

GEOLOŠKA, STRUKTURNO-TEKTONSKA I HIDROGEOLOŠKA OBILJEŽJA PODRUČJA PAKOŠTANA I VRANSKOG JEZERA

GEOLOGICAL, STRUCTURAL-TECTONIC AND HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS OF THE PAKOŠTANE AREA AND LAKE VRANA

GEOLOŠKA GRAĐA

Područje oko Pakoštana i Vransko jezero i polje geološki je istraživano u sklopu izrade listova OGK Biograd (Mamužić, Nedela-Devide, 1971), Šibenik (Mamužić, 1966) i Zadar (Majcen *et al.*, 1970), i pripadajućih tumača (Mamužić, Nedela-Devide, 1973, Mamužić, 1975, Majcen, Korolija, 1973). Šire područje Vranskog jezera i polja izgrađeno je od krednih (rudistnih) i eocenskih (foraminiferskih) vapnenaca, krednih dolomita i eocenskog fliša, uglavnom laporanog (Sl. 1). Stijene krede i paleogenog (eocena) prekrivene su kvartarnim pretežno jezerskim sedimentima na većem dijelu polja i ispod jezera.

Gornjoj kredi (K_2^3) pripadaju rudistni vapnenci senona koji lokalno mogu sadržavati proslojke tanje uslojenih do pločastih vapnenaca ili dolomita. Ove stijene izgrađuju morfološki uzdignute dijelove terena, tj. antiklinale Galovac-Gorica u sjeveroistočnom dijelu te dijelom reducirane antiklinale Raštane u jugozapadnom dijelu terena, kao i dijelove podloge kvartarnih naslaga u Vranskom polju. Rudistni vapnenci sivosmeđe su boje, imaju dobro izraženu slojevitost, a debljina slojeva je 20 - 60 cm. Tektonski su dosta izlomljeni, a u površinskom dijelu i znatno okršeni. Debljina tih vapnenaca iznosi oko 370 m. Vapnenci i dolomiti turonskog kata $K_2^{1,2}$ nalaze se na obali istočno od Biograda gdje su prekriveni kvartarnim naslagama, a zbog njihovog litološkog sastava, kao i strukturnog položaja u sklopu terena, mogu značajno utjecati na tečenje podzemnih voda (Kapelj *et al.*, 2002).

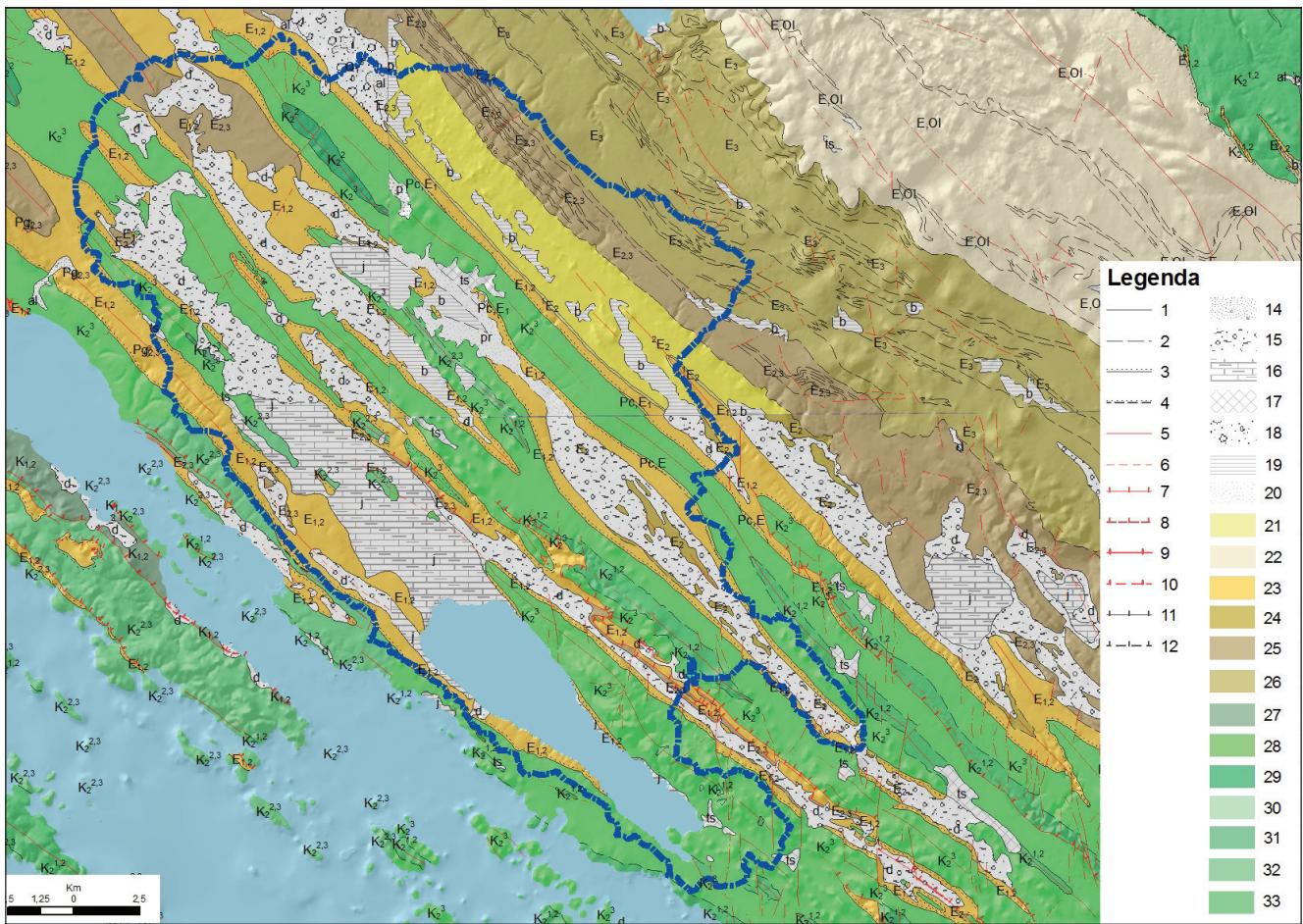
Karbonatne i klastične stijene paleogenske starosti transgresivno su taložene na vapnence gornjokredne starosti. U cijelovitom razvoju mogu se izdvojiti eocenski vapnenci i fliš. Eocenskom transgresijom bili su obnovljeni plitkomorski okoliši s karbonatnom sedimentacijom tijekom koje su taložene prvo liburnijske naslage, zatim foraminferski vapnenci ($E_{1,2}$), a na njima, također bez prekida u taloženju, sli-

GEOLOGICAL SETTING

The area around Pakoštane, Lake Vrana and the Field of Vrana was geologically investigated as part of the project entitled "Basic Geological Map of the Republic of Croatia 1:50.000," Biograd (Mamužić & Nedela-Devide, 1971), Šibenik (Mamužić, 1966) and Zadar (Majcen *et al.*, 1970) sheets, and the accompanying interpreter (Mamužić & Nedela-Devide, 1973; Mamužić, 1975; Majcen & Korolija, 1973). The wider area of Lake Vrana and Field of Vrana is composed of Cretaceous (rudist) and Eocene (foraminifera) limestones, Cretaceous dolomites, and Eocene flysch, mainly marls (Fig. 1). The Cretaceous and Paleogene (Eocene) are mainly covered with Quaternary lake sediments in the larger part of the Field of Vrana and under the lake.

The Upper Cretaceous (K_2^3) consists of Senonian rudist limestone that locally contains interbeds thinly layered up to plate limestone or dolomite. These rocks form the morphologically elevated parts of the terrain, i.e., the Galovac-Gorica anticline in the northeastern part and the partly reduced Raštane anticline in the southwestern part of the terrain, as well as parts of the bedrock of the Quaternary deposits in the Field of Vrana. The Rudist limestones are gray-brown in color, with well pronounced stratification, and the thickness is 20 – 60 cm. They are tectonically quite broken, and in the surface area also significantly karstified. The thickness of these limestones is about 370 m. The Turonian limestones and dolomites ($K_2^{1,2}$) are situated on the coast east of Biograd, where they are covered with Quaternary sediments, but due to their lithological composition and structural position within the terrain, they have a significant impact on the underground water flow (Kapelj *et al.*, 2002).

The Paleogene carbonate and clastic rocks are deposited transgressively on Upper Cretaceous limestones. In overall development, Eocene limestones and flysch can be separated.



Sl. 1 Geološka karta Vranskog jezera i slivnog područja, prema (Mamužić; Nedela-Devide 1971, Mamužić; Nedela-Devide 1973, Mamužić 1966, Mamužić 1975, Majcen et al. 1970, Majcen; Korolija 1973). Površinski sliv određen je pomoću ArcGIS-a (ESRI, 1999-2009) i označen je tamno plavom crtom. Tumač: 1) Geološka granica; 2) Prepostavljena geološka granica; 3) Erozijsko-diskordantna granica; 4) Prepostavljena erozijsko-diskordantna granica; 5) Rasjed; 6) Prepostavljeni rasjed; 7) Reversni rasjed; 8) Prepostavljeni reversni rasjed; 9) Navlaka; 10) Prepostavljena navlaka; 11) Transgresija; 12) Prepostavljena transgresija; 14) al Aluvijalni sed.; 15) d Deluvijalni sed.; 16) j Jezerski sed.; 17) ts Terra rossa; 18) Q13.Pjeskovite gline; 19) pr Proluvijalni sed.; 20) Barski sed.; 21) 2E2 Vapnenci, lapori i klastiti; 22) E, Ol Pločasti vapnenci; 23) E1,2 Foraminiferski vapnenci; 24) E2 Fliš; 25) E2,3 Fliš i konglomerati; 26) E3 Konglomerati i vapnenci; 27) K1,2 Dolomiti; 28) K23 Rudistini vapnenci; 29) K22 Vapnenac dobro uslojen; 30) K21 Dolomit i vapnenac; 31) K22+3 Vapnenac i dolomit; 32) K22,3 Dolomit i dolomitični vapnenci; 33) K21,2 Vapnenci i dolomiti s hondrodontima.

Fig. 1. Geological map of Lake Vrana and its catchment (Mamužić & Nedela-Devide, 1971; Mamužić & Nedela-Devide, 1973; Mamužić, 1966; Mamužić, 1975; Majcen et al., 1970; Majcen & Korolija, 1973). The orographic catchment was determined with ArcGIS (ESRI, 1999-2009) and marked with dark blue line. Legend: 1) Geological boundary; 2) Proposed geological boundary; 3) Erosional-discordant boundary; 4) Proposed erosional-discordant boundary; 5) Fault; 6) Proposed fault; 7) Reverse fault; 8) Proposed reverse fault; 9) Thrust fault; 10) Proposed thrust fault; 11) Transgression; 12) Proposed transgression; 14) al Alluvial sediments; 15) d Diluvial sediments; 16) j Lake sediments; 17) ts Terra rossa; 18) Q13 Sandy clays; 19) pr Proluvial sed.; 20) Pond deposits; 21) 2E2 Limestones, marls and clastites; 22) E, Ol Platy limestones; 23) E1,2 Foraminiferal limestones; 24) E2 Flysch; 25) E2,3 Flysch and conglomerates; 26) E3 Conglomerates and limestones; 27) K1,2 Dolomites; 28) K23 Rudist limestones; 29) K22 Stratified limestone; 30) K21 Dolomite and limestone; 31) K22+3 Limestone and dolomite; 32) K22,3 Dolomite and dolomitic limestone; 33) K21,2 Limestone and dolomites with chondrodonts.

jede naslage srednjoeocenskog fliša. Liburnijske naslage talože se na transgresivnom kontaktu na paleoreljefu razvijenom u podinskim rudistnim vapnencima. Liburnijske naslage taložene su u pretežno slatkvodnim uvjetima u početnim fazama transgresije, a odlikuju se bogatom fosilnom faunom gastropoda, školjkasa, foraminifera, ostrakoda i ostataka bilja. Napredovanjem transgresije tijekom donjeg eocena započeli su prevladavati plitki marinski uvjeti taloženja te su na liburnijskim naslagama kontinuirano taloženi foraminferski vapnenci. Ovi vapnenci sadrže fosilne ostatke foraminifera (idući od starijih prema mlađima) rodova mili-

The Eocene transgression caused the formation of shallow marine carbonate sedimentation, first Liburnian deposits and then foraminiferal limestones ($E_{1,2}$), followed by middle Eocene flysch deposits. Liburnian deposits accumulate upon transgressive contact with the paleorelief developed on the footwall rudist limestones. They were deposited mainly in freshwater conditions in the initial transgression stages and are characterized by rich fossil fauna of gastropods, bivalves, foraminifera and ostracod, and plant remains. With the transgression advancement during the lower Eocene, shallow marine carbonate sedimentation with Liburnian deposits accu-

oida, alveolina i numulita, po kojima su pojedini nivoi dobili ime. Uz njih se još nalaze i ostaci ježinaca i školjkaša, a u najmlađim dijelovima i globigerinsko-globorotalijska fauna koja ukazuje na taloženje u uvjetima dubljeg otvorenog mora. Ove su naslage dobro uslojene, a debljina slojeva je 3 - 40 cm. Zapaženi su na više izdanaka u jugozapadnom dijelu Vranskog polja gdje zajedno s krednim vapnencima djelomično izgrađuju podlogu kvartarnih naslaga. Sredinom eocena na foraminiferskim vapnencima najprije se taložio razmijerno tanji kompleks prijelaznih naslaga, a nakon njih započelo je taloženje pretežito klastičnih flišnih naslaga ($E_{2,3}$). Fliš je taložen u uvjetima karakterističnog mehanizma kretanja pijeska i mulja niz padine korita prema njihovim dubljim dijelovima (karakteristični turbiditni tokovi). Flišni kompleks stijena čine izmjene lapor, laporovitih vapnenaca, vapnenačkih lapor i pješčenjaka. Ove naslage u širem području izgrađuju jezgre sinklinala. Na svježe otvorenim profilima i zasjecima boja im je sivoplava, a u zoni oksidacije i površinskog trošenja žuta do svjetlosmeđa. Nalaze se na sjeveroistočnom rubu Vranskog polja, u podnožju brda Debeljaka uz jugozapadni rub polja. Ove su naslage izrazito podložne površinskom trošenju pa na površini najčešće prelaze u neuslojeni materijal prašinasto glinovitog sastava. Ukupna debljina ovih naslaga iznosi oko 900 m, no erozijskim procesima i tektonskom aktivnošću najčešće je znatno reducirana. Velikim dijelom fliš je prekriven kvartarnim sedimentima, posebno u području Vranskog polja i jezera, Vrane, Pristega i Zemunika.

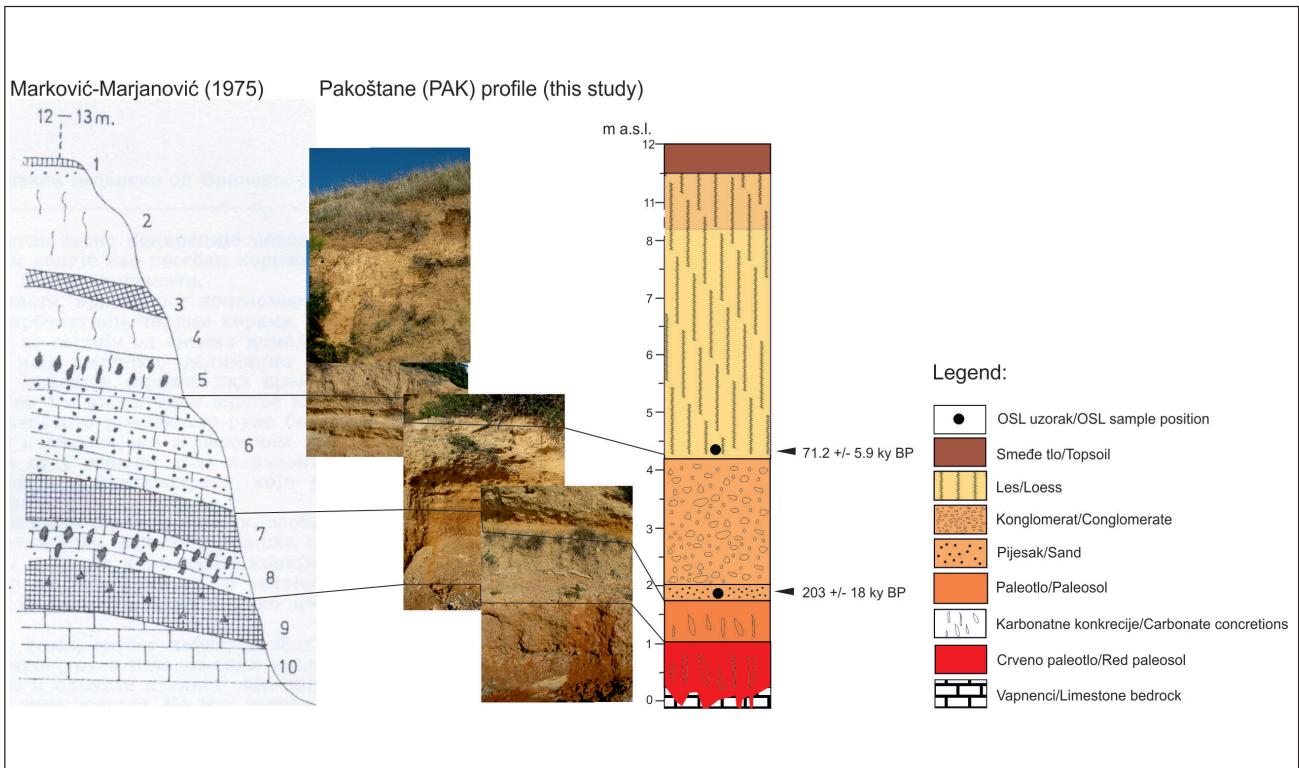
Prominske naslage (E, Ol) taložene su kontinuirano na flišnim naslagama u uvjetima postupnog opličavanja taložnih okoliša, dakle u različitim okolišima, od šelfa i obalnog područja do delta, močvara, aluvijalnih zaravni i lepeza. Ove naslage prekrivaju sjeveroistočne dijelove istraživanog područja gdje prevladavaju uslojeni vapnenci i laporoviti vapnenici te leće grebenskih vapnenaca. Za prominske naslage karakteristični konglomerati pojavljuju se sjeverno i istočno od istraživanog područja.

Na ovom području nisu utvrđene naslage neogenske starijosti, već su prisutni samo najmlađi, uglavnom nekonsolidirani kvartarni sedimenti (Q). U razdobljima visokih razine mora, krške depresije u unutrašnjosti bile su ispunjene vodom te su se u njima taložili jezerski i barski sedimenti (j), a u razdobljima niskih razine mora vjerojatno je dolazilo do njihovog djelomičnog ili potpunog isušivanja. Napredovanje procesa okršavanja također je, u terenu izgrađenom pretežito do karbonatnih stijena, rezultiralo postupnim snižavanjem razine vode tijekom geološke prošlosti. U zadnjih 300 godina velike promjene prirodnog režima taložnih okoliša izazvao je antropogeni utjecaj uslijed izvedbe melioracijskih zahvata te probijanja odvodnih kanala (kanal Prosika) i tunela (Nadinsko blato), što je značajno smanjilo prostiranje poplavnih područja. Pjeskovitu glinu obilježava izmjena siltne i pješčane

mulated, following continuously deposited foraminiferal limestones. These limestones contain fossil remains of foraminifera (from older to younger) genera of milioda, alveolina and nummulites, after which the individual levels were named. They are accompanied by the remains of sea urchins and shellfish and, in the youngest parts, by globigerine-globorotalian fauna which indicates deposition in the deeper open sea. These deposits are well layered, with the thickness ranging from 3 to 40 cm, and they appear in several outcrops in the southwestern part of the Field of Vrana, where together with Cretaceous limestone they partially built the bedrock of Quaternary deposits. In the middle of the Eocene, a relatively thin complex of transitional deposits first accumulated on the foraminiferal limestone, followed by predominantly clastic flysch deposits ($E_{2,3}$). Flysch was deposited in turbidite flows, in the typical mechanism of sand and mud movement down the slopes to deeper parts, and is composed of a sequence of marls, marly limestones, calcareous marls and sandstones. These deposits in the wider area build the syncline cores. On fresh open profiles and outcrops, their color is gray-blue, while the area of oxidation and surface weathering appears yellow to reddish brown, where they transition to unbedded silty clay material. They are located in the northeastern part of the Field of Vrana, at the foot of Debeljak Hill along the southwestern edge of the polje. The total thickness of these combined layers is around 900 m, but it is reduced due to erosional processes and tectonic activity. In large areas, the flysch is covered with Quaternary deposits, especially in the area of the Field of Vrana and the lake, Vrana, Pristeg and Zemunik.

Promina deposits (E, Ol) are accumulated continuously on the flysch sediments in gradually shallowing sedimentation environments, from the shelf and coastal areas to the deltas, wetlands, alluvial plains, and fans. They are located in the northeastern part of the study areas, where bedded limestones, marly limestones and reef limestone lenses predominate. Typical conglomerates of Promina deposits occur north and east of the study area.

In this area, there are no deposits of Neogene age, but only the youngest, mostly unconsolidated Quaternary sediments (Q) are present. In periods of high sea levels, karst depressions inland were filled with water, and lake and marsh sediments (j) were deposited, while in periods of low sea levels they partially or completely dried out. The progress of the karstification process in the terrain composed of carbonate rocks resulted in the gradual lowering of the water level during the geological past. In the last 300 years, major changes in the natural regime of the depositional environments were caused by anthropogenic impact due to implementation of land reclamation and the perforation of drainage canals (Prosika Canal) and tunnels (Nadinsko blato), which significantly reduced the extent of the flooded areas in the Field of



Sl. 2 Lesni profili i paleotla jugoistočno od samog mjesta Pakoštane (1-10 oznake prema interpretaciji Marković-Marjanović iz 1975).

Fig. 2. Loess profile and paleosols southeast of Pakoštane (1-10 are marked according to Marković-Marjanović, 1975).

komponente, a sortiranost i granulometrijski sastav upućuje na zaključak o eolskom donosu materijala, ali ne na kopneno područje, nego u bazene koji su stalno ili povremeno bili poplavljeni. Najveći dio ishodišnog materijala za kvarterne sedimente dalo je trošenje flišnih naslaga. Lesne (praporne) naslage pleistocenske starosti (I) prostiru se istočno od samog mjesta Pakoštane i čine takozvani pakoštanski lesni ravnjak (Marković-Marjanović, 1975).

Kvarterne sedimente pakošanskog lesnog ravnjaka (I) na vertikalnim strmim profilima uz obalu mora, a koji se protežu istočno od samih Pakoštana u dužini jednog kilometra opisala je *Marković-Marjanović* (1975). Navedena je autorica opisala (Sl. 2) sljedeće naslage unutar profila kvarternih sedimenata (crno-bijela slika unutar Sl. 2):

1. Smeđe holocensko tlo (debljine 0,5 m).
2. Sloj lesa 3-6 m, svijetložute boje, velike tvrdoće, prevladava silt s karbonatnim vezivom.
3. 1 m debeljina paleotla s inicijalnom pedogenesom.
4. Sloj lesa žutosmeđe boje 2-5 m, s tragovima korijena vegetacije, veličine zrna mogu dosegnuti i dimenzije pijeska, nema tragova kontinentalne gatropodne faune.
5. Sloj debljine 1 m s lesnim konkrecijama u karbonatnom vezivu i čini podinu lesnih naslaga.
6. Sloj konglomerata debeljine 1-3 m, prožet lesnim i karbonatnim vezivom i klastima krednih vapnenaca.
7. Naslage paleotla debele 1 m, glinovito s manganskim kug-

Vrana. Sandy clay is characterized by alteration of silty and sandy components, and the sorting and grain size composition indicates the eolian origin of the material, not in the land, but in the basins which were permanently or occasionally flooded. Most of the parent material for the Quaternary sediments originates from weathered flysch deposits. Pleistocene loess deposits (I) extend to the east of the town of Pakoštane and form the so-called Pakoštane loess plateau (Marković-Marjanović, 1975).

The Quaternary sediments of the Pakoštane loess plateau (I) are exposed on the steep vertical profiles on the seashore and extend 1 km east from the town of Pakoštane (Marković-Marjanović, 1975). The cited author described (Fig. 2) the following layers within the Quaternary sediments profile (BW picture within Fig. 2):

1. Brown Holocene soil (thickness 0.5 m);
2. 3-6 m loess layer, light yellow color, high hardness, dominated by silt with calcareous matrix;
3. 1 m thick layer of paleosol, with initial pedogenesis;
4. 2-5 m loess layer, yellow-brown color, with traces of plant roots, grain size can reach the dimensions of sand, no trace of gastropod fauna;
5. The layer 1 m in thickness, with loess concretions in calcareous matrix, which forms a bedrock of loess deposits;
6. 1-3 m thick layer of conglomerate, filled with loess and calcareous matrix and Cretaceous limestone clasts;

- licama i konkrecijama, paleotlo je nastalo na sitnozrnatom konglomeratu.
8. Sloj konglomerata 1m debljine koji se sastoji od vrlo sitnih čestica krednih vapnenaca.
 9. Paleotlo, „terra rossa“ s vapnenačkim konkrecijama i fragmentima vapnenaca
 10. Rudistni vapnenci gornje krede (K_2^3).
 7. 1 m thick layers of paleosols, clayey with manganese nodules and concretions, paleosol was formed on a fine-grained conglomerate;
 8. 1 m thick layer of conglomerate consisting of very small particles of Cretaceous limestone;
 9. Paleosol, “terra rossa” with carbonate concretions and limestone fragments;
 10. Upper Cretaceous rudist limestone (K_2^3).

Marković-Marjanović (1975) je zaključila da na temelju litološkog sastava materijal čine sedimenti eolskog podrijetla predwürmske starosti te da najstarije naslage *terra rosse* možda pripadaju Günz-Mindelu. Ovi sedimenti glavni su izvor materijala za morske sedimente koji se talože u priobalju Pakoštana tijekom holocena. Najnovija datiranja optičkom luminescencijom-OSL datiranja (Ilijanić, neobjavljeno) najstarijih slojeva lesa pokazala su starost od $71,2 \pm 5,9$ ky BP (OIS 4), a naslage iznad crvenih glina 203 ± 18 ky BP (OIS 7.2).

Područje Ravnih Kotara, prema geotektonskim značajkama, čine strukture dinarskog pravca pružanja (SZ-JI) i omeđeno je značajnim reversnim rasjedima jugozapadne vergencije. Struktorno-tektonsko obilježje područja Ravnih kotara jest razmjerno visoki stupanj tektonske destrukcije s dominantno prisutno izduženim strukturama omeđenim rasjedima s vergencijom u smjeru jugozapada. Prvac pružanja struktura unutar strukturne jedinice Ravni kotari je SZ-JI. Zbog kompresije kojoj je prostor istraživanja stalno izložen, s prevladavajućim pravcem neotektonskog stresa generalno S – J, borane strukture dinarskog pružanja deformirane su i razlomljene poprečnim i dijagonalnim rasjedima na strukturne blokove. U području istraživanja zapažaju se horizontalni pomaci duž rasjeda SI - JZ s izrazitom desnom komponentom pomaka u prostoru, uslijed čega je došlo do zaokretanja (retrogradne rotacije) pojedinih dijelova struktura (strukturnih blokova) iz pravca SZ-JI u prvac I-Z.

U širem području (Vranskom polju) ističu se dvije rasjedne zone. Prva zona rasjeda (Nin – Bak – Šibenik) može se pratiti od Nina preko Galovca, sjeveroistočnim rubom Vranskog polja, zatim podnožjem Baka preko Zatona i Šibenika. To je reversni rasjed u području Vranskog polja s pravcem pružanja SZ-JI. Druga zona rasjeda predstavljena je zadarškim rasjedom. Ona ima uglavnom reversno obilježje, međutim, u području istraživanja uočeni su rasjedi s normalnim tektonskim pomakom rasjednih krila, ali i s kosom (dijagonalnom) komponentom pomaka rasjednih krila u prostoru. Šire područje u struktornoj tektonskoj raščlambi strukturne jedinice Ravni kotari čini manju strukturnu jedinicu Bokanjac – Vransko jezero – Šibenik. Ova strukturna jedinica ispresjecana je rasjedima poprečnog do dijagonalnog pružanja na strukturu u strukturne blokove (Kapelj, 2002).

Based on the lithological composition, *Marković-Marjanović* (1975) concluded that the material represents the sediment of eolian origin, older than Würm, and that the oldest terra rossa deposits could belong to Günz-Mindel. These sediments were the main source material for the marine sediments that were deposited along the coast of Pakoštane during the Holocene. The latest dating using the OSL (optically stimulated luminescence) technique revealed an age of 71.2 ± 5.9 ky BP (OIS 4) for the oldest loess layers and 203 ± 18 ky BP (OIS 7.2) for the deposits above red clay.

The area of Rvni Kotari, according to geotectonic characteristics, is composed of geological structures extending in the Dinaric direction (NW-SE) and it is surrounded by significant reverse faults with a southwestern convergence. The structural-tectonic characteristics of the Rvni Kotari region show a relatively high degree of tectonic destruction with predominantly present elongated structures bordered by faults with convergence towards the southwest. The direction of the structures within the Rvni Kotari structural unit is NW-SE. Due to compression, to which the study area was constantly exposed, with dominant N-S direction of neotectonic stress, the folded structures of the Dinaric elongation are deformed and fractured by transverse and diagonal faults on the structural blocks. In the investigated area, horizontal displacements can be seen along the NE-SW fault, with extreme rightward movements, due to which there was a swing (retrograde rotation) of certain parts of the structures (structural blocks) from NW-SE to E-W.

Two fault zones can be highlighted in the wider area (Field of Vrana). The first fault zone (Nin – Bak – Šibenik) can be traced from Nin through Galovac, the northeastern edge of the Field of Vrana, then Bak over Zaton and Šibenik. It is a reverse fault in the Field of Vrana with a NW-SE direction. Another is the Zadar fault zone, with a dominantly reversed character. However, faults with normal tectonic movements were observed in the study area, and additionally with skewed (diagonal) movement. The Bokanjac–Lake Vrana–Šibenik structural unit represents a wider area in the structural tectonic unit. This structural unit is intersected by faults transverse to the diagonal direction on the structures and structural blocks (Kapelj, 2002).

HIDROLOŠKA OBILJEŽJA

Voda dotječe u Vransko jezero površinskim i podzemnim putem (izvori u jezeru), otjeće iz jezera okršenim podzemljem i kanalom Prosika, a gubi se i isparavanjem. Vransko jezero najniža je površina Ravnih kotara, a prikuplja površinske vode gotovo njihove polovice. Slivno područje Vranskog jezera površine 490 km^2 prikazano je na Digitalnoj ortofoto karti 1:5000 (DOF5) Države geodetske uprave (Sl. 3). Određeno je pomoću ArcGIS-a (ESRI, 1999-2009).

Hidrografska mreža na Vranskom polju rezultat je međioracijskih zahvata izvedenih u cilju odvodnje voda prema Vranskom jezeru i moru. Površinski vodotoci slijeva su Kotarka, Kličevica, Mirošnica i Škorobić. Najveći pritok Vranskog jezera je periodični vodotok Kotarka, uređen i kanaliziran, od izvora/zdenca Turanjsko jezero i prikuplja vode područja južno od Donjeg Zemunika i Vranskog polja, jugozapadno od flišne zone uz istočni rub polja te ih uvodi u Vransko jezero. Kotarka je dio mreže kanala koja je uređena u Vranskom

HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS

Water enters Lake Vrana through surface and groundwater flows (springs in the lake) and leaves the lake through the underground karst, the Prosika Canal and evaporation. Lake Vrana is the lowest point of Ravni Kotari and it collects the surface water flows from almost half of Ravni Kotari. The catchment area of Lake Vrana is 490 km^2 and it is shown on the digital orthophoto map (1:50000) of the State Geodetic Administration (Fig. 3) and was determined using ArcGIS (ESRI, 1999-2009).

The hydrographic network in the Field of Vrana is the result of the land reclamation done to drain water from the Field of Vrana into Lake Vrana and toward the sea. The surface watercourses are Kotarka, Kličevica, Mirošnica and Škorobić. The largest tributary of Lake Vrana is the periodic watercourse Kotarka, regulated and diverted, which flows from the Turanjsko jezero spring and collects water from the area south of Donji Zemunik and Field of Vrana SW of the flysch



Sl. 3 Površinski sliv Vranskog jezera kod Biograda označen tamno plavom linijom (prikazan u DOF5, Državna geodetska uprava). Određen je pomoću ArcGIS-a (ESRI, 1999-2009). Označeni su izvori u okolini Vranskog jezera (plavi krugovi) i mjerne postaje (bijeli krugovi).

Fig. 3. The orographic catchment of Lake Vrana near Biograd, marked with a dark blue line (shown in Digital orthophoto map DOF5, State Geodetic Administration), determined with ArcGIS (ESRI, 1999-2009). The springs around Lake Vrana are marked with blue circles, and measuring stations are marked with white circles.

polju radi navodnjavanja, ali većom mjerom i radi drenaže terena. Kotarka je uređena i kanalizirana te mijenja ime u Glavni odvodni kanal u Vranskom polju i prikuplja vode glavnih sabirnih kanala. Lateralni kanal prikuplja oborinske i izvorske vode na sjeveroistočnom rubu Vranskog jezera, s područja Nadina, Polače i izvora Kakma. Vodotok Škorobić prikuplja vode u sjeveroistočnom dijelu sliva, formira se južno od mjesta Radošinovci te se ulijeva u Lateralni kanal. Vodotok Kličevica protječe Kulsko-Korlatskim poljem, prikuplja vode Mirošnice i sudjeluje u odvodnji Nadinskog blata i Polačkog polja, koji se nalaze na višoj nadmorskoj visini. Kroz Polačko polje izведен je odvodni kanal, probijen Tunel „Tinj“ koji je spojen kanalom s izvoristom Kakma, s kojeg se vode odvode Lateralnim kanalom do Vranskog jezera. Kako se Vransko jezero ne snabdijeva jačim stalnim dotocima, vodni režim izravno ovisi o količini i rasporedu oborina u slivu (Mrakovčić *et al.*, 2004).

Prevladavajući pravac tečenja podzemnih voda paralelan je strukturama. Prirodni krški izvori slatke vode u slivu Vranskog jezera su: Kakma (SI rub polja), izvor s najvećom izdašnosti na području Vranskog polja; Tinj (povremeni izvor 1,5 km SZ od Kakme); Veliki i Mali Stabanj (istočni rub Vranskog polja) – u Malom Stabnju registrirani su blago povišeni kloridi; grupa izvora u Vranskom polju nedaleko od Malog Stabnja (Ošac, Modro jezero i Kotlić), koji uz Kakmu čine najizdašnije prirodno izvorište i koje se nalazi pod najizravnijim utjecajem mora; Pećina (sjeverno od mjesta Vrana), povremeni izvor; Biba (u naselju Vrana), zahvaćen za javnu vodoopskrbu; Subiba (slabiji izvor u blizini Bibe); Turanjsko jezero (u Vranskom polju, oko 10 km SZ od jezera), zahvaćen za javnu vodoopskrbu; Kutijin stan (bušeni zdenac II od Turanjskog jezera), crpi se za potrebe vodoopskrbe, u njemu su povremeno blago povišeni kloridi; Vrbica (povremeni izvor uz JZ rub Vranskog polja), u kojoj su blago povišeni kloridi; Begovača (južno od naselja Vrana), povremeni izvor kraj kojeg je izведен bušeni zdenac i koristi se za vodoopskrbu, odlikuje se blago povišenim kloridima; Jasen (uz sjeverni rub jezera), povremeni izvor; Jugovir (uz južni rub jezera, u blizini kanala Prosika), značajan zbog potvrde izravne veze mora i jezera podzemnim krškim kanalima na području Prosike. U samom jezeru nalaze se izvori Živača i niz manjih (SI obala jezera) koje prihranjuju podzemne vode s područja južno od Benkovca te Pristega i Stankovaca. Najveći dio tih izvora uz sjeveroistočni rub Vranskog polja vezan je za dodir vapnenaca i flišne zone koja se proteže jugoistočno od naselja Vrana. Osim toga, izvori su nastali u jezerskim sedimentima i u vapnencima. Vode iz tih izvora crpe se uglavnom za poljoprivredu i navodnjavanje, a dio je kaptiran i za javnu vodoopskrbu. Područje izvora Jasen uz sjeverni rub jezera najjužniji je dio polja i nalazi se ispod razine jezera. U svrhu obrane od voda jezera, uz cestu Pakoštane-Vrana, izgrađeni su zemljani obrambeni nasipi (Fritz, 1984; Magaš, 1990; Stroj, 2012).

zone along the eastern edge of the polje, and conveys it to Lake Vrana. Kotarka constitutes part of the regulated canal network formed for irrigation and drainage, and in the Field of Vrana it is called the ‘Main Canal’ (*Glavni kanal*) and it collects water from other canals. The Lateral Canal collects rainwater and spring water from the northeastern edge of Lake Vrana, from Nadin, Polač and Kakma spring. The Škorobić watercourse collects water in the northeastern part of the catchment; it forms south of Radošinovci and enters the Lateral Canal. Kličevica flows through the Field of Kula and Korlat, collects water from Mirošnica and contributes to the drainage of Nadinsko blato and Polačko polje, which are located at a higher altitude. A drainage canal runs through Polačko polje, where a tunnel, Tinj, was made to connect to a canal to Kakma spring, and the water drains via the Lateral Canal to Lake Vrana. When Lake Vrana is not supplied by stronger continuous inflows, the water regime is directly dependent on the amount and distribution of rainfall in the catchment area (Mrakovčić *et al.*, 2004).

The dominant direction of the groundwater flow is parallel to the structures. The natural freshwater karst springs in the Lake Vrana catchment are: Kakma (NE edge of the Field of Vrana), the spring with the highest yield in the Field of Vrana; Tinj (seasonal spring 1.5 km NW from Kakma); Veliki and Mali Stabanj (eastern edge of the Field of Vrana), where slightly elevated chlorides have been registered; a group of springs in the Field of Vrana near Mali Stabnja (Ošac, Modro jezero, Kotlić), which besides Kakma form the largest natural spring, and which are under the greatest direct influence of the sea; Pećina (north of the village of Vrana), an occasional spring; Biba (in the village of Vrana), pumped to supply water; Subiba (small spring near Biba); Turanjsko jezero (in the Field of Vrana, around 10 km NW of Lake Vrana), pumped to supply water; Kutijin stan (a drilled well SE of Turanjsko jezero), pumped for the public water supply, occasionally has slightly elevated chlorides; Vrbica (occasional well along the SW edge of the Field of Vrana), with slightly elevated chlorides; Begovača (south of the village of Vrana), an occasional spring with a drilled well near to supply water for the public and with slightly elevated chlorides; Jasen (on the northern edge of the lake), an occasional spring; Jugovir (in the southern edge of the lake, near Prosika Canal), slightly brackish, it confirms the direct connection between the lake and the sea. In the lake itself, there is Živača spring and a number of smaller springs (NE shore of the lake), which are supplied by underground water from the area south of Benkovac, Pristeg and Stankovići. Most of these springs along the northeastern edge of the Field of Vrana are related to the contact of limestone and flysch zone, which extends southeast of the village of Vrana. In addition, springs form in lake sediments and in limestone. Water from these springs is mostly pumped for agriculture and irrigation and partly for the public water supply. The area

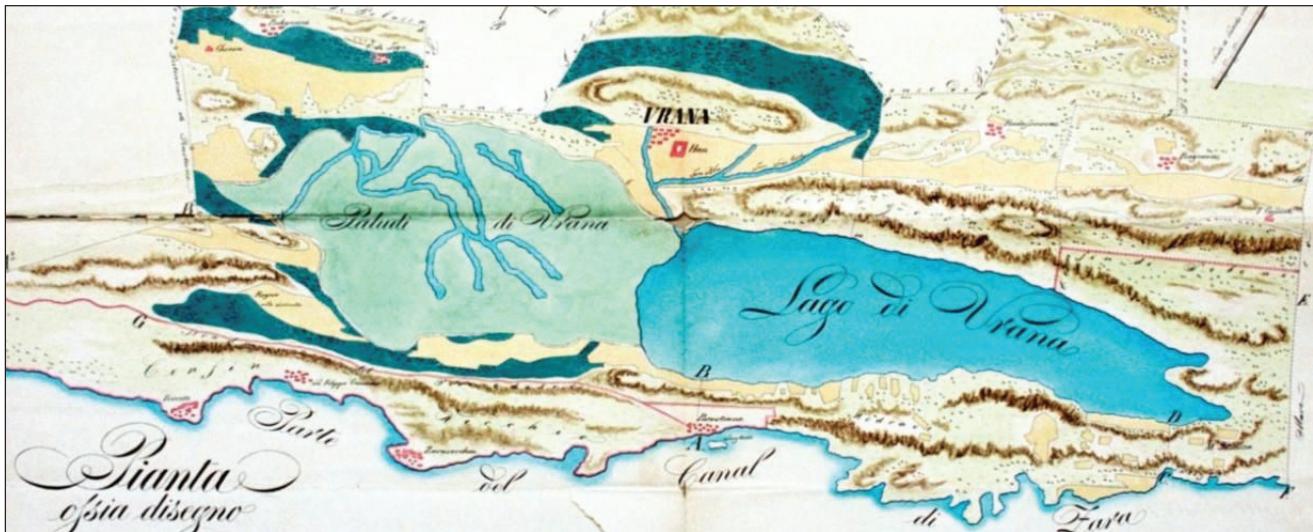
Povremeno blago povećani kloridi na izvorima Kutijin stan, Vrbica, Mali Stabanj i Begovača vjerojatno su posljedica zasićenosti sedimenata koji okružuju njihove dovodne kanale bočatom vodom, a ne izravnog prodora mora u kanalske sustave. Najizraženiji utjecaj morske vode pokazuje grupa stalnih izvora Ošac – Modro jezero koji imaju dublje kanale iz kojih se prihranjuju u odnosu na ostale izvore Vranskog polja, zbog čega je moguć prođor morske vode u kanale. Izvori su vjerojatno izravno povezani s morem. Ovo ukazuje na mogućnost njihovog prihranjivanja s područja uzvodno od zone fliša sjeveroistočnog ruba polja, putem kanala razvijenih ispod fliša. Vjerojatni smjer prodora mora prema Modrom jezeru i okolnim izvorima je područje prekida druge zone fliša koja se nalazi u zaleđu Biograda. U današnjim uvjetima visoke razine mora bivši izvori funkcionišu kao mjesta koncentriranog prodora mora u krške kanalske sustave duboko ispod morske razine (Fritz, 1984; Magaš, 1990; Stroj, 2012).

U zadnjih desetak godina, nakon proglašenja Parka prirode Vransko jezero, prepoznat je problem jakog zaslanjivanja jezerske vode tijekom sušnih mjeseci na temelju povišenih klorida u jezerskoj vodi. Zaslanjivanje je dijelom potencirano antropogenim zahvatima te ugrožava ekološku ravnotežu jezera. Mogućnost akumuliranja slatke vode u sjeverozapadnom dijelu jezera izradom pregrade razmatrao je Fritz (1976). Nakon osnivanja parka prirode odustalo se od zamisljene uspostave akumulacije pregrađivanjem jezera. Zaslanjenje jezera u manjoj je mjeri posljedica pritjecanja bočate vode iz izvora na području Vranskog polja koji su pod utjecajem mora, a u većoj mjeri izravnog prodora mora u jezero, što je pretpostavljeno na temelju mjerena klorida u izvorima i u jezeru u području oko kanala Prosike. Morska voda prodire kroz okršeni karbonatni greben koji razdvaja jezero od mora. Značajke izvora Jugovira potvrđuju povezanost jezera s morem krškim kanalima na području Prosike. Na ovom izvoru, u razdobljima kad razina jezera padne ispod razine mora, morska voda utječe u jezero. Propusni vasprenački greben vjerojatno omogućuje prođor mora po gotovo cijelom svom pružanju, uz izuzetak područja sjeverozapadnog dijela jezera gdje ima flišnih i kvartarnih naslaga unutar sinklinalne strukture. Umjetno prokopan kanal Prosika (1770. godine) u krajnjem jugoistočnom dijelu jezera spaja Vransko jezero s morem. Do tog zahvata vranska močvara pokrivala je cijelo područje sjeverozapadno od Vranskog jezera do izvora Kakma i Kutijin stan (Sl. 4). Močvara je bila premrežena prirodnim vodotocima koji su slobodno tekli od izvora prema Vranskom jezeru. Odlukom Senata Republike Venecije conte Francesco Borelli dobio je u posjed vranski feud i odmah započeo, za ono vrijeme revolucionarni, projekt isušivanja vranske močvare (JU PP Vransko jezero, 2010). Melioracija je započela prokopom kanala Prosika 1770. godine, širokog 4 m i s pragom znatno višim od današnjeg. Ovaj hidrotehnički zahvat rezultirao je sniženjem razine jezera za 3 m i isušen-

of Jasen spring on the northern edge of the lake is the southernmost part of the Field of Vrana, and it is below the level of the lake. For the defense of the waters from the lake, soil embankments have been constructed along the Pakoštane-Vrana road (Fritz, 1984; Magaš, 1990; Stroj, 2012).

Occasional slightly elevated chlorides in the Kutijin stan, Vrbica, Mali Stabanj and Begovača springs are probably the result of saturation with brackish water from the sediments surrounding their supply channels and not a direct intrusion of sea water into the channel systems. The most obvious impact of seawater can be seen in the Ošac-Modro jezero group of permanent springs, which have deeper supply channels compared to the other springs in the Field of Vrana. This makes seawater infiltration possible, and they are probably directly linked to the sea. It is possible that they are supplied from the area upstream from the flysch zone on the northeastern edge of the lake, through channels that formed below the flysch. The likely direction of the seawater infiltration into the Modro jezero spring and others is the area of the discontinuity in the second zone of the flysch, which is located in the hinterland of Biograd. In the current high sea-level conditions, the former springs function as places of concentrated seawater infiltration into the karst channel system deep below sea level (Fritz, 1984; Magaš, 1990; Stroj, 2012).

In the last decade, after the declaration of the Lake Vrana Nature Park (in 1999), the problem of high salinisation of the lake's water (based on elevated chlorides ascertained in measurements) during the dry months has been acknowledged. Salinisation is partly intensified by anthropogenic activities, and it constitutes a threat to the lake's ecological balance. The possibility of accumulating fresh water in the northwestern part of the lake by the construction of a barrier was considered by Fritz (1976). After the establishment of the Nature Park, this idea was abandoned. Salinisation of the lake is, to a lesser extent, a result of the inflow of brackish water from the springs in the Field of Vrana which are under the influence of seawater, and, to a greater extent, of the direct infiltration of seawater into the lake, based on chloride measurements in the springs and in the lake around the Prosika Canal. Seawater penetrates into the lake through the karstified carbonate ridge which separates the lake from the sea. Characteristics of the Jugovir spring confirm the connection between the lake and the sea through the karst channels in the area of Prosika. Seawater enters the lake through this spring in periods when the lake's water level drops below sea level. The permeable limestone ridge probably allows the sea's infiltration into most of the lake, except for the northwestern part where there are flysch and Quaternary deposits within a syncline structure. The artificial Prosika Canal (1770) in the southeastern part of the lake constitutes a surface connection between the lake and the sea. Until the construction of this canal, Vrana blato (wetland) covered the entire area north-



Sl. 4 Vranska močvara oko 1760. godine (arhiva Francesco Borelli, Venecija; preuzeto iz JU PP Vransko jezero 2010).

Fig. 4. Vrana marsh around 1760 (Francesco Borelli Archives, Venice; taken from JU PP Vransko jezero, 2010).

jem velikog poplavnog područja Vranskog polja. Kanal Prosika produbljivan je i proširivan (1895. i 1954. godine) radi što bržeg odvodnjavanja poljoprivrednih površina u Vranskom polju, a izgrađeni su odvodni kanali kroz cijelo Vransko polje. Danas je Prosika duga 800 m, široka 4 m i duboka 8 m. Na ušću je 2009. godine napravljen betonski prag čime je dno kanala smješteno na 0,8 m (bilo je na 0,35 m). Uz cestu Vrana – Pakoštane podignut je obrambeni nasip (1976.). Kad je razina vode u Vranskem jezeru visoka (u zimskom razdoblju dosegne više od 2 m iznad morske razine), voda iz njega istječe u more i sprječava se akumulacija slatke vode u jezeru iznad razine mora. Za vrijeme dugotrajnih sušnih razdoblja vodostaj u jezeru je niži i morska voda ulazi u jezero (Fritz, 1984; Magaš, 1990; Stroj, 2012).

Stalni monitoring vodostaja na području Vranskog jezera i njegovog sliva provodi se od 1926. g. na vodomjernoj postaji Pakoštanski most, s prekidima u vrijeme Drugog svjetskog rata, te na postaji Prosika jezero od 1948. g. Na slivnom području i na samom jezeru 80-ih i 90-ih godina prošlog stoljeća instalirano je 20 automatskih vodomjernih postaja. Stalno promatranje i arhiviranje podataka o vodostajima provodi se samo na vodomjerima Pakoštanski most, Prosika jezero i Prosika more. Na vodostaje, osim glavnih čimbenika (dotoka, otjecanja i isparavanja), bitno utječe odnos razine mora i jezera te morskih mijena i kolebanja morske razine. Kolebanje vodostaja Vranskog jezera iznosi 200 cm. Za promatrano razdoblje najniži vodostaj bio je 12 cm (0,03 m nm.) 1990. i 2008. godine, najviši 241 cm (2,24 m nm.) 1974. i 1994. godine, a srednji iznosi 0,81 m nm. (JU PP Vransko jezero, 2010).

Zaslanjenost izvora na području Vranskog polja koji su pod utjecajem mora, prodor mora kroz izvor Jugovir kod Prosike i duž cijelog karbonatnog grebena koïncidira s vremenom vrlo niskih vodostaja u Vranskom jezeru za vrijeme

west of Lake Vrana up to the Kakma and Kutijin stan springs (Fig. 4). This wetland was intersected by natural watercourses which flowed freely from the springs into Lake Vrana. By decision of Venetian Senate, Count Francesco Borelli obtained possession of the Vrana feud and began the revolutionary project of draining the Vrana wetland (JU PP Lake Vrana, 2010). Land reclamation began with the excavation of Prosika Canal in 1770. It was 4 m wide and with threshold much higher than today. This hydraulic engineering intervention resulted in a lowering of the lake's water level by 3 m, which dried the huge flooded area in the Field of Vrana. It was deepened and expanded (1895, 1954) for the rapid drainage of arable land in the Field of Vrana, and the construction of drainage canals also began throughout the Field of Vrana. Today, Prosika Canal is 800 m long, 4 m wide and 8 m deep. A concrete threshold was made at the mouth of the canal in 2009, which raised the bottom of the canal to 0.8 m (it was 0.35 m). Protective soil embankments were built along the Vrana-Pakoštane road (1976). When the level in Lake Vrana is high during the winter months (it reaches over 2 m above sea level), water flows out of the lake into the sea and prevents accumulation of fresh water in the lake above sea level. During the long dry periods, the water level in the lake is lower and sea water infiltrates the lake (Fritz, 1984; Magaš, 1990; Stroj, 2012).

Continuous monitoring of the water levels in the Lake Vrana and its catchment has been conducted since 1926 at the Pakoštanski most hydrological station, with interruptions during World War II, and at the Prosika/lake station from 1948. Twenty automated hydrological stations were installed in the catchment area and in the lake during the 1980s and 1990s. Continuous monitoring and archiving of data on water levels is done only at the Pakoštane bridge, Prosika/lake and Prosika/sea stations. With the exception of primary factors

dugotrajnih sušnih razdoblja. Za vrijeme niskog vodostaja u jezeru dolazi do prodora mora, povećanja saliniteta te primjetno brzih stradanja riba, pa čak i do privremenog formiranja morskih životnih zajednica u zaslanjenom dijelu jezera (Mrakovčić *et al.*, 2004). Pitanje je koliki je antropogeni utjecaj kroz prokopavanje kanala Prosike u zaslanjivanju jezera te je li on uzrokovao takve poremećaje ili je riječ o prirodnom procesu do kojeg bi svejedno dolazilo zbog izravne veze Vranskog jezera i mora preko okršenog karbonatnog grebena.

HIDROGEOLOŠKA OBILJEŽJA

Pakoštane su u širem smislu dio sliva Vranskog jezera i polja (Fritz, 1976.). Površina sliva Vranskog jezera i polja je 470 km², a podsliva Kotarka 131 km² prema (Fritz, 1976.). Podsliv Kotarka zauzima područje sjeverozapadnog dijela Vranskog polja, a prostire se do Zemunka, Galovca i Škabrnje. Prema jugoistoku zahvaća vapnenački greben Debeljak – Vrčevo.

Prema svojstvu vodopropusnosti na području sliva stijene su izdvojene u sljedeće osnovne kategorije: *propusne stijene, djelomično nepropusne stijene, djelomično propusne i nepropusne stijene te stijene naizmjeničnih svojstava*. Također je učinjena i podjela prema hidrogeološkim funkcijama stijena, a one su sljedeće: *potpuna hidrogeološka barijera, relativna barijera, nepotpuna "viseća" barijera te propusno područje*.

Propusne stijene – su vapnenačke stijene gornje krede (K₃) i eocena (E_{1,2}); u hidrogeološkom smislu to su stijene sa sekundarnom poroznošću (što je uvjetovano razlomljenošću, pojavama okršavanja, posebno uzduž rasjeda i pukotina). Imaju svojstvo velike vertikalne i horizontalne propusnosti, zbog čega je brza infiltracija oborina i brza horizontalna cirkulacija podzemnih voda. Ove stijene imaju hidrogeološku funkciju *propusnog područja*.

Djelomično nepropusne stijene – to su tanje uslojeni do pločasti, a dijelom i lokalno glinoviti foraminiferski vapnenici donjeg eocena (E_{1,2}) i pješčenjaci unutar kompleksa naslaga srednjoeocenskog fliša (E_{2,3}). U tanko pločastim glinovitim foraminferskim vapnencima vjerojatno je slabija mogućnost cirkulacije podzemnih voda, pa oni zajedno s naslagama fliša u krovini predstavljaju nepotpunu "viseću" hidrogeološku barijeru, a pješčenjaci, koji su prostorno ograničeni, razmerno su propusna sredina. Zbog toga što su ograničeni na jednom prostoru, imaju ograničenu hidrogeološku funkciju.

Djelomično propusne stijene – to su pločasti laporoviti vapnenci s foraminifera (E_{1,2}) i lokalno razlomljeni pločasti vapnenci gornje krede (K₃). Pločasti laporoviti vapnenci, u odnosu prema propusnim stijenama, usmjeravaju kretanje podzemnih voda prema jugozapadu i sprječavaju njihovo tečenje prema morskoj obali pa u konkretnom slučaju vrše funkciju *potpune podzemne hidrogeološke barijere*. Ovu tvrd-

(inflow, outflow, evaporation), water levels are significantly dependent upon the balance between the levels of the sea and the lake, and therefore also on tides and sea-level fluctuations. The water level of Lake Vrana fluctuates in a range of 200 cm. For the period in question, the lowest water level was 12 cm (0.03 m asl) in 1990 and 2008, while the highest was 241 cm (2.24 m asl) in 1974 and 1994, while the mean water level is 0.81 m abs (JU PP Lake Vrana, 2010).

Salinization of the springs in the Field of Vrana influenced by seawater, which comes through Jugovir spring near Prosika and along the carbonate ridge, coincides with the period of low levels in Lake Vrana during the long dry periods. The low water levels on the lake lead to seawater infiltration, which in turn increases salinity, starves fish, and even fosters the temporary formation of marine benthic communities in the saline part of the lake (Mrakovčić *et al.*, 2004). The question is the extent of the anthropogenic influence caused by excavation of the Prosika Canal, and the degree to which it causes salinization of the lake, hence creating these issues, or whether what is being observed is a natural process which would occur in any case due to the direct connection between Lake Vrana and the sea through the karstified carbonate ridge.

HYDROGEOLOGICAL CHARACTERISTICS

Pakoštane is broadly part of the catchment of Lake Vrana and the Field of Vrana (Fritz, 1976). The catchment surface of Lake Vrana is relatively large, 470 km², and the Kotarka sub-catchment in the northwestern part of the Field of Vrana, which extends toward Zemunk, Galovac and Škabrnja, is 131 km². To the southeast it includes the limestone ridge Debeljak – Vrčevo.

Based on water permeability capacity, the rock in the catchment is divided into the following categories: permeable rocks, partly impermeable rocks, partly permeable and impermeable rocks and rocks with alternating properties. Additionally, the division has been done according to the hydrogeological functions of the rocks: complete hydrogeological barrier, relative barrier, incomplete "hammock" barrier and permeable area.

Permeable rocks are upper Cretaceous (K₃) and Eocene (E_{1,2}) limestone rocks. In a hydrogeological sense, these are rocks with secondary porosity, which is due to fragmentation, karstification, especially along faults and fissures. They have the features of high vertical and horizontal permeability, which causes rapid rainfall infiltration and rapid horizontal circulation of groundwater. These rocks have the hydrogeological function of a permeable area.

Partly impermeable rocks are thin-layered to platy, and partly clayey foraminiferal limestones of the lower Eocene

nju podupire činjenica da na dijelu obale između Sukošana i Biograda nema priobalnih izvora slatke vode (Kapelj *et al.*, 1999). Uslojeni vapnenci gornje krede zbog male debljine i rasprostiranja imaju lokalni utjecaj, odnosno usmjeravaju kretanje podzemnih voda prema jugoistoku što im daje funkciju *lokalne podzemne hidrogeološke barijere*.

Nepropusne stijene – to su naslage srednjoeocenskog fliša ($E_{2,3}$). Ove stijene imaju različite hidrogeološke funkcije zbog različitog strukturnog položaja na terenu. U sjeveroistočnom dijelu sliva one čine relativnu "viseću" hidrogeološku barijeru jer ne zaližežu dovoljno duboko, a u rubnom području Vranskog polja, između Kakme i Tinjskog bunara, te sjeveroistočno od Debeljka one imaju funkciju *potpune podzemne hidrogeološke barijere*. Ove naslage u ovom dijelu usmjeravaju tok podzemne vode prema jugoistoku, tj. prema Turanjskom jezeru i dalje, prema Vranskom jezeru.

Stijene naizmjeničnih svojstava – to su klastične naslage (šljunci, pijesci, gline) promjenjivog litološkog sastava i hidrogeoloških svojstava. Utvrđeno je da je vodopropusnost prašinasto glinovitih naslaga u Vranskom polju vrlo mala i iznosi $1,8 \times 10^{-5}$ do $5,5 \times 10^{-8}$ cm/s (Kapelj *et. al.* 1999).

Tečenje podzemnih voda odvija se općenito smjerom pravca pružanja struktura, tj. od sjeverozapada prema jugoistoku kroz propusne, okršene i tektonski razlomljene vapnenačke stijene. No, tijekom detaljnog hidrogeološkog kartiranja (Kapelj *et. al.* 1999) uočeno je više poprečnih rasjeda generalnog pravca pružanja sjever-jug (sijeku teren na crti Donje Raštane – Galovac). S velikom se sigurnošću pretpostavlja da ovim smjerom podzemne vode iz propusnih naslaga ispod "viseće" barijere Zemuničkog polja teku prema bušenom zdencu Kutijin stan, izvoru Vrbica i prema Vranskom jezeru (Kapelj *et. al.* 1999).

PALEOOKOLIŠNA REKONSTRUKCIJA VRANSKOG JEZERA KOD BIOGRADA

Paleolimnološku rekonstrukciju Vranskog jezera načinila je Ilijanić (2014) na temelju datirane jezgre dužine 11 m (datirano je samo prvih 8 m jezgre) izdvojivši više intervala koji ukazuju na različite sedimentološke značajke i okoliše kroz koje je jezero prolazilo. Kronologija jezerskih sedimenata temeljila se na pet uzoraka slatkovodnih puževa, koji su korigirani na rezervoar efekt. Zona 1, vjerojatno je pleistocenske starosti, a zatim slijedi zona 2 ranog holocena raščlanjena u 3 intervala. U srednjem se holocenu razvilo jezero, podijeljeno na početnu duboku zonu, zatim prijelaznu, s postupnim utjecajem mora, i konačno zona 4 u kojoj su uspostavljeni uvjeti kakvi i danas vladaju u jezeru. Unutar zone 4 oblikovane su 4 podzone u kojima su se dogodile određene promjene. Zone su sljedeće:

($E_{1,2}$) and sandstones within complex of deposits of middle Eocene flysch ($E_{2,3}$). The possibility of groundwater circulation in thin platy clayey foraminiferal limestones is probably lower, and together with flysch deposits in the hanging wall they constitute an incomplete "hammock" hydrogeological barrier, while sandstones, which are spatially limited, are relatively permeable, and represent a limited hydrogeological function.

The partly permeable rocks are platy marl limestones with foraminiferas ($E_{1,2}$) and locally fragmented platy Upper Cretaceous (K_2^3) limestones. In relation to permeable rocks, platy marl limestones direct the movement of groundwater toward the southwest and prevent their flow towards the coast, and they act as a complete underground hydrogeological barrier. This is supported by the fact that on part of the shore between Sukošan and Biograd there are no coastal fresh water springs (Kapelj *et al.*, 1999). Upper Cretaceous bedded limestones, due to their minor thickness and distribution, have a local impact, and direct the movement of the groundwater to the southeast, which gives them the function of a local underground hydrogeological barrier.

The impermeable rocks are deposits of middle Eocene flysch ($E_{2,3}$). These rocks have different hydrogeological functions due to a different structural position in the terrain. In the northeastern part of the catchment, they represent a relative hydrogeological "hammock" barrier because they do not lie deep enough, while in the marginal part of the Field of Vrana between Kakma and the Tinj well and northeast from Debeljak, they function as a complete underground hydrogeological barrier. These deposits in this part direct the groundwater flow to the southeast, i.e., toward Turanjsko jezero and further to Lake Vrana.

Rocks with alternating properties are clastic deposits (gravel, sand, clays) of variable lithological composition and hydrogeological properties. It has been determined that the water permeability of silty clay sediments in the Field of Vrana are very small and 1.8×10^{-5} to 5.5×10^{-8} cm/s (Kapelj *et. al.*, 1999).

The groundwater flow occurs in the general direction of the structures, i.e., from northwest to southeast, through permeable, karstified and tectonically fragmented limestone rocks. However, during detailed hydrogeological mapping (Kapelj *et. al.*, 1999), more transverse faults in a general N-S direction (intersecting the terrain on the Donje Raštane-Galovac line) were observed. They assumed that this is the direction of groundwater flow from permeable sediments below the "hanging" hydrogeological barriers of Zemuničko polje to the drilled well at Kutijin stan, Vrbica spring and toward Lake Vrana (Kapelj *et. al.*, 1999).

Zona 1 (1101-1050 cm);

Zona 2:

2/1 (1050-940 cm);

2/2 (940-895 cm);

2/3 (895-813 cm);

Zona 3:

3/1 (813-505 cm; 8,1- 5,2 ka cal BP);

3/2 (505-265 cm; 5,2-2,8 ka cal BP);

Zona 4:

4/1 (265-155 cm; 2,8-1,9 ka cal BP);

4/2 (155-13 cm; 1,9-0,1 ka cal BP);

4/3 (13-6 cm; 0,1-0,03 ka cal BP);

4/4 (6-0 cm; 0,03-0 ka cal BP).

Zonu 1 1101-1050 cm obilježavaju visok magnetski susceptibilitet i povišene koncentracije Al i Fe, što označava povišenje erozije. U tom su intervalu uočeni veći klasti u glinovitom matriksu, zaobljeni, veličine 0,3-1,5 cm, posebno u intervalu 1069-1085 cm. Pronađeno je i sitno korijenje i dijelovi biljaka. Takva pojava krupnih čestica mogla bi se objasniti donosom materijala bujičnim tokovima. Pri kraju intervala u uzorcima 1060-1045 cm ima više biljnih ostataka i viši je TOC, kao i odnos C/N (>24) koji ukazuje na terestičko porijeklo organske tvari. Pelud u ovoj zoni upućuje na hladniju i vlažniju klimu, s pojačanim donosom materijala bujičnim tokovima, uslijed čega je moglo doći do nastanka lokvi.

U zoni 2/1 (1050-940 cm) nastavili su se slični uvjeti, s pojavom valutica (veličine do 1,5 cm) u više nepravilnih intervala (985, 990, 1000, 999-1012 i 1015 cm), u kojima se izmjenjuju siltni i glinoviti matriks. Pronađeni su biljni ostaci te je u njima viši postotak TOC-a, visok je C/N, što upućuje na kratke intervale većeg donosa alohtone organske tvari. Pri kraju ovog razdoblja sediment je pjeskovitiji. I dalje je razvijen okoliš poplavne ravnice (lokve).

U zoni 2/2 (940-895 cm) povisuje se udio siliciklastičnog materijala i magnetski susceptibilitet. Unutar zone 10,5-10,2 ka BP (940-910 cm) pojavljuje se tamnozeleni glinoviti sediment. U intervalima 940 - 933 cm i 920-900 cm ispremiješan je s klastima 0,2-3 cm i sivkastim i žučkastim proslojcima. Sastav minerala glina u ovim sedimentima isti je kao i u prethodnoj zoni. Od 905 do 895 cm sediment je tamniji. Povremeno se pojavljuju i ljuštture, jedna od njih je datirana (897 cm), ali je pokazala premalu starost. Očito je u ovom intervalu došlo do velikih promjena, pretaložavanja sedimenta i donosa materijala bujicama u povremeno formirane lokve (Sl. 5). Pojava peluda lopoča ukazuje na mogući porast nivoa vode.

PALEOENVIRONMENTAL RECONSTRUCTION OF LAKE VRANA NEAR BIOGRAD

A paleolimnological reconstruction of the Lake Vrana near Biograd was done by Ilijanić (2014) based on the dated sediment core over a length of 11 m (only 8 m of the core was dated), divided into several intervals that indicate different sedimentological deposits and environments over the lake's history. Chronology of the lake sediment sequence was based on five radiocarbon dates on freshwater shells, corrected for hardwater reservoir effect. Zone 1 is probably of Late Pleistocene age, while zone 2 is then early Holocene and divided into three intervals. Zones 1 and 2 are characterized by a higher content of siliciclastic detrital materials which indicate intensive erosion from the catchment and thus a flood plain environment in Lake Vrana, similar to karst poljes. In the middle Holocene, zone 3, the lake was formed, and divided into two intervals with very high carbonate content, the latter showing a gradual increase of marine influence. The present conditions in Lake Vrana were established in the late Holocene, zone 4. The zones are as follows:

Zone 1 (1101-1050 cm);

Zone 2:

2/1 (1050-940 cm);

2/2 (940-895 cm);

2/3 (895-813 cm);

Zone 3:

3/1 (813-505 cm; 8.1-5.2 ka cal BP);

3/2 (505-265 cm; 5.2-2.8 ka cal BP);

Zone 4:

4/1 (265-155 cm; 2.8-1.9 ka cal BP);

4/2 (155-13 cm; 1.9-0.1 ka cal BP);

4/3 (13-6 cm; 0.1-0,03 ka cal BP);

4/4 (6-0 cm; 0.03-0 ka cal BP).

Zone 1 from 1101 to 1050 cm is characterized by high magnetic susceptibility and higher concentrations of Al and Fe, which indicates intensive erosion. In this interval, larger clasts (0.3 to 1.5 cm in size) in the clayey matrix may be observed, especially in the interval between 1069 and 1085 cm. There are also small roots and plant remains present. The appearance of larger clasts could be explained by the high runoff and high water stream flows. At the end of the interval, in the samples from 1060 to 1045 cm, there are considerable plant remains, the TOC is high and C/N ratio (>24), which indicates the terrestrial origin of organic matter in the lake. The pollen in this zone indicate a cooler and wetter climate, with increased runoff and input of the material with strong flow streams, and the occasional formation of pools.

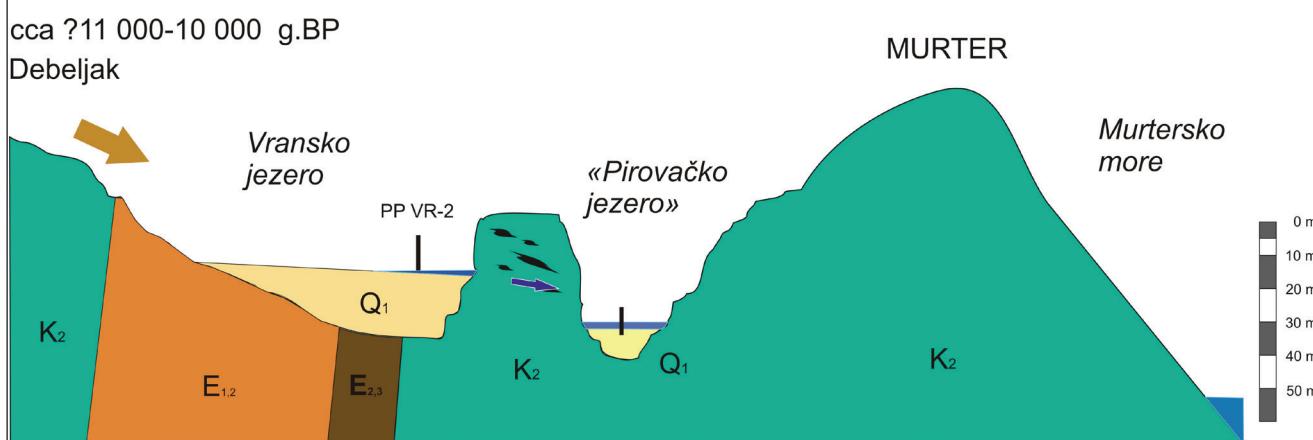
U zoni 2/3 (895-813 cm; to 8,1 ka cal BP) sediment je vrlo svijetao u razini 895-874 cm, kad dolazi do prekida cijevi jezgre, a na početku sljedeće cijevi pojavljuju se vrlo tamni sedimenti. Moguće je da ovdje nedostaje sedimenta. U tom svjetlom sedimentu izrazito je visok magnetski susceptibilitet (882-880 cm) koji je moguć ili zbog prisutnosti tefre ili zbog razvoja biogenog magnetita u anoksičnim uvjetima. Sedimenti su u dijelu 860-813 cm tamni te su utvrđeni reduktivni uvjeti pomoću omjera Mn/Fe, a ujedno je i visok udio TOC-a. Unutar sedimenta više se ne pojavljuju klasti što bi moglo značiti da se razvila mirnija sredina taloženja kao što je bara/močvara. Prisutan je viši udio kalcita i manji udio kvarca nego u prethodnoj jezri, uz pojavu aragonita pri prijelazu u svjetlijem sediment gdje je prisutno mnoštvo razlomljenih ljuštura (815-810 cm). Ljuštura su prisutne i kroz cijeli interval, ali sitne i razlomljene. Od 817 do 813 cm lećasto se pojavljuje šljunak s glinovitim tamnim sedimentom, koji je mogla prenijeti samo veća snaga vode kao što je bujični tok.

Cijeli ovaj period, vjerojatno kasnog pleistocena/ranog holocena mogao bi se opisati kao vrlo dinamičan u razvoju Vranskog jezera. Prevladavao je fluvijalni okoliš s formiranim vodotocima koji su skupljali vodu iz okolnih izvora. Istjecanje vode onemogućavalo je razvoj pravog jezera. Voda je mogla istjecati kroz vapnenački greben u području Prosike ili područja između dvije flišne barijere sjeverno od Biograda, isto kako se danas vidi utjecaj prodora mora u tim područjima (Stroj 2012). Niska razina mora u tom periodu bila je glavni razlog tog otjecanja. Na kraju mlađeg drijasa i početkom holocena (11,7 ka BP) razina mora bila je oko 65 m niža nego danas, a prije 11 ka BP oko 45 m niža nego danas. Rast od oko 20 m morske razine zbio se u vrijeme drugog naglog otapanja ledenjaka koji je uzrokovao puls MWP-1b. Dakle, očito je taj period obilježen velikom količinom vode koja je dolazila u depresiju Vranskog jezera i nije se mogla akumulirati sve dok se nije izdigla morska razina. No mogući su se-

Similar conditions continued in zone 2/1 (1050-940 cm), with the appearance of clasts (up to 1.5 cm in size) in several irregular intervals (985, 990, 1000, 999-1012 and 1015 cm), in an alternating silty and clayey matrix. Also, plant remains are present, and the high TOC and C/N ratio indicates short intervals of the higher input of the allochthonous organic matter. At the end of this period, the sediment became sandy. The floodplain environment still developed, with the occasional formation of pools (Fig. 5).

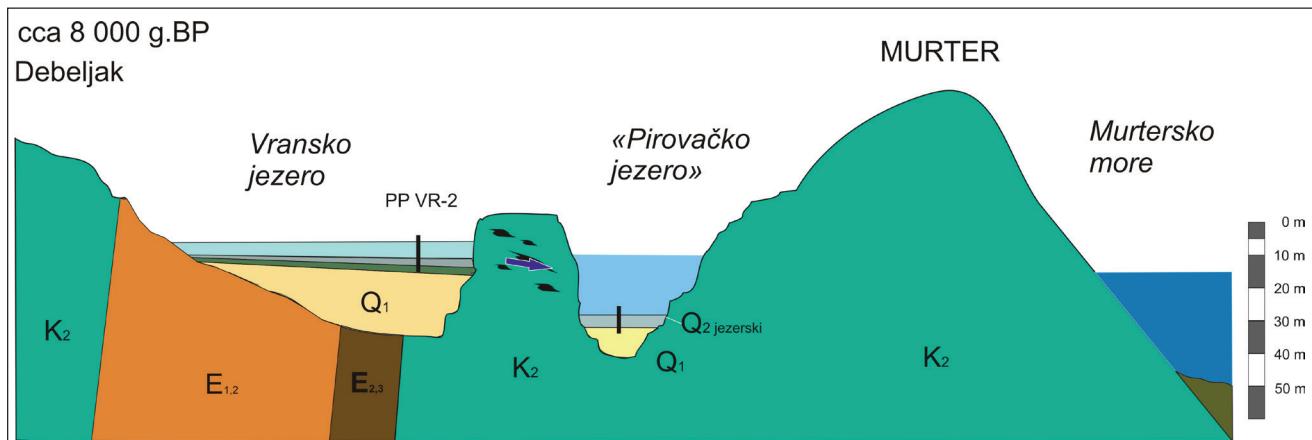
In zone 2/2 (940-895 cm), the content of the siliciclastic material increases and magnetic susceptibility is higher. Dark green bluish clayey sediment is evident in the interval between 940 and 910 cm, but it also contains large clasts (from 0.2 to 3 cm in size), in the intervals at 940-933 cm and 920-900 cm, which could be transported to the lake only by the high-energy water and erosion. The composition of clay minerals in these sediments is the same as in the previous zone, dominated by smectite, followed by illite and kaolinite. From 905 to 895 cm the sediment is darker in color. Shell fragments are occasionally present, and one was dated at 897 cm, which proved erroneous. It is evident that this interval experienced significant changes, maybe even redeposition of the sediments by streams in occasionally formed ponds (Fig. 5). The appearance of the lily pollen here indicates a possible rise in the water level.

In zone 2/3 (895-813 cm; to 8.1 ka cal BP), the sediment experienced a change in color at the end of this zone when it became very dark, almost black. It is possible that the sediment is missing here. In the upper part of the zone, from 882-880 cm, there is very high magnetic susceptibility, which could be due to the presence of volcanic material, tephra, or the formation of biogenic magnetite in an anoxic environment. From 860 to 813 cm, the sediment is darker, almost black, and reductive conditions were evidenced by the Mn/Fe ratio, and the TOC is higher than in the previous zone.



Sl. 5 Rekonstrukcija Vranskog jezera kod Biograda za razdoblje između 11000 i 10000 g. BP; Vransko jezero egzistira kao vodotok u kojem se povremeno nakuplja voda i formira lokve.

Fig. 5. Reconstruction of Lake Vrana near Biograd in the Early Holocene; Lake Vrana existed as a floodplain with streams and the occasional formation of ponds.



Sl. 6 Rekonstrukcija Vranskog jezera kod Biograda za razdoblje oko 8000 g. BP; Vransko jezero formira se zbog sprječavanja otjecanja vode u Pirovački zaljev („jezero“) koje se napunilo vodom uslijed uzdizanja morske razine.

Fig. 6. Reconstruction of Lake Vrana near Biograd in the period ca. 8,000 years BP; Lake Vrana is formed as a result of blocked water outflow into Pirovac Bay ('Lake'), which was filled with water due to sea-level rise.

zonski periodi veće akumulacije vode ako je ona dotjerala. Ponori u vapnenačkom grebenu nisu mogli odvoditi svu vodu, te su se mogli razviti i barski, močvarni uvjeti. Vlažni-ji uvjeti dokazani su taloženjem sapropela 1 (S1a) u Jadrans- kom moru, evidentirano u periodu 10,8-8,8 ka BP (Ariztegui *et al.* 2000). Tamni sedimenti i utvrđeni reduktivni uvjeti od 9,6-9,1 ka BP mogli bi ukazivati na sapropel. Povećana vlažnost tijekom ranog holocena odgovara povećanom dono- su materijala uslijed erozije siliciklastičnog materijala u Vranskom jezeru. Vlažna razdoblja u ranom holocenu, prije 9 ka, utvrđeni su u jezerima sjeverno od 40° sjeverne geografske širine – Accesa i Ledro (Magny *et al.* 2013).

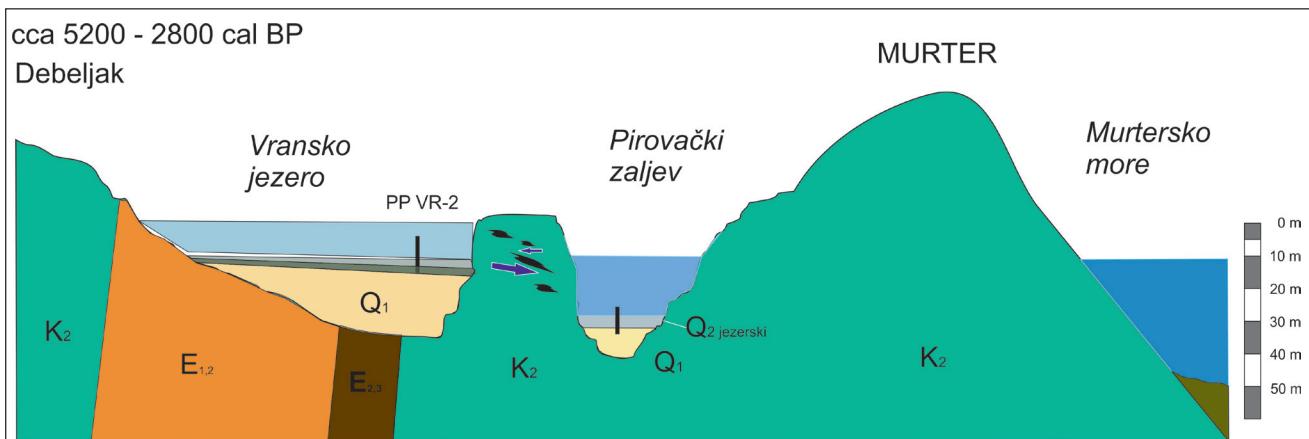
U zoni 3/1 (813-485 cm; 8,1-5,2 ka cal BP), (Sl. 6) započinje povećanjem udjela Ca i kalcita u jezgri koji prevladava te nema kvarca u sedimentima, nizak je Al i ostali litogeni elementi. Dominantna karbonatna sedimentacija omogućena je razvojem stabilnog dubljeg jezera. Unutar sedimenta uočavaju se ljuštture i ostaci biljaka te izmjene pjeskovitih i glinovitih proslojaka u nepravilnim lećastim laminama. Omjer C/N viši je u prvom dijelu intervala 8,1-6,3 ka cal BP, a niži je 6,3-5,2 ka cal BP, što ukazuje na povećanje organske tvari iz fitoplanktona. Palinološkom analizom u ovoj je zoni određena listopadna šuma bukve.

Viša razina mora u ovom periodu sprječavala je istjecanje jezerske vode u Pirovački zaljev, u kojem je u to doba vjerojatno postojalo jezero (Ilijanić *et al.* 2013). U Pirovačkom zaljevu su na 528. cm (starost oko 11500 cal BP) utvrđeni sedimenti s tipičnom slatkovodnom ostrakodnom faunom, što ukazuje na postojanje jezera do oko 7,5 ka BP, kada je utvrđena lagano bočata, više slatkovodna fauna s tipičnom marinskom faunom (na 248. cm).

U zoni 3/2 (505-265 cm; 5,2-2,8 ka cal BP), (Sl. 7) postupno se povećava utjecaj mora, što se uočava u povišenim koncentracijama. Razina mora je prije oko 5000 godina bila 5 m niža nego danas. Na početku ovog intervala nadmorska visi-

Within the sediment, there are no clasts, which means that the calm depositional environment developed, like a pond/wetland. There is a higher content of calcite and lower content of quartz than in the previous zone, with the appearance of biogenic aragonite in the transition into the lighter sediment where there are many broken shell fragments (815-810 cm). Shells are present in the whole interval but are small and fragmented. From 817 to 813 cm, the lenses of gravel appear within the clayey dark sediment, which could be transported by high-energy water flow, like a stream.

This entire period from 1050 to 813 cm (probably Late Pleistocene to Early Holocene) could be described as very dynamic in the development of Lake Vrana. A fluvial environment predominated, with formed stream water flows that collected water from the surrounding springs. The water runoff prevented the formation of a permanent lake. The water outflow was possible through the limestone ridge in the area of Prosika or between the two flysch barriers north of Biograd – the areas where the impact of seawater on the springs is visible in recent times (Stroj, 2012). The low sea level in this period was the main reason for the runoff. At the end of the Younger Dryas and the beginning of the Holocene (11.7 ka BP), the sea level was approximately 65 m lower than today. The rise of the sea level by about 20 m was caused by the second rapid glacial thaw, known as MWP-1b (*Melt Water Pulse 1b*). It is assumed that this period was characterized by a large amount of water that entered the Lake Vrana depression, but which could not accumulate until the sea level rose. Additionally, water could accumulate during the seasonal periods of higher water inflow when the limestone ridge could not drain all the water and raise the water level, and this could cause the formation of pools, ponds or wetland environments. Wetter periods are evident in the Adriatic Sea, the central Mediterranean, during the deposition of sapropel 1 (S1a) in the 10.8-8.8 ka cal BP period (Ariztegui *et al.*, 2000).



Sl. 7 Rekonstrukcija Vranskog jezera kod Biograda za razdoblje između 6100 i 3800 g. BP; sve veći utjecaj mora na Vransko jezero.

Fig. 7. Reconstruction of Lake Vrana near Biograd in the period between 5,200 and 2,800 years BP; increasing influence of seawater on Lake Vrana.

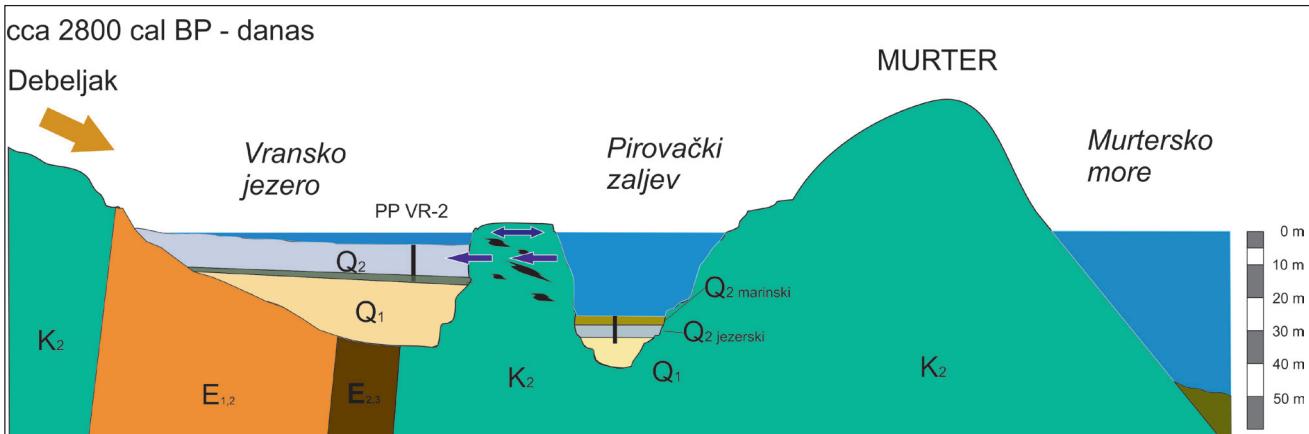
na dna jezera bila je -10/-11 m. To znači da je razina mora bila na višoj nadmorskoj razini (-5 m nm.) nego dno jezera (-10/11 m nm.). Na taj je način morska voda mogla prodirati u jezero kroz okršeni karbonatni greben u predjelu Prosike.

Palinološkom analizom u ovoj je zoni utvrđena sredozemna vegetacija šume hrasta crnike i degradacijskih stadija crnokine šume (makija). Postupno povišenje siliciklastičnog materijala u sedimentima moguće je zbog deforestacije. Nagla klimatska promjena u vlažnosti, s povišenjem razine jezera, utvrđena je u jezerima sjeverno od oko 40° sjeverne geografske širine, poslije 4 500 cal BP (jezera Accesa, Ledro; Magny *et al.* 2013).

Zona 4/1 (265-155 cm; 2,8-1,9 ka cal BP) jest zona kojoj su ustavljeni uvjeti kakvi su i danas prisutni u jezeru, sa sezonskim varijacijama više i manje brakičnih uvjeta. Talože se sve sitnije čestice, od oko 220 cm počinju se taložiti minerali prosječne veličine zrna oko 10 µm, s povremenim krupnjim česticama (oko 30 µm). Prisutni su ponajviše kalcit, zatim aragonit, a pri kraju intervala ima i kvarca.

Darker sediments and reductive conditions were ascertained in the sediments from 860 to 813 cm, which could indicate sapropel deposition. Increased humidity during the early Holocene corresponds to the increased input of the siliciclastic material due to intensive erosion into Lake Vrana. Wet periods are evident in early Holocene in lakes north of 40° N altitude, Lake Accesa and Lake Ledro (Magny *et al.*, 2013).

In zone 3/1 (813-485 cm; 8,1-5,2 ka cal BP), (Fig. 6), begins with increasing Ca and calcite share in the prevailing core and no sedimentary quartz, low Al and other lithogenic elements. The dominant carbonate sedimentation is enabled by the development of the permanent lake. The sediment is described as carbonate silt, laminated calcareous silts with sandy lenses, containing numerous mollusk shells and plant remains. The C/N ratio is higher at the beginning of the zone from 8.1-6.3 ka cal BP, while it is lower from 6.3-5.2 ka cal BP, which indicates the gradual increase of organic matter from phytoplankton. Pollen analysis showed that the dominant vegetation was deciduous beech forest. The present lake water conditions (alternating with seasonal changes in salinity,



Sl. 8 Rekonstrukcija Vranskog jezera kod Biograda za razdoblje od 3800 g. BP do danas; uspostavljen je današnji režim Vranskog jezera, sa sezonskim fluktuacijama u izmjeni više i manje brakičnih uvjeta.

Fig. 8. Reconstruction of Lake Vrana near Biograd in the period from 2,800 to today; present conditions in Lake Vrana are established, with seasonal fluctuations in more and less brackish environments.

U zoni 4/2 (155-13 cm; 1,9-0,1 ka cal BP), (Sl. 8) talože se još sitnije čestice ($<5\text{ }\mu\text{m}$), sediment je homogen i ne sadrži lamine i takav karbonat se naziva masivni karbonat (Alonso-Zarza, Tanner 2010), s taloženjem karbonatnog mulja, kalcita i aragonita.

U zoni 4/3 (13-6 cm; 0,1-0,03 ka cal BP) naglo se povećava udio pjeskovite frakcije, a prosječna veličina čestica iznosi $229\text{ }\mu\text{m}$. Ovaj period vremenski odgovara pojmačanim olujnim i hladnim uvjetima malog ledenog doba (LIA, 400-100 BP; 1550-1850 AD). No za Vransko jezero veže se promjena razine jezera nakon što je izgrađen kanal Prosika za odvodnju viška vode iz Vranskog polja. Kao što je rečeno, kanal Prosika izgrađen je 1770. godine i time se razina vode Vranskog jezera snizila za 3 m. U tom razdoblju zasigurno je došlo do miješanja sedimenata i donošenja materijala iz drugih dijelova jezera. Taloženje takvog resuspendiranog pjeskovitog materijala može se pripisati tom zahvatu.

U zoni 4/4 (6-0 cm; 0,03-0 ka cal BP) vratili su se uvjeti kakvi su vladali prije prethodne promjene, niži je udio Ca, povišeni su Al i Fe te u sedimentu ima više kvarca i muskovita/illita te aragonita.

freshwater-brackish) were established in zone 4/1 (265-155 cm; 2.8-1.9 ka cal BP). Dominant carbonate sedimentation is characterized by finer particles and, from 220 cm, minerals with an average grain size of about $10\text{ }\mu\text{m}$ began to accumulate, with occasional larger particles (about $30\text{ }\mu\text{m}$). Calcite is the dominant mineral phase, with small amounts of aragonite, and quartz at the end of the zone.

In zone 4/2 (155-13 cm; 1.9-0.1 ka cal BP), (Fig. 8), smaller particles are deposited ($<5\text{ }\mu\text{m}$). The sediment is homogeneous, bioturbated, without lamination, and constitutes massive carbonates (Alonso-Zarza, Tanner, 2010), with deposition of carbonate silt, calcite and aragonite.

In zone 4/3 (13-6 cm; 0.1-0.03 ka cal BP), there is a sudden increase in the sand fraction, and the average particle size is $229\text{ }\mu\text{m}$. This period could correspond to the cold conditions of the Little Ice Age (LIA, 400-100 BP; 1550-1850 AD). Additionally, this sandy layer could be related to the construction of Prosika Canal in 1770 AD for the drainage of the wetlands in the Field of Vrana, which caused the lowering of Lake Vrana's level by approximately 3 m. In this period, sediments and materials from other parts of the lake have been mixed. Placing of such resuspended sand material can be attributed to this intervention.

In zone 4/4 (6-0 cm, 0.03-0 with cal BP), the conditions that preceded the previous change returned, Ca was lower, Al and Fe increased, and in the sediment there are more quartz and muscovite / illite and aragonite.

LITERATURA/ REFERENCES

- Alonso-Zarza, A. M., Tanner, L. H., 2010. *Carbonates in Continental Settings: Facies, Environments and Processes*, [Developments in Sedimentology 61]. Elsevier, Amsterdam.
- Ariztegui, D., Asioli, A., Lowe, J. J., Trincardi, F., Vigliotti, L., Tamburini, F., 2000. Palaeoclimatic reconstructions and formation of sapropel S1: inferences from Late Quaternary lacustrine and marine sequences in the Central Mediterranean region. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* 158, 215–240.
- Fritz, F., 1976. *Ravni kotari-Bukovica, hidrogeološka studija*. Fond str. doc. IGI, br.112/76, Zagreb.
- Fritz, F., 1984. Postanak i starost Vranskog jezera kod Biograda na Moru. *Geološki vjesnik* 37, 231-234.
- Herak, M., 1990. *Geologija*. Školska knjiga, Zagreb.
- Ilijanić, N., Miko, S., Hasan, O., 2013. *Paleolimnološka istraživanja Vranskog jezera kod Biograda – I. faza*. Fond stručne dokumentacije. Znanstvena studija br. 34/13. Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- JU (Javna ustanova) PP Vransko jezero, 2010. *Plan upravljanja Parkom prirode Vransko jezero*. Biograd na Moru.
- Kapelj, J., 2002. *Strukturni sklop šireg područja Promine u sjevernoj Dalmaciji i odraz na hidrogeološke odnose*, doktorski rad. Prirodoslovno-matematički fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Kapelj, J., Kapelj, S., Miko, S., Buljan, R., 1999. *Crpilište Turansko jezero kod Biograda na Moru. Hidrogeološki istražni radovi za prijedlog zona sanitарne zaštite*. Fond str. doc. IGI. br.125/99, Zagreb.
- Magaš, D., 1990. Osnovna geografska obilježja biograd-ske mikroregije. *Biogradski zbornik* 1, 39-84.
- Magny, M., Combourieu Nebout, N., de Beaulieu, J. L., Bout-Roumazeilles, V., Colombaroli, D., Desprat, S., Francke, A., Joannin, S., Peyron, O., Revel, M., Saduri, L., Siani, G., Sicre, M.A., Samartin, S., Simonneau, A., Tinner, W., Vanni`ere, B., Wagner, B., Zanchetta, G., Anselmetti, F., Brugia paglia, E., Chapron, E., Debret, M., Desmet, M., Didier, J., Essallami, L., Galop, D., Gilli, A., Haas, J. N., Kallel, N., Millet, L., Stock, A., Turon, J. L., Wirth, S., 2013. North-south palaeohydrological contrasts in the central Mediterranean during the Holocene: tentative synthesis and working hypotheses. *Climate of the Past* 9, 1901–1967.
- Majcen, Ž., Korolija, B., 1973. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tumač za list Zadar L33-139*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1967. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Majcen, Ž., Korolija, B., Sokač, B., Nikler, L., 1970. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100000. List Zadar L33-139*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1963-1969. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Mamužić, P., Nedela-Devide, D., 1968. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Biograd K33-7*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1963. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Mamužić, P., Nedela-Devide, D., 1973. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tumač za list Biograd K33-7*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1963. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Mamužić, P., 1971. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. List Šibenik K33-8*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1962-1965), *Savezni geološki zavod, Beograd*. Mamužić, P. 1975. *Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000. Tumač za list Šibenik K33-8*. Institut za geološka istraživanja, Zagreb, 1966. Savezni geološki zavod, Beograd.
- Marković-Marjanović, J., 1975. Lesni plato Pakoštana nedaleko od Vranskog jezera kod Biograda na Moru-severni Jadran. *Glasnik Prirodoslovnog muzeja u Beogradu*, Serija A, Knjiga 30, 221-233.
- Mrakovčić, M., Mišetić, S., Plenković-Moraj, A., Razlog Grilca, J., Mihaljević, Z., Čaleta, M., Mustafić, P., Kerovec, M., Pavlinić, I., Zanella, D., Buj, I., Brigić, A., Gligora, M., Kralj, K., 2004. *Kategorizacija i inventarizacija florističkih i faunističkih vrijednosti Parka prirode „Vransko jezero“*. Zoologiski zavod Biološkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Zagreb.
- Stroj, A., 2012. *Vransko jezero: Hidrogeološka istraživanja*. Fond stručne dokumentacije. Hrvatski geološki institut, Zagreb.