evaluation Plitvice Lakes Extension (Croatia), 99-105.
- Janssen, An., Swennen, R., Podoor, N., Keppens, E. (1999.): Biological and diagenetic influence in recent and fossil tufa deposits from Belgium. *Sedimentary Geology* 126, 75-95.
- Kano, A., Matsuoka, J., Kojo, T., Fujii, H. (2003.): Origin of annual laminations in tufa deposits, southwest Japan. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 191, 243-262.
- Lojen, S., Trkov, A., Ščančar, J., Vásquez-Navarro, J. A., Cukrov, N. (2009.): Continuous 60-year stable isotopic and earth-alkali element records in a modern laminated tufa (Jaruga, river Krka, Croatia): Implications for climate reconstruction. *Chemical Geology* 258, 242-250.
- Lu, G., Zheng, C., Donahoe, R. J., Berry Lyons, W. (2000.): Controlling processes in a CaCO₃ precipitating stream in Huanglong Natural Scenic District, Sichuan, China. *Journal of Hydrology* 230, 34-54.
- Matoničkin, I., Pavletić, Z., Tavčar, V., Krkač, N. (1971.): Limnološka istraživanja reikotopa i fenomena protočne travertinizacije u Plitvičkim jezerima. *Acta Biologica VII/1*, Prirodoslovna istraživanja, knjiga 40.
- Matoničkin Kepčija, R., Habdija, I., Primc-Habdija, B., Miliša, M. (2005.): The role of simuliid and trichopteran silk structures in tufa formation during the Holocene of the Plitvice Lakes (Croatia). *Proceedings of 1st International Symposium on Travertine* (ur. M. Ozkul, S. Yagiz, B. Jones), 96-101, Ankara, Turska.
- NN – Narodne novine (2019.): NN 80/2019.
- Pedley, M. (2009.): Tufas and travertines of the mediterranean region: a testing ground for freshwater carbonate concepts and developments. *Sedimentology* 56, 221-246.
- Perri, E., Manzo, E., Tucker, M. E. (2012.): Multi-scale study of the role of the biofilm in the formation of minerals and fabrics in calcareous tufa. *Sedimentary Geology* 263-264, 16-29.
- Pentecost, A. (2005.): *Travertine*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Nizozemska.
- Pevalek, I. (1958.): Biodinamika Plitvičkih jezera i njena zaštita. *Nacionalni park Plitvička jezera* (ur. J. Šafar), 275-293, Tisak Grafičkog zavoda Hrvatske, Zagreb.
- Pleše, T. (2011.): Arheološka istraživanja na gradini Kozjak. *Zbornik radova Znanstveno-stručnog skupa Nacionalnog parka Plitvička jezera* (ur. B. Šutić), 346-354, Kerschoffset Zagreb d.o.o., Plitvička Jezera.
- PU NPPJ – Plan upravljanja Nacionalnim parkom Plitvička jezera (2019.): Plan upravljanja Nacionalnim parkom Plitvička jezera 2019. – 2028. (ur. T. Kovačević), Stega – tisak d.o.o., Zagreb.
- Sironić, A., Barešić, J., Horvatinčić, N., Brozinčević, A., Vurnek, M., Kapelj, S. (2017.): Changes in the geochemical parameters of karst lakes over the past three decades – The case of Plitvice Lakes, Croatia. *Applied Geochemistry* 78, 12-22.
- Srdoč, D., Horvatinčić, N., Obelić, B., Krajcar, I., Sliepčević, A. (1985.): Procesi taloženja kalcita u krškim vodama s posebnim osvrtom na Plitvička jezera. *Krš Jugoslavije* 11(4-6), 1-104.
- Stanković, I., Szabó, B., Mičetić Stanković, V. (2017.): Sastav i značaj bentičkih algi na sedrenim barijerama Plitvičkih jezera. *Završno izvješće*, Hrvatsko botaničko društvo, Zagreb.
- Vurnek, M., Brozinčević, A., Matoničkin Kepčija, R., Frketić, T. (2021.): Analyses of long-term trends in water quality data of the Plitvice Lakes National Park. *Fundamental and Applied Limnology* 194(3), 155-169.
- WHC – World Heritage Committee (2019.): Adoption of retrospective Statements of Outstanding Universal Value. WHC/19/43.COM/8E.

THE TUSA OF PLITVICE LAKES - A FANTASTIC COMBINATION OF CHEMISTRY AND BIOLOGY

Abstract. Tufa is formed in freshwater ecosystems by a dynamic interaction of chemical and biological factors. It depends on some elements that need to be present – water saturation with calcium carbonate, adequate pH value and low concentrations of organic matter, and the existence of a biological component, i.e. mosses, diatoms and some invertebrates that also play an important role in the formation of tufa barriers. As the largest and oldest national park and an area of exceptional natural value, Plitvice Lakes was included in the UNESCO World Heritage List, whose unique universal value was recognized in its tufa barriers and the process of their formation. The cascade lake system was formed in conditions favourable for the deposition of calcium carbonate (tufa). The growth of tufa barriers also depends on hydrological conditions, and is adversely impacted by erosion processes and changes associated with increased nutrient concentrations (nitrogen and phosphorus), which lead to eutrophication. The tufa formation process in the cascade system of Plitvice Lakes is not endangered, although it is certainly necessary to continuously monitor any possible changes.

Key words: tufa barriers, national park, freshwater ecosystem, calcium carbonate, tufa-forming organisms

KALKTUFF DER PLITVICER SEEN – FANTASTISCHES ZUSAMMENWIRKEN VON CHEMIE UND BIOLOGIE

Zusammenfassung. Kalktuff oder Travertin (engl. tufa) entsteht in Süßwasserökosystemen durch dynamische Interaktion zwischen den chemischen und biologischen Faktoren. Sein Entstehen hängt von bestimmten Voraussetzungen ab, wie z. B. Kalziumkarbonatsättigung, entsprechender pH-Wert und niedriger Gehalt an organischer Substanz, während die Existenz von biologischen Komponenten wie Moose, Quarzalgen und einige Wirbellosen eine wichtige Rolle in der Bildung von Travertinbarrieren haben. Die Travertinbarrieren und ihre Bildung sind der einzigartige Wert der Plitvicer Seen, die der größte und älteste, als Naturdenkmal in das UNESCO-Weltnaturerbe aufgenommene Nationalpark Kroatiens, d.h. Gebiet mit einzigartigen Naturphänomenen sind. Die kaskadenförmig angeordneten Seen haben sich unter für die Sedimentierung von Kalziumkarbonat (Kalk) günstigen Bedingungen gebildet. Das Wachstum von Barrieren hängt auch von hydrologischen Bedingungen ab. Die Erosionsvorgänge und die Änderungen im Sinne der erhöhten Konzentration von Nährstoffen Stickstoff und Phosphor, die die Hauptursache für die Eutrophierung sind, wirken sich nachteilig aus. Obwohl die Sedimentierungsvorgänge in den Kaskadenseen nicht gefährdet sind, sollen eventuelle Veränderungen kontinuierlich überwacht werden.

Schlüsselwörter: Travertinbarrieren, Nationalpark, Süßwasserökosystem, Kalziumkarbonat, travertinbildende Organismen