Geokemijske osnove nastanka sedre

Pekčec, Sanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:103451

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-19**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

Geokemijske osnove nastanka sedre

Pekčec, Sanja

Undergraduate thesis / Završni rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:103451

Rights / Prava: In copyright

Download date / Datum preuzimanja: **2020-11-02**

Repository / Repozitorij:

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

SANJA PEKČEC

GEOKEMIJSKE OSNOVE NASTANKA SEDRE

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

GEOKEMIJSKE OSNOVE NASTANKA SEDRE

KANDIDAT: MENTOR:

SANJA PEKČEC Izv. prof. dr. sc. SANJA KAPELJ

VARAŽDIN, 2017.

IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

GEOKEMIJSKE OSNOVE NASTANKA SEDRE rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom **Izv. prof. dr. sc. Sanje Kapelj.**

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada, te da nijedan dio rada ne krši bilo bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 29. 06. 2017.

Ime i prezime: Sanja Pekčec

Potpis: Sanja Pekčec

SAŽETAK:

Jedinstven proces događa se na Plitvičkim jezerima s obzirom na druge slične pojave u svijetu. Taloženje kacijevog karbonata koji uzrokuje nastanak sedre vrlo je dinamičan proces i uključuje geološke, hidrogeološke, geološke, geokemijske i biološke uzroke kao i prateće procese. Površinske vode koje sedre trebaju biti prezasićene s kalcijevim karbonatom u obliku kalcijevog hidrogenkarbonata. Na brzacima i osobito na sedrenim barijerama dolazi do izlučivanja mikro i kriptokristala kalcita na mahovinama, mikroorganizmima i ostalim dijelovima vegetacije. Isto tako minerali kalcita inkrustriraju biljne ostatke u vodi (korijenje bilja, grančice i debla drveća), a karbonatni mulj taloži se na dnu vodotoka. Sedrene tvorbe jedne su od rjeđih i najljepših, ali zato najosjetljivijih fenomena područja izgrađenih uglavnom od karbonatnih stijena. Sedrene barijere Plitvičkih jezera, rijeke Krke i Zrmanje poznate su u svijetu i godinama se detaljno istražuju sa svrhom zaštite kakvoće voda i jedinstvenog ekosustava koji je neophodan za nastanak sedre. Rast i razvoj sedrenih barijera ugrožen je ukoliko dođe do poremećaja samo jednog od geoloških, hidrogeoloških, hidroloških, kemijskih i bioloških čimbenika koji sudjeluju u procesu osrednjavanja. Poglavito je štetan porast koncentracije ukupno otopljenog ugljika koji inhibira taloženje sedre, zatim prorastanje korijenja vegetacije te velike brzine i količine vode što može destruktivno djelovati na stabilnost sedrene barijere. Koncentracija ukupno otopljenog organskog ugljika često je posljedica organskog onečišćenja iz različitih prirodnih i antropogenih izvora.

KLJUČNE RIJEČI: nastanak sedre, Plitvička jezera, zaštita sedrenih barijera

SADRŽAJ

1. UVOD..... 1

2. TEORETSKE OSNOVE 2

3. ČIMBENICI NASTANKA SEDRE..... 5

3.1. Klimatski čimbenici..... 5
3.2. Geološki, hidrogeološki i hidrološki čimbenici.....7
3.3. Biološki čimbenici 13
3.4. Geokemijski čimbenici 14

4. ZAKLJUČAK 20

5. LITERATURA 21

1. UVOD

Sedra nastaje taloženjem kalcijevog karbonata tj. minerala kalcita iz vode. Čine je porozni agregati kriptokristalastog i mikrokristalastog kalcita nastali na slapovima jezera, rijeka i ponegdje na izvorima, a izlučuju se po mahovinama, različitim mikroorganizmima poput dijatomeja i cijanobakterija, vodenom bilju i ostacima različite vegetacije u vodi. Nastanak sedre postoji u različitim dijelovima svijeta, a uglavnom je vezan za područja izgrađena pretežito od karbonatnih stijena, vapnenaca i dolomita.

U Hrvatskoj najveće sedrene barijere postoje na rijekama Zrmanji, Krki (Skradinski buk), Korani na Rastokama, a najpoznatija su Plitvička jezera. Plitvička jezera čine niz kaskanih jezera međusobno povezanih sedrenim barijerama preko kojih se prelijevaju slapovi iz hipsometrijski viših jezera u niže. Rastom barijera postupno se podiže i razina vode u pojedinom jezeru. Osim na barijerama, sedra inkrustrira otpalo lišće i grane u jezerima, a taloži se i u obliku karbonatnog sedimenta (karbonatnog mulja) na dnu jezera. Za njen nastanak potreban je čitav niz geoloških, hidrogeoloških, hidroloških, kemijskih i bioloških čimbenika od kojih je najznačajnija prezasićenost vode kalcijevim karbonatom.

Proces stvaranja sedre postojao je i u geološkoj prošlosti, ali samo u uvjetima tople i vlažne klime, slične današnjoj. Starost recentnih, odnosno aktivnih sedrenih barijera procjenjuje se između 6.000 i 7.000 godina na području sjeverne hemisfere, što odgovara njihovom nastanku nakon zadnjeg ledenog doba (Horvatinčić, 2013). Starije sedrene barijere ispunjene su fosiliziranim algama i mahovinama. Još jedna posebna osobitost je utjecaj vegetacije u procesu taloženja pri čemu vegetacijske barijere usporavaju protok vode. Voda se pritom pjeni i prska te tako slapovi postaju dobro aerirani i ugljikov dioksid se lakše otplinjava u atmosferu.

Sedrene barijere se ne pojavljuju samo u Hrvatskoj, već i u susjednoj državi, Bosni i Hercegovini. Ondje velike sedrene barijere postoje na rijekama Uni (Martin Brod, Štrbački Buk), Plivi kod Jajca i rijeci Trebižat (slap Kravica) pokraj Ljubuškog u Bosni i Hercegovini. Proučavanje svih procesa vezanih za stvaranje sedre i sedrenih barijera bitno je zbog zaštite iznimnog fenomena po kojem je područje krša Dinarida poznato u cijelom svijetu.

2. TEORETSKI OSNOVE

Iznimnost sedre kao slatkovodnog karbonatnog sedimenta istražuje se već više od jednog stoljeća. Brojni znanstvenici dali su svoj doprinos spoznajama o nastanku sedre od kojih su po brojnosti vrlo zastupljeni hrvatski znanstvenici. Neke od njih spomenut ćemo u idućem poglavlju.

U novijoj svjetskoj literaturi posebno mjesto zauzima znanstveni opus Pentecosta (2005) u kojem navodi da je gotovo sva sedra na Zemlji nastala pomoću četiri osnovna kemijska procesa.

Prvi proces, kojim je nastala većina sedre, odvija se kemijskom reakcijom otapanja kristala kalcita u vapnencima, odnosno u tlu i epikrškoj zoni izvora kao što je to slučaj u krškim područjima Dinarida:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3$$

Nakon istjecanja na izvorima i gubitka CO_2 duž toka, dolazi do porasta koncentracije kalcija i karbonat iona, odnosno prezasićenja vode s $CaCO_3$ pri čemu dolazi do taloženja minerala kalcita (Slika 2.1):

$$Ca^{2+} + 2(HCO_3)^- \leftrightarrow CaCO_3 + CO_2 + H_2O$$

Slika 2.1. Plitvička jezera (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:00 h)

Drugim procesom sedra može nastati reakcijom atmosferskoga ugljikovog dioksida s hiperalkalnom vodom (površinskom/podzemnom) sljedećim kemijskim reakcijama:

$$Ca(OH)_2 + CO_2 \leftrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

$$Ca(HCO_3) + OH^- \leftrightarrow CaCO_3 + H_2O$$

U tom slučaju Pentecost (2005) zaključuje da je izlučivanje kalcijevog karbonata rezultat ulaska i izlaska ugljikovog dioksida u/iz vodonosnog sustava čime se podrazumijeva reakcija koja uključuje OH^- ione i povećanje koncentracije kalcija. Karakteristična je pojava u nekim slanim jezerima (Slika 2.2.).

Slika 2.2. Naslage sedre u jezeru Mono u bazenu Mono u Kaliforniji (en.wikipedia.org/wiki/Mono_Lake, 9.6.2017, 17:17 h)

Postoji i treći slučaj kada u podzemnoj vodi koja napaja otvoreni vodotok postoji visoka koncentracija otopljenih sulfata koji potječu od nazočnosti evaporita, gipsa ($CaSO_4*2H_2O$) i anhidrita ($CaSO_4$) u sastavu pretežito vapnenačkog vodonosnika. Tada dolazi do porasta koncentracije Ca^{2+} što uzrokuje prezasićenje vode s kalcitnom mineralnom fazom:

$$CaCO_3 + CO_2 + H_2O \leftrightarrow Ca^{2+} + 2HCO_3$$

$$CaSO_4 \leftrightarrow Ca^{2+} + SO_4^{2-}$$

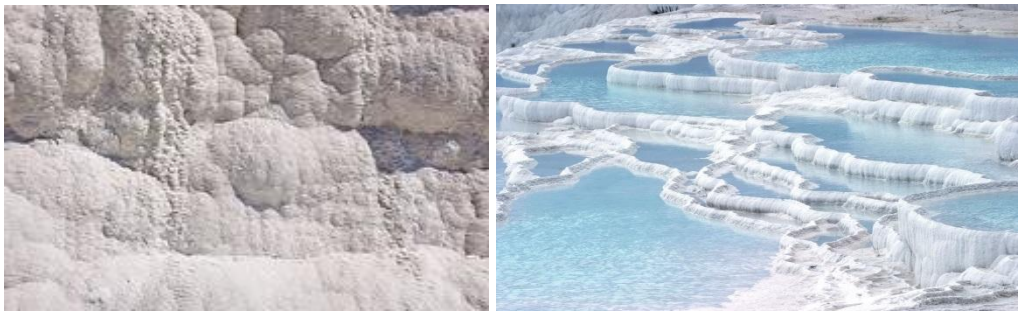
$$Ca^{2+} + 2(HCO_3)^- \leftrightarrow CaCO_3 + CO_2 + 2H_2O$$

Ta pojava se u geokemiji naziva i efekt dvostrukog iona jer jedan dio kalcija dolazi u vodenu otopinu otapanjem kalcita, a drugi dio otapanjem gipsa ili anhidrita (Slika 2.3.).

Slika 2.3. Vodopad Kravice na rijeci Trebižat kod Ljubuškog

(izvor: www.jpparkovi-ljubuski.com/djelatnosti/ittem/305-kravica-slap-parking.htlm, 9.6.2017, 17:11 h)

Na četvrti način nastaju „termalne sedre“ ili travertin. One nastaju taloženjem kalcijevog karbonata iz prezasićenih termalnih i termomineralnih voda prema već spomenutoj jednadžbi. Budući da se talože naglim hlađenjem iz vrućih prezasićenih otopina, kristali kalcita su manjih dimenzija, a česte su i amorfne karbonatne tvorbe (Slika 2.4.)



Slika 2.4. Naslage travertina, Pamukkale _Turska

(izvor: www.rainbowtourturkey/tours-info/ pamukale, 9.6.2017. 21:00)

3. ČIMBENICI NASTANKA SEDRE

Danas raspolažemo mnogobrojnim znanstvenim spoznajama o nastanku sedre kojima su doprinijeli i brojni hrvatski znanstvenici.

Proces sedrenja u riječnim tokovima uvjetovan je složenim ekosustavom koji obuhvaća klimatske, geološke, hidrogeološke i hidrološke osobine područja te obilježja okolnog vegetacijski pokrova. Uz nabrojane čimbenike, na formiranje sedre utječe i biološka aktivnost te prisutnost organske materije. Kao dobar primjer razmatranja utjecaja spomenutih čimbenika poslužit će nam u daljnjem tekstu primjer Plitvičkih jezera.

3.1. Klimatski čimbenici

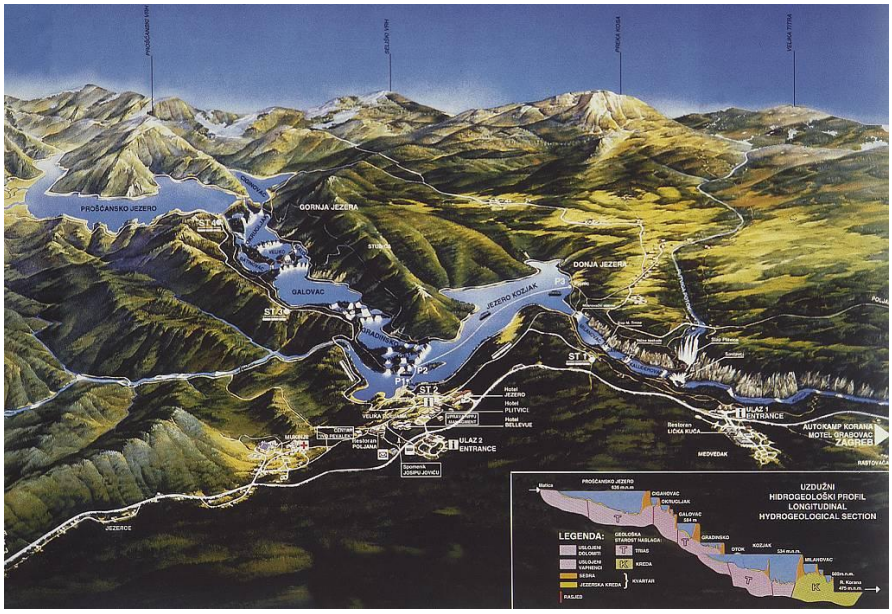
Dosadašnja istraživanja na Plitvičkim jezerima pokazala su da na proces sedrenja utječu promjene stanja u okolišu, koje mogu biti uzrokovane lokalnim utjecajima, ali i globalnim, poglavito klimatskim promjenama.

Najnovija istraživanja pokazuju da je taloženje sedre veće u toplijim klimatskim periodima – međuoledbama/interglacijalima, a uglavnom je prekinuto tijekom hladnih razdoblja – oledba/glacijala (Srdoč et al, 1985).

Istraživanje starosti sedre Plitvičkih jezera pokazalo je da je tzv. recentna (sadašnja aktivna) sedra počela nastajati prije oko 6.000 - 7.000 godina. Međutim, na prostoru Parka pronađena je sedra u paleobarijerama starosti 90.000 – 130.000 godina (inerglacijal Riss/Würm) te 250.000 – 300.000 (interglacijal Mindel/Riss) i to na višim nadmorskim visinama od današnje razine jezera (Obelić & Horvatinčić, 2013; Horvatinčić et al., 2000; Srdoč et al, 1985). Tijekom ledenih doba nisu postojali uvjeti za sedrenje i sedrene barijere su bile uništene. To razdoblje obilježilo je i veliko spiranje površinskog sloja tla u usjek kanjona tijekom razdoblja otapanja snijega i odleđivanja hipsometrijski viših područja, a to je dokazano i bušenje sedimenta Prošćanskog jezera i Kozjaka (Srdoč et al., 1985). Povećani terigeni doprinos tijekom razdoblja oledbi karakterističan je za geološki različita područja u Hrvatskoj, od Panonskog bazena do Dinarida.

Mehaničkim djelovanjem leda i vode tijekom oledbi vjerojatno je došlo do produbljivanja doline rijeke Korane tako da se današnje sedrene barijere formiraju na nižim nadmorskim visinama. Također postoje indicije i da su barijere postojale nizvodnije od današnjih jer se jedna od njih nalazi neposredno iznad Koranskog mosta.

Također je utvrđeno da je brzina rasta sedrenih barijera različita te kada nizvodna barijera raste brže, jezero može potopiti uzvodnu barijeru. Takva potopljena barijera je pronađene u jezeru Kozjak na Plitvičkim jezerima (Slika 3.1.) .



Slika 3.1. Shematski prikaz reljefa neposrednog područja Plitivčkih jezera s nazivima pojedinih jezera (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:35 h)

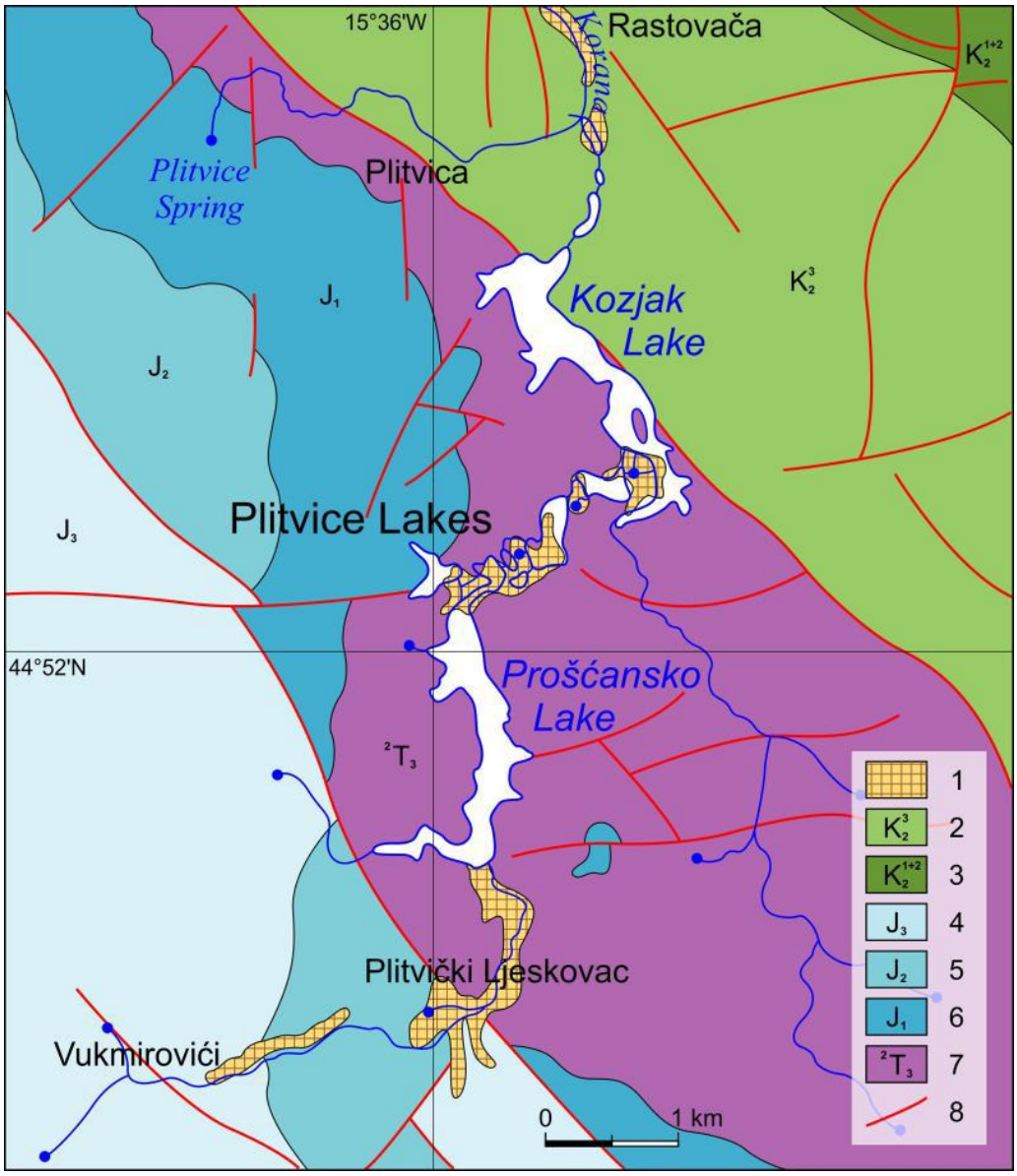
3.2. Geološki, hidrogeološki i hidrološki čimbenici

Na području Plitvičkih jezera nalazimo stijene koje su nastale tijekom ere mezozoika, od gornjeg trijasa do gornje krede. Taloženi su debeli nizovi karbonatnih stijena, vapnenaca i dolomita, pretpostavljene debljine od 3500 do 4000 metara (Polšak, 1974). Hidrogeološke značajke temeljnih stijena i strukturna obilježja prostora uvjetovala su oblikovanje reljefa područja Plitvičkih jezera djelovanjem vode.

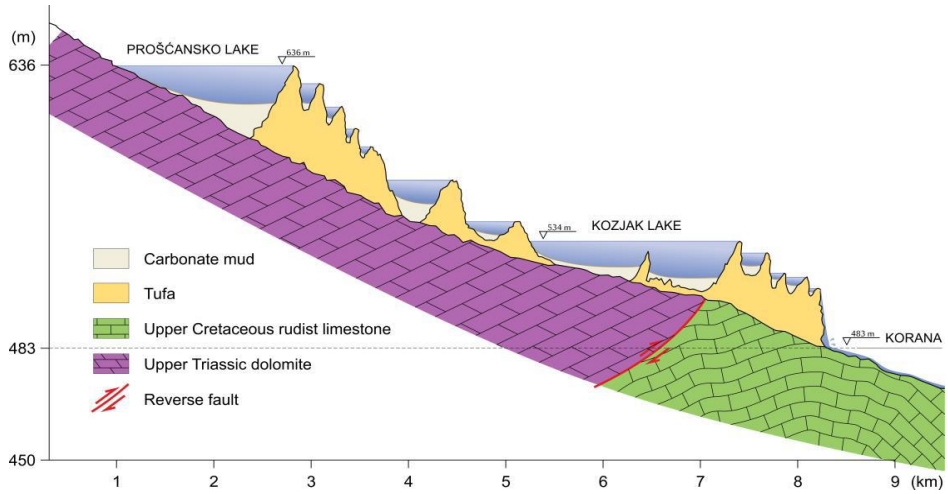
Shematska geološka karta područja Plitvičkih jezera prikazana je na slici 3.2. (Butko et al., 2013). Jezera su nastala duž krškog kanjona rijeke Korane pregrađivanjem sedrenim barijerama. Prve barijere vjerojatno su nastale na neravnijim i hrapavijim dijelovima kanjona gdje su se stvorili dobri uvjeti za naseljavanje vodenih organizama. Gornja jezera razvijena su u dijelu doline rijeke koja protječe kroz trijaske dolomite, a nalaze se uzvodnije od jezera Kozjak, a Donja jezera razvijena su u krškom kanjonu vjerojatno tijekom posljednjeg glacijalnog razdoblja nizvodnije od Kozjaka. Uz početne reljefne i geološke uvjete, klimatski čimbenici (oborine i promjene temperature) imali su najveći utjecaj na današnji razvoj.

Hidrografska mreža na području Plitvica je nastala za vrijeme kvartara (Polšak et al, 1976) gdje je stvorena površina i podzemni tokovi koji su karakteristični za vapnenačke terene. Geološki profil kroz jezera je prikazan na slici 3.3. (Butko et al., 2013).

Izvori površinskih tokova koji pretežito napajaju jezera se nalaze na kontaktu između propusnih i nepropusnih stijena. Najveći površinski tokovi su Crna i Bijela rijeka, koji su spojeni u Maticu koja utječe u Prošćansko jezero. U Maticu još dotječu tri manja pritoka.



Slika 3.2. Prikaz geološkog zemljovida na području Plitvičkih jezera; 1 - sedra, 2 – gornjokredni vapnenci, 3 – gornjokredni vapnenci, dolomiti i lapori, 4 – gornjojurski dolomiti i vapnenci, 5 – srednjejurski vapnenci i dolomiti, 6 – donjojurski vapnenaci i dolomiti, 7 – gornjotrijaski dolomiti, 8 – rasjedi. (Butko et al., 2013)



Slika 3.3. Shematski prikaz uzdužnog geološkog profila Plitvičkih jezera

(Butko et al., 2013)

Polšak (1974) je prikazao odvojene zone gornjo trijaskih dolomita i sukladnih slojeva donjeg i srednjeg dijela donje jure u području Gornjih jezera. Gornje trijaski dolomiti imaju nisku propusnost, nisku primarnu poroznost i nešto jaču sekundarnu poroznost koja je površinski izraženija. Ispod njih se nalaze nepropusni slojevi klastičnih stijena pretpostavlja se trijaske starosti. Stoga se naslage dolomita u hidrogeološkom smislu smatraju uglavnom nepropusnim budući da su njihovi rastrošeni dijelovi zasićeni vodom te djeluju kao hidrogeološka barijera. Posljedica toga je razvijena gusta površinska hidrografska mreža i u tom području su nastala Gornja jezera. Međutim, na tom području pojavljuju se mali procjedni izvori od kojih je napoznatiji niz izvora koji oblikuju površinski tok Rječice koja utječe u jezero Kozjak (Slika 3.4).

Donja jezera nalaze se većim dijelom u hidrogeološki propusnim karbonatnim stijenama kredne starosti. Području se odlikuje brojnim špiljama, jamama, pukotinama i drugim krškim morfološkim oblicima Slika (3.5 i 3.6). Rječica Plitvica na području Sastavaka utječe u jezera u obliku najvišeg slapa u Parku (Slika 3.7).

Slika 3.4. Kozjak i uzvodno niz Gornjih jezera (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:30 h)

Slika 3.5. Donja jezera usječena u kredne vapnence izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:34 h)

Slika 3.6. Ulaz u spilju Šupljaru izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:36 h)

Za nastanak Donjih jezera postoji nekoliko objašnjenja. Zajednička pojava u krškim vodonosnicima su pukotine ispunjene sekundarnim kristaliziranim kalcitom niske poroznosti, koji može stvoriti prepreku toku podzemnih voda.

Na području Donjih jezera, ali i slapa koji se ulijeva u rijeku Koranu, razina podzemnih voda je visoka, tako da jezerska voda ne može ponirati u propusni vapnenac, a čestice karbonatnog sedimenta jezera ispunjavaju pore, šupljine i pukotinske prostore te čine podlogu Donjih jezera nepropusnom (Božičević, 1990) što je i dokazano istražnim bušenjem (Biondić et al., 2010).

Slika 3.7. Sastavci s velikim slapom Plitvice zimi (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:33 h)

Nakon zadnjeg slapa u nizu, oblikuje se tok rijeke Korane koja već nakon Koranskog mosta postupno ponire kroz niz ponora, tako da u sušnim dijelovima godine taj dio korita potpuno presušuje. Iz toga možemo zaključiti da nedostatak sedrenja i zapunjavanja pukotinskih prostora kalcitnim taložinama uzrokuje procjeđivanje vode rijeke Korane u podzemlje tijekom sušnih razdoblja godine. Tijekom hidrološki viših voda kada se razina podzemne vode digne iznad razine terena više nema poniranja i rijeka teče svojim cijelim koritom (Božičević, 1990).

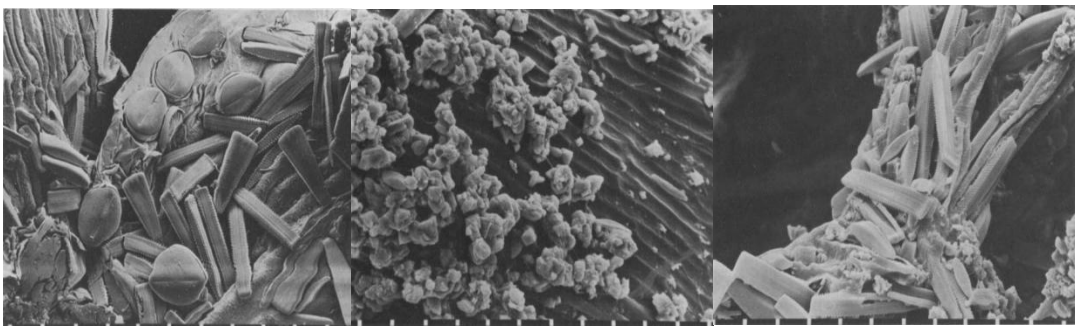
Plitvička jezera, u obliku koji poznajemo danas, formirane su nakon posljednjeg glacijskog maksimuma. Sedrene barijere nastale su u posljednjih 6000-7000 godina (Srdoč i sur., 1985), kada je došlo do povoljnih uvjeta za njihov razvoj (topla i vlažna klima), a najbrojnije su u području između Prošćanskog i Kozjačkog jezera. Jedna od osnova za upravljanjem Nacionalnim parkom je izrada karata ranjivosti podzemnih i površinskih voda, karata izvora opasnosti kao i karata rizika. Prvi put je takav pristup na području Plitvičkih jezera korišten u okviru ANTROPOLPROT projekta EU, a osim područja Nacionalnog parka Plitvičkih jezera i obuhvaća i cijelo prekogranično područje gornjeg dijela toka rijeke Une u Republici Hrvatskoj i Republici Bosni i Hercegovini (Kapelj, al., 2013).

3.3. Biološki čimbenici

Mahovine, alge i vodeno bilje imaju važnu ulogu u oblikovanju jedinstvenog krajolika Plitvičkih jezera i sedrenih barijera. Prijašnje objašnjenje postanka sedre tumači kako biljke vežu ugljični dioksid iz vode u procesu fotosinteze i proizvode kisik, te izlučuju kalcijev karbonat, većim dijelom je odbačena.

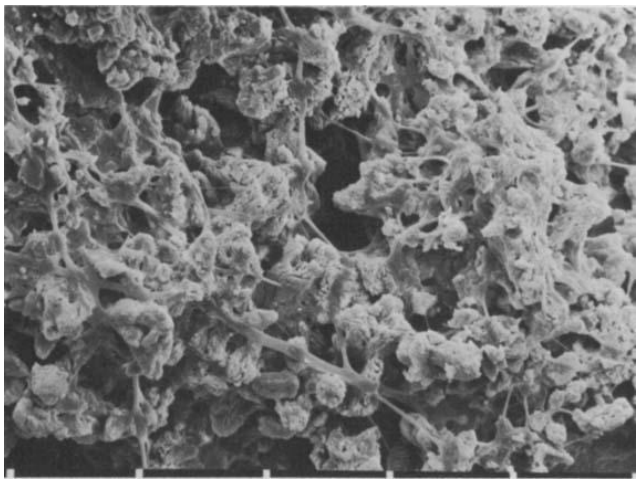
Nedavna znanstvena istraživanja pokazuju da vegetacija nije prvenstveno zaslužna za izlučivanje karbonata iz protočne vode. Međutim, biljke neizravno pridonose nastanku sedre. Mahovina služi kao supstrat za taloženje. Važni su i milijuni mikroskopski malih bakterija i algi, koje rastu na mahovinama. One izlučuju sluz, koja je važna u mikrokristalizaciji kalcita. Najznačajnije su mahovine iz rodova Bryum i Cratoneuron. Na slikama i mogu se vidjeti način nastanka sedre snimljen elektronskim mikroskopom (Slika 3.8 i 3.9) (Emeis, et al., 1987).

Mladi izdanci mahovina zeleni su i meki te uglavnom bez sedre, dok su stariji izbojci u potpunosti pokriveni i okamenjeni. Mahovine ne potiču samo nastanak sedrenih barijera, nego postaju i dio barijere. Starije sedrene barijere ispunjene su fosiliziranim algama i mahovinama. Ova vrsta sedre tipična je za Plitvička jezera.



Slika 3.8. Fotografije snimljene elektronskim mikroskopom na kojima se vidi nastanak sedre na ljepljivim površinama dijatomeja, cijanobakterijama, mahovinama itd. na sedrenim barijerama Plitvičkih jezera

(Emeis et al., 1987)



Slika 3.9. Istaloženi porozni kalcit u kojem su ugrađeni ostaci bakterija i diatomeja (Emeis et al., 1987)

Prve barijere vjerojatno su nastale na neravnijim i hrapavijim dijelovima kanjona gdje su se stvorili dobri uvjeti za naseljavanje vodenih organizama. Premda vegetacija ima pozitivne učinke na oblikovanje sedrenih barijera, prekomjerne koncentracije mutnoće i organskih tvari u vodi imaju negativne učinke na taloženje sedre. Još jedna posebna osobitost je utjecaj vegetacije u procesu taloženja pri čemu vegetacijske barijere usporavaju protok vode što pogoduje taloženju i nakupljanju kristala kalcita.

3.4. Geokemijski čimbenici nastanka sedre

U Hrvatskoj su se znanstvenici bavili postankom sedre i dali su jako veliki doprinos spoznajama o čimbenicima koji utječu na nastanak sedrenih barijera. Treba posebice izdvojiti radove Matoničkina i Pavletića (1963) u kojima se do tada pokušavao objasniti nastanak sedre, za što je najvažnije da se stvaranje sedre povezuje s karbonatnim sastavom slijeva i biološkim čimbenicima, prije svega utjecajem vegetacije.

Sedra se formira iz vode koja sadrži kalcijeve i hidrogenkarbonatne ione kroz sljedeću kemijsku reakciju

$$Ca^{2+} + 2(HCO_3)^{2-} \leftrightarrow CaCO_3 + CO_2 - H_2O$$

Do reakcije dolazi kada se ugljični dioksid izdvoji iz vode oslobađanjem u atmosferu ili se fotosintezom ugrađuje u strukturu biljaka. Oslobađanje u atmosferu javlja se samo u slučaju kada je parcijalni tlak ugljičnog dioksida u vodi viši od atmosferskog ($10^{-3,5}$ bara). Takva je situacija u brojim izvorskim vodama, osobito onima u krškim predjelima zato što u njima postoje otopljene količine ugljičnog dioksida koje su u vodu ušle procjeđivanjem kroz tlo gdje se procjedna voda obogatila s ugljikovim dioksidom nastalim raspadom organske materije i respiracijom bilja. Međutim, sedra se taloži isključivo u slučajevima kada je koncentracija kalcija dovoljno visoka da prelazi vrijednost produkta otapanja minerala kalcita. Dakle, mora biti prezasićena s kalcitnom mineralnom fazom. Na osnovi izučavanja postanka sedrenih slapova duž toka rijeke Krke zaključuju da biljke (pretežito mahovine) nemaju većeg udjela pri izdvajanju karbonata iz hidrokarbonatne otopine. Znatno više karbonata izdvaja se zbog razlike parcijalnih tlakova ugljikovog dioksida u vodi i atmosferi. Bitna je uloga biljaka u tome što one zadržavaju velike količine izlučenih karbonata, koji bi se u protivnom taložio na dnu rijeke ili bi ga tok vode odnio nizvodno. Biljke, posebno busenovi mahovine su najučinkovitije zato što zadržavaju kalcijev karbonat poput neke vrste filtra. Na taj način vrlo aktivno sudjeluju u formiranju sedrenih barijera. Položaj i veličina busenova utječe na oblikovanje istaloženih naslaga sedre. U tom procesu aktivno sudjeluju i druge biljke i organizmi koji pripadaju danom staništu, odnosno u taloženju sedre u tekućicama istodobno i neodvojivo sudjeluju biotički i abiotički čimbenici te da su istog značenja.

U biotopima vapneničkih voda, onih koji se nalaze u krškim terenima, javlja se fenomen osrednjavanja, tj. stvaraju se organogene vapneničke naslage (Matoničkin i Pavletić, 1971). Osrednjavanje je složen proces u kojem sudjeluju brojni i različiti fizikalno-kemijski i biotički čimbenici. Matoničkin i Pavletić (1971) ističu da sedrene naslage u različitim biotopima mogu nastati na različite načine. Čestice vapnenca iz vode više se izlučuju što je veća površina vode u kontaktu s atmosferom. Takvi se procesi događaju na mjestima rasprskavanja i prozračivanja vode. Matoničkin i Pavletić (1971) ističu da u otvorenim vodotocima Dinarskog krša, osobito onog na području Hrvatske, vladaju povoljni uvjeti alkaliniteta vode i povoljne temperature vode. Ako je temperatura vode veća od 14 ^{o}C, nema taloženja sedre. Idući od izvora prema ušću temperatura vode i količina otopljenog kisika

postupno rastu, smanjuje se brzina vode i količina ugljičnog dioksida, a mjestimice se javljaju uvjeti za stvaranje sedre. Tu se prije svega misli na lokalitete koji su izloženi utjecaju svjetlosti i na kojima su povoljni uvjeti za rast mahovine, alga i druge vegetacije.

Tijekom zime u normalnim uvjetima ne odvija se proces osedravanja. Matoničkin i Pavletić (1971) napominju da je u nekim vodama zapaženo jače osrednjavanje za vrijeme hladnoga zimskoga razdoblja. Kao primjer za to navode se Plitvička jezera. To se zbiva samo u vodama čiji se površinski slojevi zaleđuju. U vodi se ispod leda poveća koncentracija hidrogenkarbonata, što uz smanjenu količinu slobodnog ugljikovog dioksida uzrokuje taloženje karbonatnih minerala. Inače kad su temperature iznad ledišta, pa čak i ispod, takvih pojava nema. Utvrđeno je da se sedra može taložiti u vodama širokog temperaturnog raspona od 2 do 22°C ali naravno da više temperature vode pogoduju bržem rastu.

Matoničkin i Pavletić (1971) naglašavaju ulogu određenih biljaka, prije svega hidrofitskih i higrofitskih mahovina i nešto manje alga. Zbog jakog rasprskavanja izlučene čestice minerala kalcita ne bi se mogle zadržati na mjestu izlučivanja, već bi bile odnesene tokom vode do mjesta gdje bi se mogle istaložiti. To se događa u vodotocima u kojima je brzina tečenja vode veća od 0,5 m/s, ali ne prelazi vrijednost od 3,5 m/s. Pri brzini vode većoj od 3,5 m/s, na dnu i bokovima korita otvorenih vodotoka ne postoje uvjeti za naseljavanje nijedne biljne ni životinjske vrste.

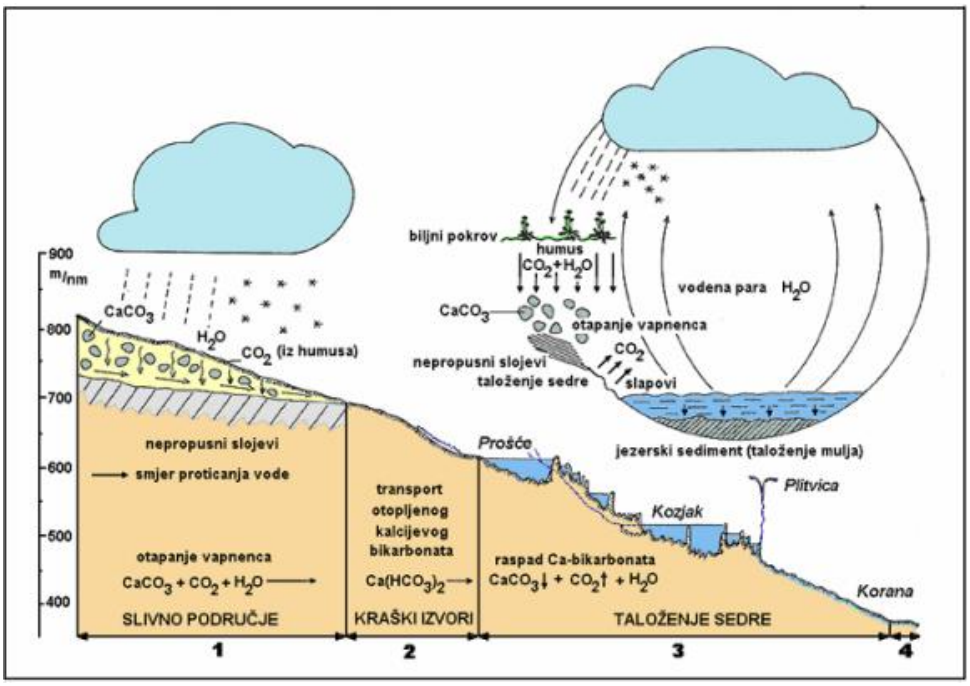
Kod manjih brzina naseljavaju se brojni organizmi koji svojim vegetativnim tijelima ili tvorevinama zadržavaju izlučene čestice kalcijeva karbonata, stvarajući tako sedrene naslage koje rastu zajedno s rastom sedrotvornih organizama. Sedra se taloži u čistim protočnim krškim vodama čija brzina ne prelazi vrijednost od 3,5 m/s, a proces se zbiva pri temperaturama vode višim od 14°C.

Osim prezasićenosti vode kalcijevim karbonatom, ostali važni faktori su brzina vode u rasponu 0,5 – 3,5 m/s, pH vode iznad 8, smanjena koncentracija otopljene organske tvari (DOC engl. dissolved inorganic carbon) te posredno djelovanje živih organizama (Srdoč et al., 1985). Samo taloženje sedre je rezultat djelovanja dva procesa. Jedan je anorgansko otpuštanje, odnosno otplinjavanje CO_2 iz vode zbog zagrijavanja ili pad tlaka CO_2 pri povećanoj turbulenciji vode na barijerama, a drugi je organsko uklanjanje CO_2 iz vode biološkim fotosintetskim

procesima vodenih biljaka, algi i cijanobakterija. Na prostoru Plitvičkih jezera ovaj drugi način ima ključno značenje.

Na području Plitvičkih jezera, kalcijev karbonat se brže taloži uz prisustvo makrofita koji formiraju slapove. Naslage sedre stvaraju barijere formirajući kaskadni niz jezera. Istovremeno se taloži kalcijev karbonat u obliku karbonatog mulja na dnu jezera. Brzina taloženja karbonatnog sedimenta iznosi oko 8 mm, a rast sedrenih barijera oko 13 mm godišnje (Babinka, 2007; Horvatinčić, 2010; Srdoč et al., 1985).

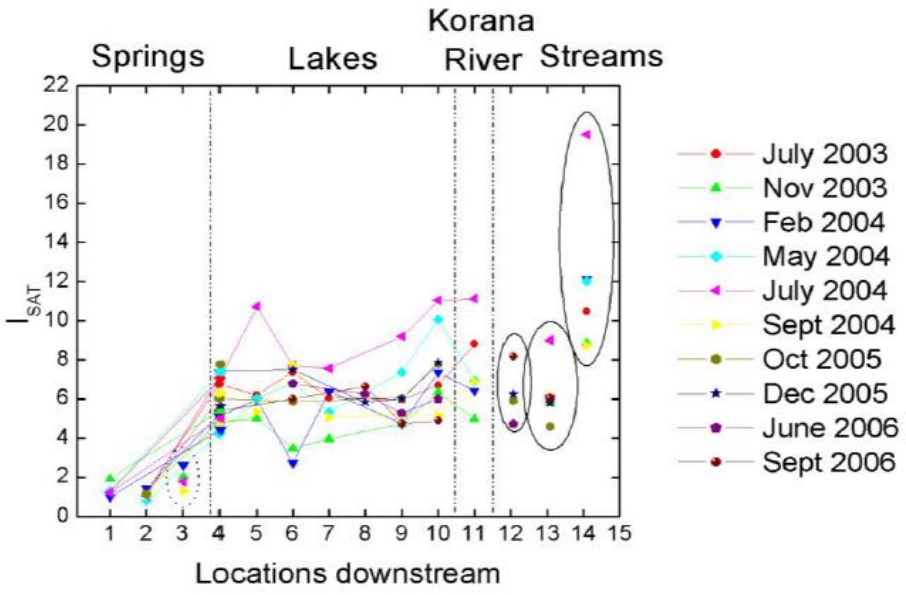
Geokemijski proces sedrenja i formiranje jezerskog sedimenta prikazan je na presjeku Plitvičkih jezera (Slika 3.10.) (Horvatinčić, 2013). Istraživanja fizikalno-kemijskih uvjeta taloženja sedre iz svježe vode na području Plitvičkih jezera provedena su sustavno u različitim godišnjim dobima uključujući 3 glavna izvora Plitvičkih jezera, potoka i rijeke Korane koja je izašla iz Plitvičkih jezera, u ukupnoj udaljenosti od ~12 km. Jezerske vode karakteriziraju visoke sezonske temperature koje variraju od ~20°C i pH vrijednost od 7,3 – 7,6 u izvorima i 8,2 – 8,6 na području nizvodnih jezera.



Slika 3.10. Geokemijski proces sedre i taloženje jezerskih sedimenata na Plitvičkim jezerima (Horvatinčić, 2013)

Koncentracija CO_2 naglo pada duž toka u proljeće dok se koncentracija hidrogenkarbonata kao glavnog sastojka otopljenog anorganskog ugljika stalno smanjuje nizvodno, od 5,2 do 3,5 $mmolL^{-1}$ zbog taloženja kalcita, odnosno sedre. Zbog istog razloga smanjuje se i koncentracija kalcija. Na području jezera gdje je proces taloženja kalcita vrlo veliki, voda je prezasićena s kalcijevim karbonatom, a indeks zasićenja (I_{SAT}) $CaCO_3$ je u rasponu od 4 do 10 (Slika 3.11).

Nastanak sedrenih barijera utječe na ostale čimbenike zaslužne za taloženje sedre budući da usporavaju brzinu tečenja vode, omogućavaju prozračivanje vode i prskanjem potiču gubitak CO_2 iz vode pri čemu raste zasićenost s kalcitnom mineralnom fazom.



Slika 3.11. Mjesečne promjene indeksa zasićenja $CaCO_3$ (I_{SAT}) Plitvičkih jezera (Horvatinčić, 2013)

Na izvorima i duž toka Crne i Bijele Rijeke ne dolazi do taloženja kalcita. Analiza vode glavnih izvora pokazuje vrlo stabilnu temperaturu tijekom cijele godine (6,5 – 8,5°C), pH vrijednosti u rasponu 7,3 – 7,8, visoke koncentracije otopljenih hidrogenkarbonata (4,2 – 5,2 $mmolL^{-1}$) i otopljenog CO_2 (0.2-0.7 $mmolL^{-1}$), te ravnotežne uvjete s obzirom na zasićenost kalcitom (I_{SAT} = 1 – 2). U pritokama se kalcit ne taloži iako je voda prezasićena s kalcitnom mineralnom fazom, slično kao i jezerske vode. Najvjerojatniji razlog je ulaz alohtone organske materije iz šumskog

područja koji može inhibirati taloženje kalcita, npr. ako postoji visoka koncentracija otopljenog organskog ugljika (DOC).

Isto tako odmah nakon jezera u rijeci Korani unatoč prezasićenosti s kalcijevim karbonatom nema sedrenja. Prevelika koncentracije organske tvari u vodi i ovdje sprečava sedrenje. Na rast koncentracije otopljene organske materije ovdje utječu otpadne vode iz domaćinstava. Zbog negativnog utjecaja otopljenog organskog ugljika i općenito organske materije u jezerskoj vodi na sedrenje, Uprava Nacionalnog parka Plitvička jezera sustavno uklanja prekomjernu vegetaciju kako duž sedrenih barijera tako i ostalo vodeno raslinje.

4. ZAKLJUČAK

Nacionalni park Plitvička jezera jedan je od najljepših i najpoznatijih u svijetu. Od velikog značaja je kako za lokalno stanovništvo (zbog turizma), tako i za znanost u Hrvatskoj i šire. NP Plitvička jezera su dom mnogim biljnim i životinjskim vrstama koje su vrlo rijetke u svijetu, a neke su i endemične vrste.

Najveća posebnost Parka je sedra koja je zaslužna za očaravajući izgled samih jezera. Formiranje sedrenih barijera posljedica je djelovanja velikog broja klimatskih, geoloških, hidrogeoloških, hidroloških, geokemijskih i biogeokemijskih čimbenika, koji su međusobno ovisni. Ključni čimbenici za taloženje sedre su stalno napajanje jezera s vodom vrsne kakvoće, prezasićenost kalcijevim karbonatom, usporavanje vode, sačuvana mikrobiološka i vegetacijska osnova ekološkog sustava, prozračivanje i prskanje.

Rast i razvoj sedrenih barijera ugrožen je ukoliko dođe do poremećaja fizičkih, kemijskih i bioloških čimbenika koji sudjeluju u procesu osrednjavanja. Poglavito je štetan porast koncentracije ukupno otopljenog ugljika koji inhibira taloženje sedre zatim prorastanje korijenja vegetacije i velike brzine i količine vode što može destruktivno djelovati na stabilnost sedrenih barijera. Koncentracija ukupno otopljenog organskog ugljika često je posljedica povećane biološke produkcije u jezerima (eutrofikacije) i organskog onečišćenja antropogenog porijekla iz različitih izvora, otpadne vode iz domaćinstava, odlagališta otpada, poljoprivredne površine itd.

Zbog negativnog utjecaja otopljenog organskog ugljika i općenito organske materije u jezerskoj vodi na sedrenje, potrebno je sustavno uklanjanje prekomjerne vegetaciju kako duž sedrenih barijera tako i ostalo vodeno raslinje. Upravljanje načinom korištenja prostora nacionalnog parka, zbrinjavanje otpada i otpadnih voda te optimaliziranje broja posjetitelja nužni su za zaštitu jedinstvenog jezerskog ekosustava i nastavka procesa rasta sedrenih barijera i u budućnosti.

5. LITERATURA

Babinka, S. (2007): Multi-tracer study of karst waters and lake sediments in Croatia and Bosnia and Herzegovina: Plitvice Lakes, National Park and Bihać area. Thesis, Rheinischen Friedruch-Wilhelms-Universitat Bonn, 167 p.

Biondić, B., Biondić, R., Meaški, H. (2010): The conceptual hydrogeological model of the Plitvice Lakes. Geologia Croatica, 62/2, 195-206.

Božićević, S. (1990): Hidrogeološke zanimljivosti Plitvičkih jezera. Ekološki glasnik, 7-8, 28-33.

Butko, I., Felja, I., Juračić, M. (2013): Geology of the Plitvice Lakes. In: Croatia-Straval Case Study, Plitvice Lakes National Park, Marie Curie Actions –Irses Project Straval.. Project coordinator: J.L. Brianso; Editors: B. Obelić & I. Krajcar Bronić, Impremta AUBERT, Sant Joan les Fontes, Girona Spain, 25-27.

Emeis, K.C., Richnow, H.H., Kempe, S. (1987): Travertine formation in Plitvice National Park, Yugoslavia: chemical versus biological control. Sedimentology, 34, 595-601.

Horvatinčić, N. (2013): Tufa and the Lake Sediment Formation. In: Croatia - Straval Case Study, Plitvice Lakes National Park, Marie Curie Actions –Irses Project Straval. Project coordinator: J.L. Brianso; Editors: B. Obelić & I. Krajcar Bronić, Impremta AUBERT, Sant Joan les Fontes, Girona Spain, 34-39.

Horvatinčić, N., Čalić, R., Geyh, M.A. (2000): Interglacial Growth of Tufa in Croatia. Quaternary research 53: 185-195.

Obelić, B. & N. Horvatinčić (2013): Geochronology. In: Croatia- Straval Case Study, Plitvice Lakes National Park, Marie Curie Actions –Irses Project Straval.. Project coordinator: J.L. Brianso; Editors: B. Obelić & I. Krajcar Bronić, Impremta AUBERT, Sant Joan les Fontes, Girona Spain, 42-47.

Kapelj, S. & J. Kapelj (2013): Hydrogeologica Risk Assessmant of the Catchment Area. In: Croatia - Straval Case Study, Plitvice Lakes National Park, Marie Curie

Actions –Irses Project Straval. Project coordinator: J.L. Brianso; Editors: B. Obelić & I. Krajcar Bronić, Impremta AUBERT, Sant Joan les Fontes, Girona Spain, 28-33.

Matoničkin, I., Palvetić, Z. (1963): Prethodna ekološko-biocenološka istraživanja opskrbnih voda Plitvičkih jezera. Acta botanica Croatica, vol. XXII, Zagreb.

Matoničkin, I., Pavletić, Z., Tavčar, V., Krkač, N. (1971): Limnološka istraživanja reikopa i fenomen protočne travertinizacije u Plitvičkim jezerima. Acta biol. 7/1, Prirodoslovna istraživanja JAZU, 45-68.

Obelić, B. & N. Horvatinčić (2013): Geochronology. In: Croatia- Straval Case Study, Plitvice Lakes National Park, Marie Curie Actions –Irses Project Straval.. Project coordinator: J.L. Brianso; Editors: B. Obelić & I. Krajcar Bronić, Impremta AUBERT, Sant Joan les Fontes, Girona Spain, 42-47.

Pentecost, A. (2005): Travertine. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 446.

Polšak, A. (1974): Geološki aspekti. Plitvička jezera – čovjek i priroda, Nacionalni park Plitvička jezera, 23-32, Zagreb.

Polšak, A., Juriša, M., Šparica, M., Šimunić, A. (1976): Osnovna geološka karta SFRJ. 1:100.000, List Bihać, L33-116, Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.

Srdoč, D., Horvatinčić, N., Obelić, B., Krajcar Bronić, I., Sliepčević, A. (1985): Procesi taloženja kalcita u krškim vodama s posebnim osvrtom na Plitvička jezera. Krš Jugoslavije (Carsus Iugoslaviae), 11 (2-6): 101-204.

OSTALI IZVORI

- http://www.irb.hr/en/research/projects/intl/euprojects/ICA2/ANTHROPOL.PROT, 2006. Final Report: Study of Anthropogenic Pollution afterthe War and Establishing of Measures for Protection of Plitvice National Park andBihać Region, Contract No. ICA2-CT-2002-10009-ANTHROPOL.PROT., the 5th framework programme of the European Community for research, technological development and demonstration activities, NCO Copernicus-2, Bruxelles.
- http://www.geografija.hr/hrvatska/plitvicka-jezera-tamo-gdje-voda-prkosi-krsu/
- https://hr.wikipedia.org/wiki/Sedrena_barijera
- http://www.np-plitvicka-jezera.hr/hr/prirodne-i-kulturne-vrijednosti/sedra/
- http://www.np-plitvicka-jezera.hr/hr/multimedija

POPIS SLIKA:

Slika 2.1. Plitvička jezera; (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:00 h) ..... str. 2

Slika 2.2. Naslage sedre u jezeru Mono u bazenu Mono u Kaliforniji; (en.wikipedia.org/wiki/Mono_Lake, 9.6.2017, 17:17 h)..... str. 3

Slika 2.3. Vodopad Kravice na rijeci Trebižat kod Ljubuškog; (izvor: www.jpparkovi-ljubuski.com/djelatnosti/ittem/305-kravica-slap-parking.htlm, 9.6.2017, 17:11 h)..... str.4

Slika 2.4. Naslage travertina, Pamukkale, Turska; (izvor: www.rainbowtourturkey/tours-info/ pamukkale, 9.6.2017. 21:00)..... str.4

Slika 3.1. Shematski prikaz reljefa neposrednog područja Plitivčkih jezera s nazivima pojedinih jezera; (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:35 h)..... str.6

Slika 3.2. Prikaz geološkog zemljovida na području Plitvičkih jezera; (Butko et al., 2013)..... str.8

Slika 3.3. Shematski prikaz uzdužnog geološkog profila Plitvičkih jezera; (Butko et al., 2013)..... str.9

Slika 3.4. Kozjak i uzvodno niz Gornjih jezera; (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:30 h)..... str.10

Slika 3.5. Donja jezera usječena u kredne vapnence; (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:34 h)..... str.10

Slika 3.6. Ulaz u spilju Šupljaru; (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:36 h)..... str.11

Slika 3.7. Sastavci s velikim slapom Plitvice zimi; (izvor: www.np-plitvicka-jezera.hr/multimedija, 9.6.2017, 17:33 h)..... str.12

Slika 3.8. Fotografije snimljene elektronskim mikroskopom na kojima se vidi nastanak sedre na ljepljivim površinama dijatomeja, cijanobakterijama, mahovinama itd. na sedrenim barijerama Plitvičkih jezera (Emeis et al., 1987);..... str.13

Slika 3.9. Istaloženi porozni kalcit u kojem su ugrađeni ostaci bakterija i diatomeja (Emeis et al., 1987);..... str.14

Slika 3.10. Geokemijski proces sedre i taloženje jezerskih sedimenata na Plitvičkim jezerima (Horvatinčić, 2013);..... str.17

Slika 3.11. Mjesečne promjene indeksa zasićenja $CaCO_3$ (I_{SAT}) Plitvičkih jezera (Horvatinčić, 2013);..... str.18

POPIS KRATICA:

DOC – dissolved organic carbon (otopljeni organski ugljik)