

# ODREĐIVANJE NOVIH PLIOCENSKIH, PLEISTOCENSKIH I HOLOCENSKIH LITOSTRATIGRAFSKIH JEDINICA U HRVATSKOM DIJELU JADRANA (PRIOBALJU)

## DEFINITION OF NEW PLIOCENE, PLEISTOCENE AND HOLOCENE LITOSTRATIGRAPHIC UNITS IN THE CROATIAN PART OF THE ADRIATIC SEA (SHALLOW OFFSHORE)

TOMISLAV MALVIĆ<sup>1,2</sup>, JOSIPA VELIĆ<sup>2</sup>, MARKO CVETKOVIĆ<sup>2</sup>,  
MARKO VEKIĆ<sup>3</sup>, MARIJAN ŠAPINA<sup>3</sup>

<sup>1</sup>INA-Industrija nafte d.d., Sektor za geologiju i inženjering / *INA-Oil Industry Plc. Reservoir Engineering and Field Development*

<sup>2</sup>Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo / *University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Department of Geology and Geological Engineering*

<sup>3</sup>Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zavod za geologiju i geološko inženjerstvo, studenti diplomskog smjera / *University of Zagreb, Faculty of Mining, Geology and Petroleum Engineering, Department of Geology and Geological Engineering, MA students*

Primljeno / *Received*: 2015-10-9

UDK: 551.7(497.5)(262.3)=163.42=111

Pregledni rad  
*Review*

U radu je prikazano istraživanje u podmorju Sjevernog Jadrana i priobalja Južne Dalmacije unutar naslaga pliocena, pleistocena i holocena. Njime su opisane postojeće litostratigrafske jedinice u taložinama rijeke Po u Hrvatskoj i određene takve jedinice u prostoru taloženja rijeke Neretve. Oba taložna prostora bila su pod utjecajem promjena razina mora, posebice tijekom kvartara, što se znatno odrazilo u smanjivanju dubine mora i povećanju površine kopna tijekom oledaba, posebice u Sjevernom Jadranu. U hrvatskom dijelu Padske depresije navedene su dvije formacije – Istra (pliocen) i Ivana (pleistocen, holocen). U formaciji Ivana opisana su tri člana, poimence Anamarija, Katarina i Izabela. Dalje prema jugu, u priobalju Južne Dalmacije, imenovana je nova formacija Neretvanski kanal (za taložine pliocena, pleistocena i holocena). Ona je zatim podijeljena u pijeske Neretva (koji mogu biti ekvivalent i cijele formacije) te član Malostonski zaljev (kvartarne starosti). Isključivo pliocenski tipski litotip nije opisan.

**Ključne riječi:** litostratigrafija, pliocen, pleistocen, holocen, Jadran, Hrvatska

Exploration of Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits in of the Croatian Northern Adriatic and Southern Dalmatia (coastline) offshore is presented in this paper. It was a way to describe the existing lithostratigraphic units in Croatian Po River sediments and to determine such units in the depositional area of Neretva River. Both systems have been influenced by sea-level fluctuations during the Quaternary, resulting in significantly decreased sea depths and increased subaerial exposure during glacial periods, especially in the Northern Adriatic. In the Croatian part of Po Depression, two new formations were mentioned – Istria (Pliocene) and Ivana (Pleistocene, Holocene). Three new lithostratigraphic members were described within Ivana Formation, namely Anamarija, Katarina and Izabela. Further south, in the Southern Dalmatia shallow offshore, Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits were named the new Neretva Channel Formation. This formation was further divided into Neretva Sands (sometimes equivalent for entire formation) and the (Quaternary) Mali Ston Bay Member. No typical Pliocene lithotype has yet been recognised.

**Keywords:** lithostratigraphy, Pliocene, Pleistocene, Holocene, Adriatic, Croatia.

## Uvod

Istraživano područje hrvatskoga priobalja približno prekriva veći dio Sjevernoga i mali dio Srednjega Jadrana. Povijest istraživanja jadranskog podmorja seže u sedamdesete godine prošloga stoljeća. Najstarije stijene u tom prostoru opisane su kao karbonski i permjski klastiti i karbonati, čije su litologije, taložni okoliši i fosilni sadržaj opisani u nekoliko radova na temelju izdanaka i bušotinskih podataka (npr. SOKAČ I DR., 1976.; ALJINOVIĆ, SREMAC, 1997.; SREMAC, 2005., 2012.; VELIĆ I DR., 2015.). Nedavno su opisane četiri megasekvencije unutar hrvatskoga Jadrana (VELIĆ I DR., 2015.): (1) preplatformska sukcesija od kasnoga karbona (srednji pensilvanijan: moskovijan) do rane jure (rani toarcij; formacije Brušane i Baške Oštarije); (2) platformska megasekvencija od rane jure do kasne krede (formacija Mali Alan); (3) paleogenska do neogenska postplatformska megasekvencija (formacija Raša); (4) neogenska do kvartarna (pliocensko-holocenska) megasekvencija (formacije Istra i Ivana).

Taložine pliocenske, pleistocenske i holocenske epohe nalaze se gotovo u pravilu diskordantno iznad starijih stijena. One su ujedno taložene u „suvremenom“ Jadranskom moru. Iako se nalaze uglavnom kontinuirano duž priobalja, njihova regionalna korelacija je vrlo teška, pa i nemoguća, jer su taložene unutar zasebnih delti, prodelta i estuarija koji su se tijekom geološke prošlosti pomicali, a povremeno bili i neaktivni. Stoga je nemogućnost korelacije izravna posljedica njihova maloga prostiranja te posljedično reducirane plitke bazenske, uglavnom pelitne, sedimentacije koja se odvijala u njihovoj okolini.

Značajan doprinos u postavljanju hrvatskih litostratigrafskih formacija taložina Sjevernoga Jadrana načinili su J. Velić i T. Malvić (2011.). Opisali su prostor s taložinama pliocena, pleistocena i holocena najveće debljine u hrvatskom podmorju, nastalim djelovanjem rijeke Po u prošlosti. Nakon toga ostala je potreba daljnje razrade tih formacija u Sjevernom Jadrana na članove, ali i primjene istih načela u određivanju litostratigrafskih jedinica unutar najvećega riječnog sustava na hrvatskoj obali, onoga rijeke Neretve. Rezultati istraživanja opisani su u ovome radu.

## Introduction

The studied area of the Adriatic Sea is located in the Republic of Croatia and roughly covers roughly most of the Northern Adria and a small part of the Middle Adria. A long history of offshore geological exploration dates back to the 1970s. The proven oldest rocks are Carboniferous and Permian clastics and carbonates, whose lithologies, depositional environments and fossils are described in several papers based on surface outcrops as well as in several deep offshore wells (e.g., SOKAČ ET AL., 1976; ALJINOVIĆ AND SREMAC, 1997; SREMAC, 2005, 2012; VELIĆ ET AL, 2015). Starting with Late Carboniferous four megasequences (VELIĆ ET AL., 2015) were identified as follows: (1) a pre-platform succession ranging in age from Late Carboniferous (Middle Pennsylvanian: Moscovian) to Early Jurassic (Early Toarcian; Brušane and Baške Ostarije Formations); (2) an Early Jurassic to Late Cretaceous platform megasequence (Mali Alan Formation); (3) a Paleogene to Neogene post-platform megasequence (Raša Formation); and (4) a Neogene to Quaternary (Pliocene to Holocene) megasequence (Istra and Ivana Formations).

Deposits of Pliocene, Pleistocene and Holocene epochs lie unconformably over these rocks in many places. The latter were formed in the geologically contemporary Adriatic Sea area. Although these sediments are found continuously along the most of the Croatian shallow offshore, their correlation in some deltas, prodeltas and estuaries is problematic due to temporary movement and inactivity of such environments. This is the foremost characteristic of the smaller estuaries where only reduced (shallow) basin pelitic sedimentation could be described.

Significant work was done by J. Velić and T. Malvić, (2011) in defining Croatian lithostratigraphic formations in the Northern Adriatic deposits. These are the thickest deposits, due to the significant sediment input by palaeo-Po River. However, there was a need to finish the task, including the same approach for the largest river system on the Croatian coast —Neretva River. The results are given in this paper.

## Zemljopisni smještaj istraživanog područja

Istraženo područje hrvatskoga priobalja u ovome radu prikazano je na slici 1. Istražene su najmlađe taložine istočnoga dijela Padske depresije te dio priobalja Južne Dalmacije u području djelovanja delte i prodelte rijeke Neretve.

Jadransko more zatvoreno je, epikontinentalno more. Dio je Sredozemnoga mora. Nastalo je u miocenu (prije oko pet milijun godina), a svoj današnji oblik približno je poprimilo nakon flandrijske transgresije (COLANTONI I DR., 1979.; FAIRBANKS, 1989.; STANLEY, 1995.). Danas se smatra predgorskim bazenom smještenim između Alpi, Dinarida i Apenina (npr. D'ARGENIO, HORVATH, 1984.; MINISINI I DR., 2006.), te prekriva dio Jadranskog bazena koji još uključuje i kopneni dio Padske depresije. Bazen se razvio iznad Jadranske mikroploče okružen navedenim gorjima (npr. ANDERSON, JACKSON, 1987.; CHANNELL, HORVÁT, 1994.; WARD, 1994.; NOCQUET, CALAIS, 2003.).

Podijeljen je u zasebne depresije. Tri su oblikovane u miocenu: Dugotočna, Južnojadransko-albanska i Moliška (Sl. 1.). U pliocenu je stvoreno još njih šest: Venecijanska, Padska, Marche-Abruzzi, Srednjojadranska, Bradano i Jadransko-jonska (Sl. 1.). U Hrvatskoj se nalaze Dugotočna, najistočniji dio Padske, Srednjojadranska te sjeverni dio Južnojadransko-albanske depresije (PRELOGOVIĆ, KRANJEC, 1983.).

Taložine u njima naliježu preko karbonatne podine koja pripada Jadranskoj ili Apulijskoj karbonatnoj platformi (Sl. 1.). U Hrvatskoj su ti karbonati dio Jadranske karbonatne platforme (koja je postojala od donje jure do kraja krede). Ime platforme ušlo je u opću uporabu nakon 2. međunarodnog simpozija o Jadranskoj karbonatnoj platformi (*Some aspects of the shallow...*, 1991.), na kojem su izneseni brojni rezultati istraživanja koji su poduprli njezino postojanje (npr. POLŠAK, 1965., 1981.; JELASKA, 1973.; TIŠLJAR, 1983.; OGORELEC, 1987.; VELIĆ I DR., 1987.; BUSER, 1989.; GUŠIĆ I JELASKA, 1990.; DRAGIČEVIĆ I VELIĆ, 1994.; TIŠLJAR I DR., 2002.; VLAHOVIĆ I DR., 2005.).

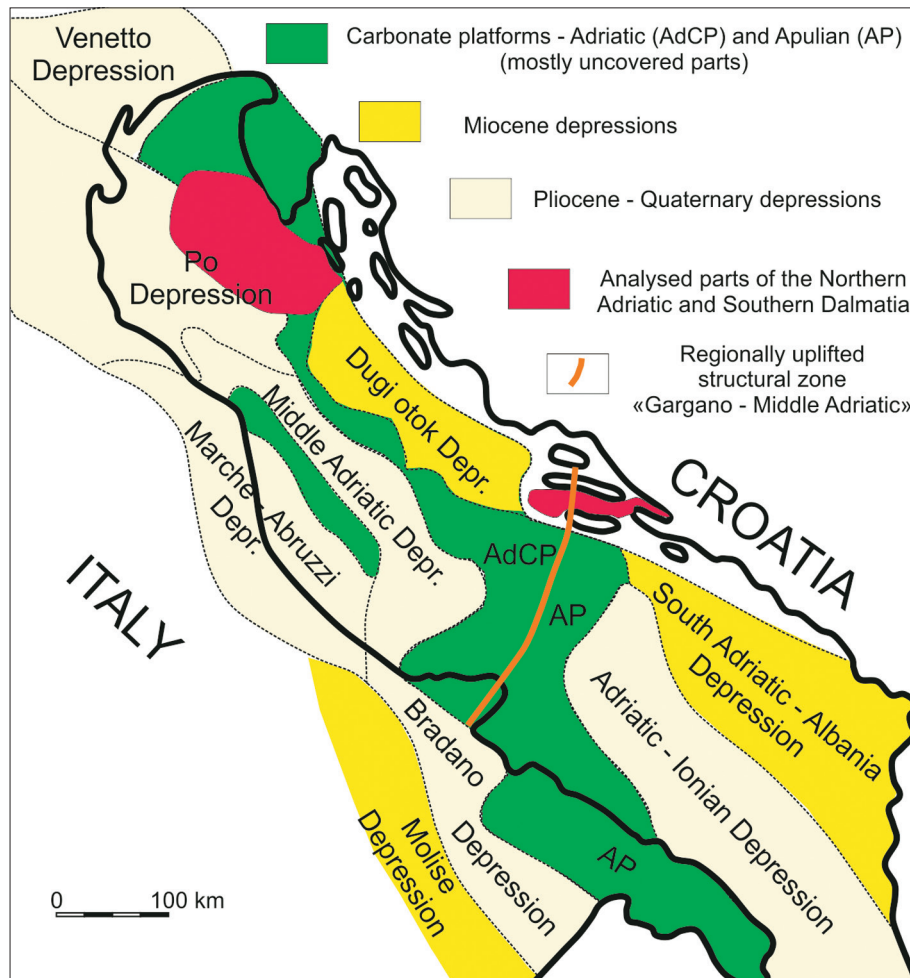
## Geographical location of the explored area

The youngest sediments in the eastern region of Po Depression and area lying off Neretva delta in the Southern Dalmatia (shown in red in Figure 1) were explored. Both areas belong to shallow Croatian offshore.

The Adriatic Sea is a closed, epicontinental part of the Mediterranean Sea. It was formed in the late Miocene (5 Ma); its present-day margins formed approximately after the Flandrian transgression (COLANTONI ET AL., 1979; FAIRBANKS, 1989; STANLEY, 1995) and today represent a foreland area among the Southern Alps, the Dinarides and the Apennines (e.g., D'ARGENIO, HORVATH, 1984; MINISINI ET AL., 2006). Today the Adriatic Sea covers part of the Adriatic Basin, which also includes the inland region of Po Depression. The Adriatic Basin overlies the deep basement formed by the Adriatic Microplate, and is surrounded by said mountain ranges (e.g., ANDERSON, JACKSON, 1987; CHANNELL AND HORVÁT, 1994; WARD, 1994; NOCQUET AND CALAIS, 2003).

The basin has been divided into discrete depressions separated by palaeogeographic borders. There were three depressions formed in the Miocene: Dugi otok, Southern Adriatic-Albania, and Molise Depressions (Fig. 1). Later, in the Pliocene the Veneto, Po, Marche-Abruzzi, Middle Adriatic, Bradano and Adriatic-Ionian Depressions started to form (Fig. 1). Dugi otok Depression is located in the Croatian part of the Adriatic Sea as well as the easternmost parts of Po and the Middle Adriatic Depressions, and the northern part of the South Adriatic – Albanian Depression (PRELOGOVIĆ, KRANJEC, 1983).

Deposits that filled the depressions above overlie a carbonate basement that belongs to Adriatic and Apulian Carbonate Platforms (Fig. 1). Carbonates in Croatia mostly belong to the Adriatic Carbonate Platform (from the Lower Jurassic to end of the Cretaceous), term highly adopted after the 2nd International Symposium on the Adriatic Carbonate Platform (*Some aspects of the shallow...*, 1991), where the results from numerous previous researches that supported such paradigm were elaborated (e.g. POLŠAK, 1965, 1981; JELASKA, 1973; TIŠLJAR, 1983; OGORELEC, 1987; VELIĆ ET AL., 1987; BUSER, 1989; GUŠIĆ, JELASKA, 1990; DRAGIČEVIĆ, VELIĆ, 1994; TIŠLJAR ET AL., 2002; VLAHOVIĆ ET AL., 2005).



Slika 1. Miocenske i pliocensko-pleistocensko-holocenske naslage Jadranskog bazena  
Izvor: prema VELIĆ, MALVIĆ, 2011.

Figure 1 Miocene and Pliocene–Pleistocene–Holocene depressions in the Adriatic Basin  
Source: according to VELIĆ, MALVIĆ, 2011

Cijela karbonatna sekvencija hrvatskih krških Dinarida može dostići 8000 metara (TIŠLJAR I DR., 2002.; VELIĆ I DR., 2002.). Starost toga karbonatnog slijeda kreće se od srednjeg perma do eocena (VELIĆ I DR., 2002.). Dugo vremena cijeli taj niz litostratigrafski vodio se kao formacija Dinaridi, posebno kod istraživanja ugljikovodika, što je očito predstavljalo pogrešno pojednostavljenje. Tako heterogena i debela sekvencija mora imati sva svojstva jedinice razine grupe ili supergrupe ili, pak, treba biti pažljivo podijeljena u više formacija. Rezultati takvoga zadatka nedavno su objavljeni u VELIĆ I DR. (2015.), gdje su uvedene nove formacije Brušane, Baške Oštarije i Mali Alan, koje su zamijenile formaciju Dinaridi. Također je kenozojska formacija Susak u Sjevernom Jadranu ponovno opisana i preimenovana u formacije Raša, Istra i Ivana.

The entire carbonate sequences in Croatian Karst Dinarides can reach up to 8000 m (TIŠLJAR ET AL. 2002; VELIĆ ET AL. 2002). The whole carbonate stratigraphic interval ranges from the Middle Permian to the Eocene (VELIĆ ET AL., 2002), and although was long time was referred to as Dinaridi Formation, especially in petroleum exploration, it is obviously used by mistake. Such heterogeneity and thick sequence has all the properties of lithostratigraphic group or even supergroup, or need to be carefully divided into more formations. This task has recently been published in VELIĆ ET AL. (2015), introducing new Brušane, Baške Oštarije and Mali Alan Formations as substitution for the Dinaridi Formation. Moreover, the Cainozoic Susak Formation in the Northern Adria was been completely redescribed and renamed into Raša, Istra and Ivana Formations.



## Prethodna istraživanja i metode

Brojni su prethodno objavljeni rezultati regionalnih studija i litologije istraživanog područja objavljeni u prošlosti, npr. P. Colantoni i dr. (1979.), G. Muttoni i dr. (2003.), M. Ghielmi i dr. (2009.), J. Velić i T. Malvić (2011.), D. Balić i T. Malvić, (2013.).

Od 1970. kada se počelo s istraživačkim bušenjem u hrvatskom dijelu Jadrana pa do 2000. načinjeno je 116 bušotina i snimljeno 75 000 kilometara seizmičkih profila. Većina aktivnosti bila je usmjerena na dobivanje podataka o karbonatnoj podini, no neki su podaci također obuhvatili pliocenske i mlađe klastične taložine (npr. MALVIĆ I DR., 2011.; VELIĆ I DR., 2015.). Općenito ti su podaci omogućili odrediti vremena oledbi koje su se širile iz Alpi prema Jadranskom moru te rekonstruirati pomicanje paleodelte i prodelta rijeke Po. Znatno manje podataka bilo je dostupno u Južnoj Dalmaciji, posebice bušotinskih. Tamo je glavnina zaključaka o paleogeografiji dobivena iz najduže postojeće seizmičke sekcije (oko 100 kilometara) te jedne duboke bušotine (BALIĆ, MALVIĆ, 2013.), te iz jedne plitke bušotine načinjene u inženjersko-geološku svrhu (BULJAN I DR., 2012.).

Prikazano istraživanje je sinteza prethodno objavljenih bušotinskih i seizmičkih podataka prikupljenih u Sjevernom Jadranu i Južnoj Dalmaciji. Oni su proučeni u skladu sa Sjevernoameričkim stratigrafskim kodom, posebno tamo gdje su određene nove litostratigrafske jedinice.

## Taložni okoliši i litostratigrafska svojstva pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih taložina analiziranog dijela hrvatskog Jadrana

Tektonska evolucija cjelokupnoga perimediterranskog prostora posljedica je kontinentalne riftne faze koje je započela u trijasu i donjoj juri te se nastavila kolizijom u gornjoj kredi i traje još danas (npr. BENNETT I DR., 2008.). Najveća regionalna pliocensko-pliocenska depresija je ona Padska, smještena na zapadu Jadranskog bazena, a debljine u njoj dosežu nekoliko tisuća metara (npr. VELIĆ, MALVIĆ, 2011.).

## Previous explorations and methods

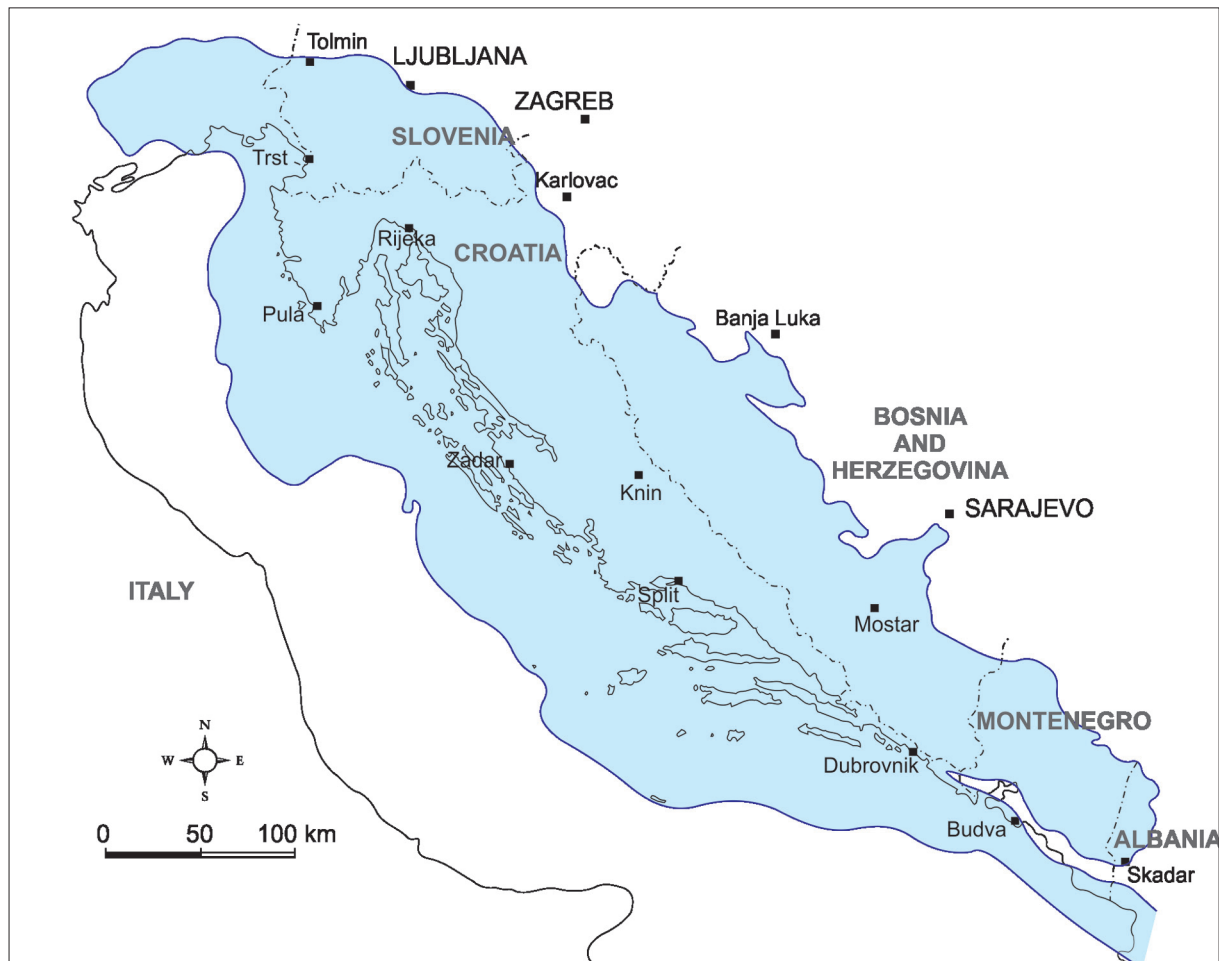
Numerous regional studies of the palaeogeography and lithology specific to the explored areas were published, e.g. P. Colantoni et al (1979), G. Muttoni et al (2003), M. Ghielmi et al (2009), J. Velić and T. Malvić (2011), D. Balić and T. Malvić, (2013).

Exploration drilling commenced in the Croatian Adriatic in 1970. By 2000, 116 wells had been drilled and 75,000 km of 2D seismic exploration had been completed. Most of this work was conducted for the purpose of studying the carbonate basement, but some of the data was obtained for describing Pliocene and younger, non-platform, sediments (e.g. MALVIĆ ET AL., 2011; VELIĆ ET AL., 2015). Overall, the data made it possible to determine periods of glaciation that began in the Alps, extended over the Adriatic Sea, and to reconstruct palaeo-Po delta and prodelta movement completely. Significantly fewer datasets were available for the Southern Dalmatia than for the north, especially from wells. The main conclusions regarding the palaeogeography were inferred from the longest seismic sections (up to 100 km) and one deep well (BALIĆ, MALVIĆ, 2013), and from one shallow borehole drilled specifically for civil engineering purposes (BULJAN ET AL., 2012).

Presented research had been done as synthesis of previously published well and seismic data in the Northern Adria and Southern Dalmatia. They were studied according the North American Stratigraphic Code, especially where the new lithostratigraphic units were defined.

## Depositional environments and related lithostratigraphic properties of the Pliocene, Pleistocene and Holocene in the analysed Croatian Adriatic Sea

The tectonic evolution of the entire peri-Mediterranean area consisted of continental rifting beginning in the Triassic to Lower Jurassic and continuing until the collision that began in the Upper Cretaceous and is still ongoing (e.g., BENNETT ET AL., 2008). The largest regional Pliocene-Pleistocene Po depression in the Adriatic Basin is today located along the west coast, reaching thicknesses of several thousand metres (e.g. VELIĆ AND MALVIĆ, 2011).



Slika 2. Područje Jadranske karbonatne platforme

Izvor: prilagođeno prema VLAHOVIĆ I DR., 2005.

Figure 2 The area of the Adriatic Carbonate Platform

Source: modified after VLAHOVIĆ ET AL., 2005

### *Evolucija podine pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih taložina hrvatskoga dijela Jadranskog bazena*

Jadranska karbonatna platforma (Sl. 2.) zasebni je paleogeografski entitet koji se odvojio od ruba Gondwane u donjoj juri te kao takav postojao do kraja krede. U kenozoiku, dio platformskih sedimenata, izdignuo se u Dinaride (VLAHOVIĆ I DR., 2005.).

Danas su Vanjski Dinaridi smješteni između Jadranske obale i Unutarnjih Dinarida koji čine južnu granicu Panonskog bazenskog sustava. S druge strane, jugozapadna granica Jadranske karbonatne platforme prekrivena je Jadranskim morem i ujedno predstavlja granicu

### *Evolution of the basement of Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits in the Croatian part of the Adriatic Basin*

The Adriatic Carbonate Platform (Fig. 2) is defined as a separate palaeogeographic entity, isolated from other former Gondwana platforms, and developed from the Lower Jurassic until the end of the Cretaceous. During the Cainozoic, the large massif of the Dinarides was uplifted from a part of platform sediments (VLAHOVIĆ ET AL., 2005).

The Outer Dinarides have recently been located between the Adriatic coast and the Inner Dinarides that form the southern margin of the Pannonian Basin System. Present-day south-western

dosega taloženja pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih taložina donošanih u Jadran s hrvatske strane.

### *Evolucija hrvatskog dijela Jadranskog bazena tijekom pliocena, pleistocena i holocena*

Taloženje u Jadranskom bazenu u kvartaru snažno je bilo obilježeno glacijalima i interglacijalima. Tijekom hladnih razdoblja ledeni pokrov širio se čak dijelovima Velebita (VELIĆ I DR., 2011.). Svaka oledba bila je povezana sa snižavanjem morske razine. Tako se već u kasnom miocenu globalna razina mora spustila zbog antarktičke oledbe i općeg širenja leda (npr. MERCER, SUTTER, 1982.). Volumen leda bio je znatno veći negoli danas te *...eustatički pad razine mora bijaše djelomice odgovoran za izolaciju Mediteranskog bazena* (KENNETT, 1977.), a zbog odvajanja toga prostora od Atlantskog oceana u području Gibraltara. Početkom pliocena dolazi do porasta razine mora i Jadransko more poprima današnje obrise no uz znatno veću površinu koje je prekrilo. Slikovit primjer dan je, npr., u VELIĆ, MALVIĆ (2011.).

Tijekom pliocena (5,332 – 2,588 mil. god.) u hrvatskom dijelu Sjevernog Jadrana uglavnom su taloženi peliti. Planktonske i bentičke foraminifere ranog pliocena upućuju na toplu klimu te taloženje u okolišima otvorenoga mora (vanjskog šelfa), uz veliku raznolikost vrsta (TURK, 1971.; CITA, RYAN, 1973.). No, kasni pliocen obilježen je manjom raznolikošću i brojem planktonskih foraminifera (KALAC, 2008.), što je posljedica umjerene do hladne klime tijekom bibera ( $\approx 2,5$  mil. god.). Debljina pliocena veća je u talijanskom podmorju, što zbog blizine izvornog područja detritusa, a što zbog bržeg tonjenja prostora tijekom kasnog pliocena (RIO I DR., 1997.), te nastanka strmijih podmorskih padina uz koju je sediment bogat organskom tvari bio prenašan s kopna.

U pleistocenu volumen leda na Zemlji bio je i tri puta veći nego što je danas, dok su velike ledene ploče u prosjeku bile debljine 2 kilometra, a opća razina mora niža za oko 105,5 – 123,4 metara tijekom Zadnjeg oledbenog razdoblja (DONN I DR., 1962.). Sličnu vrijednost od 130 metara naveli su M. Nakada i K. Lambeck (1988.) te Y. Yokohama i dr.. (2001.) daju vrijednost 137,4 – 159,3 metra tijekom treće oledbe. Nasuprot tomu, tijekom međuledenih razdoblja, razina mora je rasla pa katkad dosegla i nekoliko metara više razine od današnjih. Jadransko more u današnjim

boundaries of the Adriatic Carbonate Platform, now covered by the Adriatic Sea, marks where most of the Pliocene, Pleistocene and Holocene clastics, transported from Croatian coast, were deposited in the Adriatic Basin.

### *Evolution of the Croatian part of the Adriatic Basin during the Pliocene, Pleistocene and Holocene*

The sedimentation in the Adriatic Basin during the Quaternary was strongly influenced by glacial-interglacial cycles. During the cold periods, ice sheets extended even over parts of the Velebit Mountain (VELIĆ ET AL., 2011). Each glacial was associated with lowered sea levels; in the latest Miocene, for example, global sea levels dropped due to the Antarctic glacial that caused a large extension of ice sheets (e.g. MERCER AND SUTTER, 1982). Ice volumes increased beyond those of the present day, and “...an eustatic sea level drop that may have been partly responsible for the isolation of the Mediterranean basin” (KENNETT, 1977). As result, during this period the Atlantic Ocean was no longer linked to the Mediterranean Sea at Gibraltar. At the beginning of the Pliocene, the sea level was higher and the Adriatic Sea was much larger but started to adopt a similar shape as we know it today. Examples of the depositional conditions in the early Pliocene Adriatic Sea have been given in, e.g. VELIĆ, MALVIĆ (2011).

During the Pliocene (5.332–2.588 Ma) mostly or exclusively pelites were deposited in Croatian Northern Adria. Planktonic and benthic foraminifera community composition found in the early Pliocene sediment indicated a warm climate and deposition in deeper environments of the open sea, in this case the outer shelf with high diversity of forms (TURK, 1971; CITA AND RYAN, 1973). However, the late Pliocene is characterised by less diversity and quantities of planktonic foraminifera (KALAC, 2008) which resulted from a moderate-to-cold climate during the Biber ( $\approx 2.5$  Ma). Pliocene sediments are thicker along the Italian offshore part of the Adriatic, not only because of the proximal depositional environment, but also due to the rapid subsidence during the late Pliocene (RIO ET AL., 1997) causing steeper slopes and abundant sediment rich in organic matter to be transported from inland.

In the Pleistocene global ice volume was about three times higher than it is today, with ice sheets 2 km thick on average and the global sea-level lower

granicama približno je oblikovano nakon zadnjeg glacijala Würma u kojem je zadnji put tijekom kvartara današnje jadransko morsko dno na velikoj površini bilo izloženo kao kopno (npr. CORREGGIARI I DR., 1996.). Danas se vremena oledbi/međuoledbi također opisuju morskim izotopnim razdobljima (engl. *Marine Isotope Stages*, skr. MIS) kojima se opisuju topla i hladna razdoblja te mogu biti korelirani s nazivima oledbi i međuoledbi, poput onih utvrđenih u alpskom području (npr. IVY-OCHS I DR., 2008.).

Progradacija rijeke Po prema moru, odnosno jugoistoku, jako je ovisila o oledbama koje su stvarale novo kopno, a na kojem je onda mogla biti prenošena i odlagana velika količina pješčanog i siltnog detritusa u (novoooblikovanim) deltama i prodeltama. Turbiditi su bili glavni mehanizam takva prijenosa kojim se detritus mogao odlagati i do 200 kilometara jugoistočnije od današnje obalne linije. Drugi riječni sustav, onaj rijeke Neretve, progradirao je tijekom oledbi uglavnom prema zapadu i to nekoliko desetaka kilometara (prema SIKORA I DR., 2014., progradacija je iznosila 136 kilometara).

### Litostratografske jedinice i njihova korelacija

Vrlo detaljna litostratografska razradba i korelacija načinjena je u prostoru Padske depresije zbog otkrića niza plinskih ležišta u pliocenskim i pleistocenskim taložinama. Danas su te jedinice različito imenovane u hrvatskom i talijanskom podmorju. Njihov detaljan odnos prikazan je u VELIĆ, MALVIĆ (2011.), a temelji se na različitoj strukturalnoj i taložnoj povijesti. Tipične litologije, a time i litostratigrafija, pliocenskih i mlađih taložina u hrvatskom Sjevernom Jadranu uključuju (Sl. 3.):

- a) U pliocenu: pretežito ili potpuno nepropusne taložine (npr. KALAC, 2008.). Pjeskoviti detritus taložen je isključivo na talijanskoj strani iz prodelta, dok je u ostatku prostora dominirala hemipelagička sedimentacija. U Hrvatskoj su te taložine nazvane formacija Istra (VELIĆ, MALVIĆ, 2011.), koja je približan bočni ekvivalent formacija Canopo, Corsini, Porto Garibaldi te većine formacije Santerno imenovanih u Italiji.
- b) U pleistocenu: općenito su to slabo konsolidirane ili nekonsolidirane taložine. Tijekom te epohe u hrvatskom dijelu sjevernog Jadrana taloženi su slojevi pijeska i silta debljine

than today about 105.5 to 123.4 during the Last Glacial Stage (DONN ET AL., 1962). Similar value of 130 m was given by M. Nakada and K. Lambeck (1988) and Y. Yokohama et al. (2001) calculated it was 137.4 – 159.3 m during the Third Glacial. Conversely, some of the interglacials have resulted in sea levels several metres higher than today. The Adriatic Sea was formed within approximately its present borders following the last, Würm, glacial when exposed land was significantly larger (e.g., CORREGGIARI ET AL., 1996). Today, Marine Isotope Stages (marine oxygen-isotope stages, MIS) are used extensively to describe warm and cool periods and could be correlated with glacials or interglacials like in Alps (e.g., IVY-OCHS ET AL., 2008).

Po River system prograded seaward to the south-east during glacial periods, transporting and depositing large quantities of sandy and silty detritus in deltas and prodeltas; turbidites were initiated from these river delta accumulations. Such progradation extended as far as 200 km as the coastline migrated toward southeast. Oppositely, Neretva River system could prograded mostly toward west and about few tens km over exposed glacial land (according to SIKORA ET AL., 2014, progradation was 136 km mostly westward).

### Lithostratigraphic units and their correlation

An extensive lithostratigraphic correlation was conducted in Po Depression to obtain a detailed description of gas reservoirs in Pliocene and Pleistocene sediments. At present, formations in the Croatian and Italian parts of the subsurface are known by different names. The detailed relationship was given in VELIĆ, MALVIĆ (2011) based on a different structural and environmental evolution. The typical lithologies and lithostratigraphy of the Pliocene and younger deposits in the Croatian Northern Adria include (Fig. 3):

- a) Pliocene: Predominantly or completely impermeable deposits (e.g. KALAC, 2008). Sandy detritus was deposited exclusively on the Italian side seaward from prodeltas; in other part hemipelagic sedimentation dominated. In Croatia these are named (VELIĆ, MALVIĆ, 2011) Istria Formation (could be considered as approximate lateral equivalent of Canopo, Corsini, Porto Garibaldi and the most of Santerno Formations in Italy).
- b) Pleistocene: Generally very slightly compacted or unconsolidated sediments are recognised in

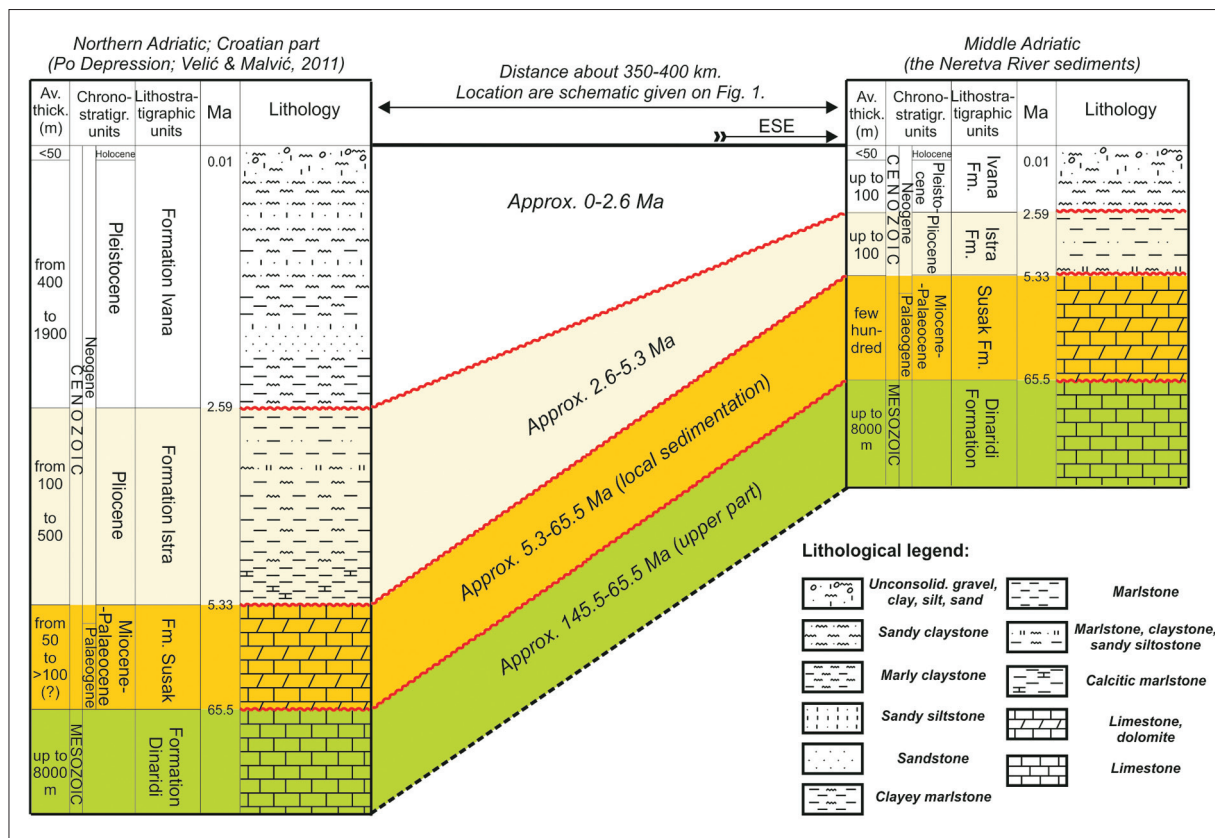


nekoliko metara unutar delte i prodelte rijeke Po (npr. KALAC, 2008.). Stoga je taj litofacijes obilježen izmjenom propusnih i nepropusnih sekvencija, tj. pijeska, siltnog pijeska, gline, glinjaka i glinovitog lapora. Tipiski lokalitet nalazi se u plinskom polju Ivana pa se te taložine imenovane formacijom Ivana (VELIĆ, MALVIĆ, 2011.), a koja je približno bočni ekvivalent formacija Carola, Ravenna te najmlađeg dijela formacije Santerno u Italiji.

Pliocenske, pleistocenske i holocenske litostratigrafske formacije u Sjevernom Jadranu prikazane su na slici 3. te prvobitno korelirane s debljinama približno istovremenih taložina u području riječnog sustava Neretve (Sl. 3.). Taj sustav je jedini na hrvatskoj obali Jadrana koji je tijekom pliocena, pleistocena i holocena prenosio značajne količine detritusa u priobalje.

entire area. In this epoch, few meters thick beds of sand and silt were also deposited on the Croatian side of the Adriatic Sea, in palaeo-Po delta and prodelta environments (e.g., KALAC, 2008). As a result, this lithofacies comprises alternating permeable and impermeable deposits, mostly of sands, silty sands, clays, claystone and clayey marls. The type locality was described in Ivana Gas Field and consequently those deposits have been named Ivana Formation (VELIĆ, MALVIĆ, 2011). They could be considered as approximate lateral equivalent of Carola, Ravenna and the uppermost part of Santerno Formations in Italy.

The Pliocene, Pleistocene and Holocene lithostratigraphic formations in the Northern Adriatic are reviewed in Figure 3, along with correlations regarding thickness comparisons with Neretva River system, which was the only Pliocene, Pleistocene and Holocene system carrying



Slika 3. Usporedba debljina pliocena, pleistocena i kvartara istaloženih u području hrvatskoga sjeverno- i srednjoadrijskog priobalja, a temeljena na nazivima formacija utvrđenih u Sjevernom Jadranu (BALIĆ, MALVIĆ, 2013.). Formacija Susak nedavno je preimenovana, a fm. Dinaridi podijeljena u tri nove (VELIĆ I DR., 2015.).  
Figure 3 Comparison of thicknesses of Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits along the Croatian Northern and Middle Adriatic shallow offshore, based on formations named in the northern part (BALIĆ AND MALVIĆ, 2013). The Susak Fm. is recently renamed, and Dinaridi Fm. divided into three new ones (VELIĆ ET AL., 2015).

Jedinice prikazane na slici 3., koje uključuju miocenske i starije stijene, nedavno su bile ponovno opisane te su izdvojeni novi tipski lokaliteti i određeno njihovo vremensko trajanje (VELIĆ I DR., 2015.). Time je uglavnom prostor cijeloga hrvatskog dijela Jadranskog bazena ponovno litostratigrafski imenovan i određen.

### Litostratigrafske jedinice pliocena, pleistocena i holocena u Sjevernom Jadranu

Pliocenski, pleistocenski i holocenski sedimenti u Sjevernom Jadranu, kako je prikazano na slici 3., podijeljeni su u dvije litostratigrafske jedinice ranga formacija, Istra i Ivana (VELIĆ, MALVIĆ, 2011.).

#### *Formacija Istra*

Ta formacija obuhvaća klastične sedimente taložene na predgorskoj, bazenskoj rampi tijekom pliocena. Lokalno vrlo slična sedimentacija mogla se nastaviti i u ranom pliocenu. Pretežitu litologiju te formacije čine (sivi do zeleni) lapori i gline. U njima se mogu naći leće siltne gline, no nisu opažene krupnije frakcije, poput pijeska. Donja granica te formacije predstavljena je transgresivnim taložinama, dok gornju čini pojava sedimenata formacije Ivana. Debljine formacije varira unutar Padske depresije, a znatno je veća u talijanskom dijelu. U mikrofosilnom sadržaju dominiraju planktonske foraminifere. Kako je formacija litološki vrlo homogena nije podijeljena na članove.

#### *Formacija Ivana*

Tijekom ranog i srednjeg pleistocena klastiti turbiditnog podrijetla taloženi su preko formacija Istra, označavajući početak nastanka formacije Ivana. Kontakt je općenito transgresivan, uz mjestimične pojave diskordancija (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011.). Formacija uključuje izmjenu gline i siltnih pijesaka unutar kojih su otkrivena glavna plinska ležišta Sjevernog Jadrana. Debljina joj je 400 – 1900 metara, što ovisi o paleoreljefu na koji je taložena, te tektonskoj i klimatskoj povijesti tijekom pleistocena i holocena (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011; VELIĆ, MALVIĆ, 2011.) Unutar formacije načinjena je detaljna sekvencijsko-stratigrafska analiza

considerable amounts of sediment material into the Croatian offshore region.

The units shown in Figure 3, which include Miocene and older rocks, are currently (VELIĆ ET AL., 2015) being re-described by selecting new typical locations and providing new chronostratigraphic spans. As a consequence, most of the Croatian Adriatic Basin is to be again lithostratigraphically renamed and determined.

### Lithostratigraphic units of Pliocene, Pleistocene and Holocene ages in the Northern Adria

Pliocene, Pleistocene and Holocene sediments in the Northern Adria, as shown in Figure 3, have been divided in two units of rank of formation. According to VELIĆ, MALVIĆ, 2011, these are Istria and Ivana Formations.

#### *Istria Formation*

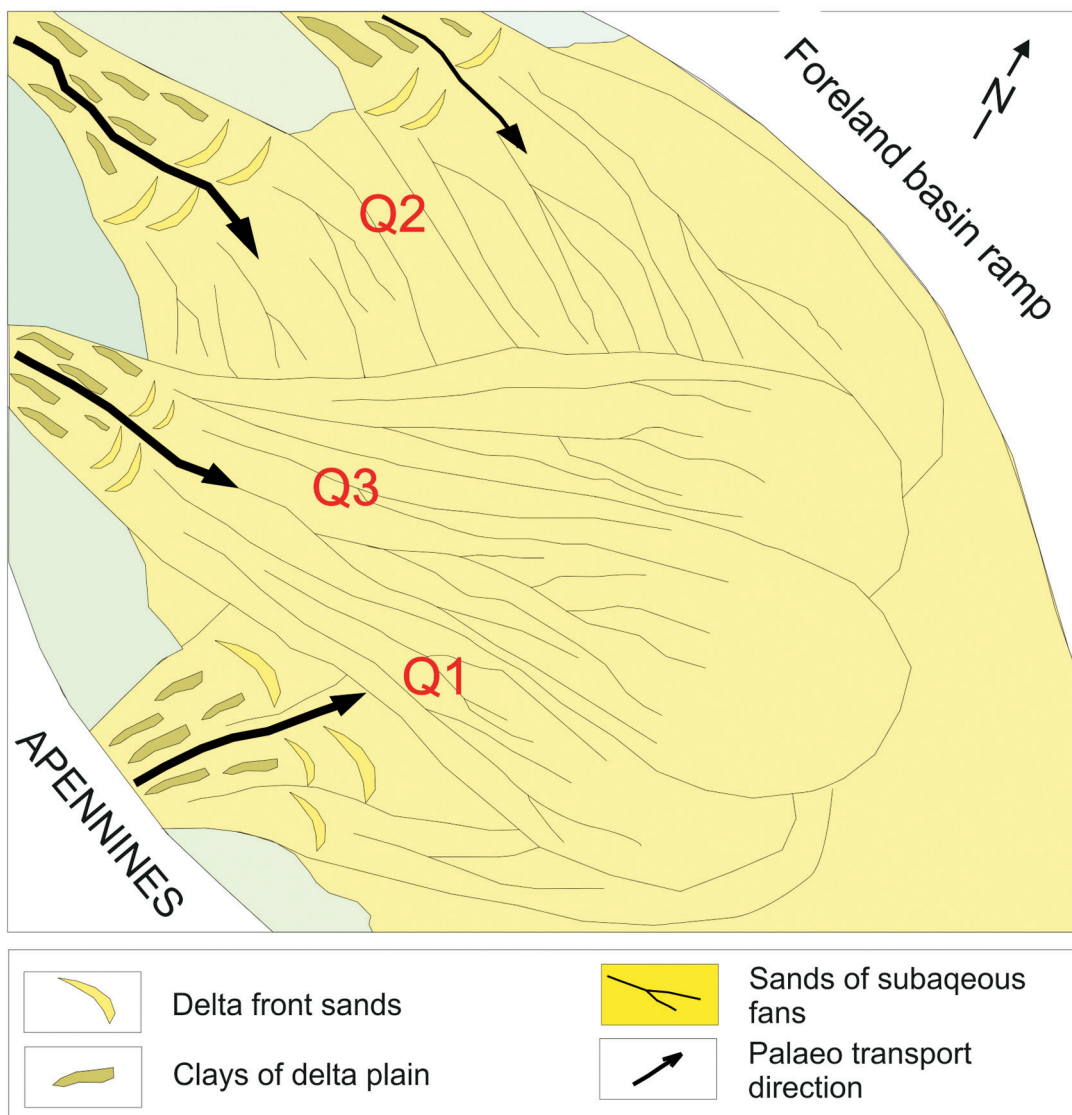
Istria Formation comprises clastic sediments that were deposited in the foreland basin ramp during the Pliocene, and locally in the early Pleistocene. The dominant lithology in this formation consists of grey or green marls and clays. Lenses of silty clay are observed but no coarse-grained (*i.e.*, sand) fractions are found. The lower boundary of the formation is marked by a transgressive deposits and upper with turbiditic sediments of the Ivana Formation. The thickness of Pliocene sediments is variable throughout the Po Depression, increasing towards the Italian side of the Adriatic. The microfossil assemblage consists of planktonic fauna. Istria Formation is generally homogeneous and no members have been defined.

#### *Ivana Formation*

During the early and middle Pleistocene, clastics of turbiditic origin were deposited onto Istria Formation and defined to belong to Ivana Formation. Generally the contact between the two formations is transgressive, with only local discordance being observed (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011). Ivana Formation comprises intercalated, fine-grained clays and silty sands. The main gas accumulations in the northern Adria are found in Ivana Formation sands. The thickness is between 400 and 1900 m, depending on palaeo-relief, tectonics and climate changes during the Quaternary (MARIĆ ĐUREKOVIĆ,

kojom su određene četiri sekvencije četvrtoga reda. To su Q1 i Q2 približno donjopleistocenske starosti, Q3 srednjopleistocenske i Q4 srednjo- do gornjopleistocenske i holocenske starosti (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011.). Na temelju litološkog sastava, izvora materijala (Sl. 4.) i opaženih facijesa (Sl. 5.), tj. na temelju spomenutih sekvencija, formacija Ivana podijeljena je na članove.

2011; VELIĆ, MALVIĆ, 2011). A detailed sequence-stratigraphy analysis was performed on sediments of Ivana Formation; four fourth-order sequences were determined as Q1 to Q2 of approximate early Pleistocene age, Q3 of middle Pleistocene age and Q4 of middle to upper Pleistocene and Holocene ages (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011). Based on the lithological composition and observed sedimentary sources (Fig. 4) and facies (Fig. 5), Ivana Formation was subdivided into members.

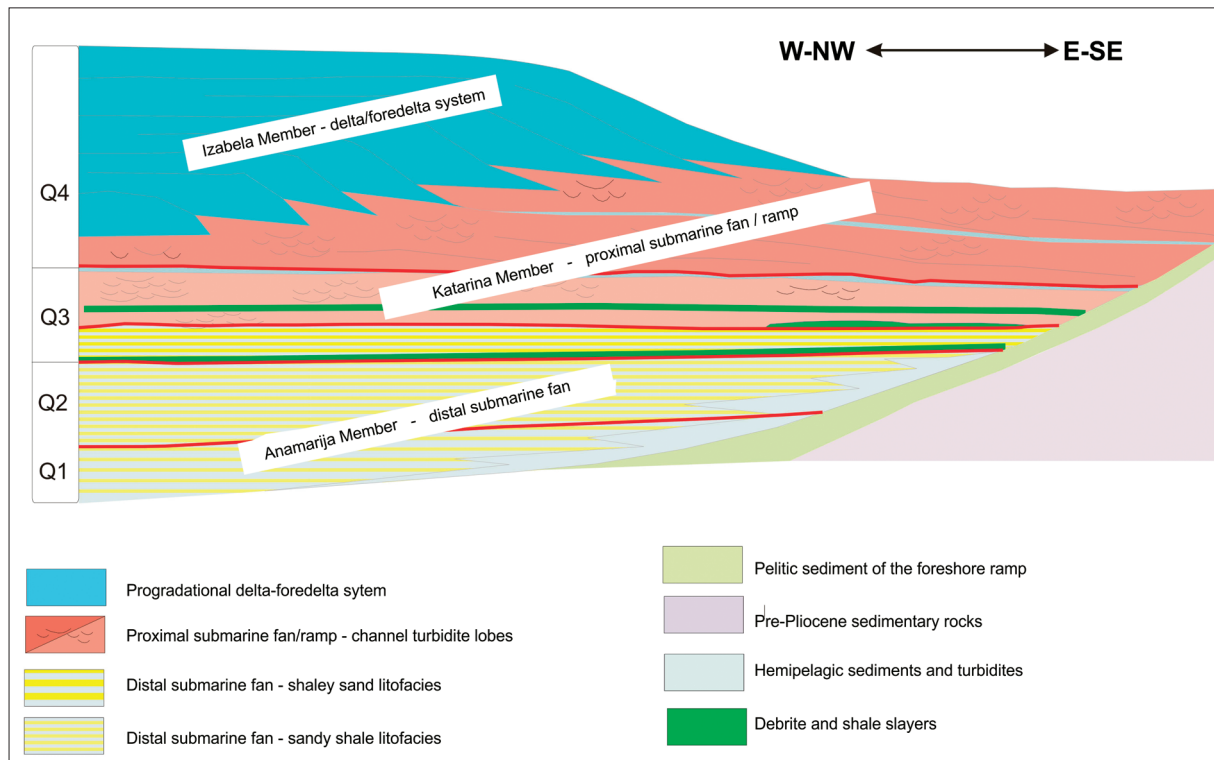


Slika 4. Podrijetlo detritusa unutar Padske depresije u sekvencijama Q1-Q3

Izvor: MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011.

Figure 4 Origins of sediment influx in Po Depression for sequences Q1-Q3

Source: MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011



Slika 5. Taložni facijesi formacije Ivana, s naglaskom na članove

Izvor: MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011.

Figure 5 Sedimentary facies of Ivana Formation, indicating the members

Source: MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011

### Član Anamarija

Član Anamarija formacije Ivana taložen je u distalnom dijelu podmorske lepeze te obuhvaća sekvencije Q1-Q3 (Sl. 4.). One su istaložene u turbiditnim lobovima kao dijelu distalnog dijela podmorske lepeze na bazenskoj ravnici. Prema Bouminoj klasifikaciji, sastoji se od sekvencija Tc – Te u kojima je ukupni odnos debljina propusno/nepropusno (skr. ss/sh) manji od 1. Taj odnos raste prema mlađim dijelovima, a što je posljedica progradacije taložnog sustava. Izvor materijala za sekvenciju Q1 bili su Apenini, a općenito su sve sekvencije Q1-Q3 izgrađene (i) od klastita prenošenih iz Južnih Alpi.

### Član Katarina

Član Katarina formacije Ivana određen je taložinama proksimalnog dijela podmorske lepeze/rampe. Sastoji se od gornjega dijela sekvencije Q3 i donjega sekvencije Q4 (Sl. 5.). Česte promjene litofacijesa unutar člana posljedica su taloženja

### Anamarija Member

Anamarija Member of Ivana Formation belongs to distal submarine fan facies and comprises sequences Q1–Q3 (Fig. 4) that were deposited in turbidite lobes in the distal arc of the submarine fan and in the basin plain. It is interpreted as dominantly Bouma sequences Tc – Te with a sandstone/shale ratio (of thickness, abbr. ss/sh) of less than 1. The ss/sh ratio increases upwards as a result of the influence of the progradation of the sedimentary system. The sources of the material are the Apennines for the Q1 sequence, and mainly the Southern Alps for the Q1–Q3 sequences (Fig. 4).

### Katarina Member

Katarina Member of Ivana Formation is defined as a proximal submarine fan/ramp which comprises the upper part of sequence Q3 and the lower part of sequence Q4 (Fig. 5). The frequent change of lithofacies within this member tends to confirm that it is indeed a proximal area of sedimentation.



u proksimalnog dijelu lepeze, gdje pjeskoviti detritus preteže unutar lobova i kanalnih ispuna. Taloženje se najvećim dijelom odvijalo iz vrlo gustih turbidita te povremeno debrinih i muljnih tokova. Kako se ono nastavljalo cijeli, prostor je oplićavao što se može pratiti u sedimentima, koji u najmlađem dijelu potječu iz podmorske rampe na koju je detritus donasan deltom. Materijal uglavnom potječe iz Venecijanske, te dijelom i iz Padske depresije (Sl. 4.).

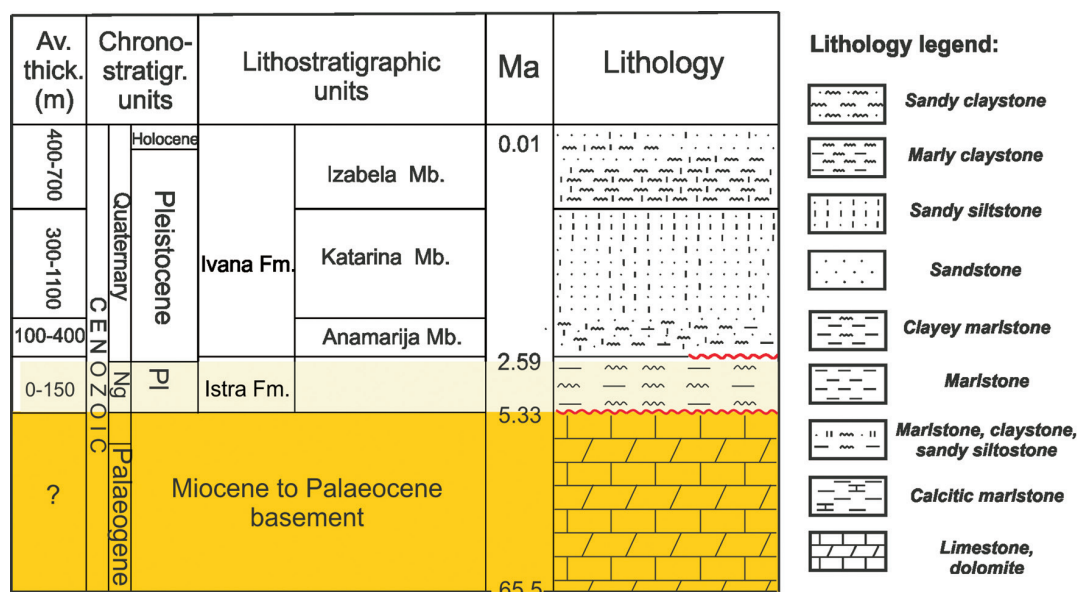
### Član Izabela

Član Izabela formacije Ivana sastoji se od sekvencije Q4 koja je istaložena u deltnom i prodeltnom okolišu (Sl. 5.). Sastoji se od glinovitih silta prodelte, u kojima su povremeno "umetnuti" pijesci i gline taloženi na deltnoj ravnicima (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011.). Novoopisane litostratigrafske jedinice pliocena, pleistocena i holocena Padske depresije (Sjevernog Jadrana) prikazane su na Sl. 6. i temeljeni su na rezultatima objavljenim u VELIĆ, MALVIĆ (2011.) te MARIĆ ĐUREKOVIĆ (2011.) Imenovane su prema imenima tipskih lokaliteta u Sjevernom Jadranu, na kojima su opisane karakteristične litologije koje su ih odredile.

The sand facies dominate in proximal lobes and channel fills. The sediment material was presumably deposited mostly from high-density turbidity currents and occasionally from debris- and mud flows. As sedimentation progressed, the area showed shallowing-upwards sequences, implying that the upper material represents a delta feed submarine ramp. The source of the sedimentary detritus is predominantly in the Venice Depression and partially from the Po Depression (Fig. 4).

### Izabela Member

Izabela Member of Ivana Formation consists of sequence Q4 which belongs to the sediments of the delta and prodelta system (Fig. 5). It comprises clayey silts of prodelta facies, with occasional delta front sands and intercalated sands and clay of the delta plain (MARIĆ ĐUREKOVIĆ, 2011.). The newly established lithostratigraphic divisions of the Pliocene, Pleistocene and Holocene sediments of the Northern Adriatic Po Depression is shown in Figure 6 and is based onto results published into VELIĆ, MALVIĆ (2011) as well as MARIĆ ĐUREKOVIĆ (2011.). The members are named according typical localities in the Northern Adria, where are determined typical lithologies that defined each particular member.



Slika 6. Nova litostratigrafska podjela pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih taložina u hrvatskom dijelu Padske depresije

Figure 6 Newly established lithostratigraphic division of the Pliocene, Pleistocene and Holocene sediments in the Croatian part of the Po Depression

### Nove litostratigrafske jedinice pliocena, pleistocena i holocena u priobalju Južne Dalmacije

Na temelju prethodnih rezultata analize pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih taložina u Neretvanskom i Korčulanskom kanalu očito je značajan dio klastita donošeni i istaloženi djelovanjem rijeke Neretve u prošlosti (BALIĆ, MALVIĆ, 2013.). No ukupne debljine takvih taložina su značajno manje negoli istodobnih u Padskoj depresiji. Zajedničko je što su u svim tim područjima pješćani i silti detritus prenošeni djelovanjem u deltama i prodeltama.

#### Formacija Neretvanski kanal

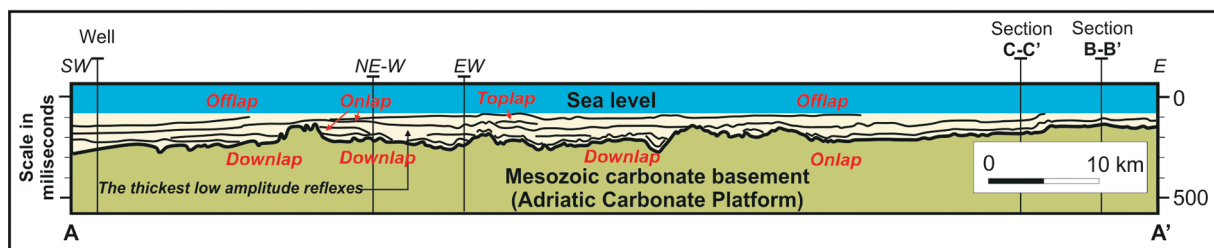
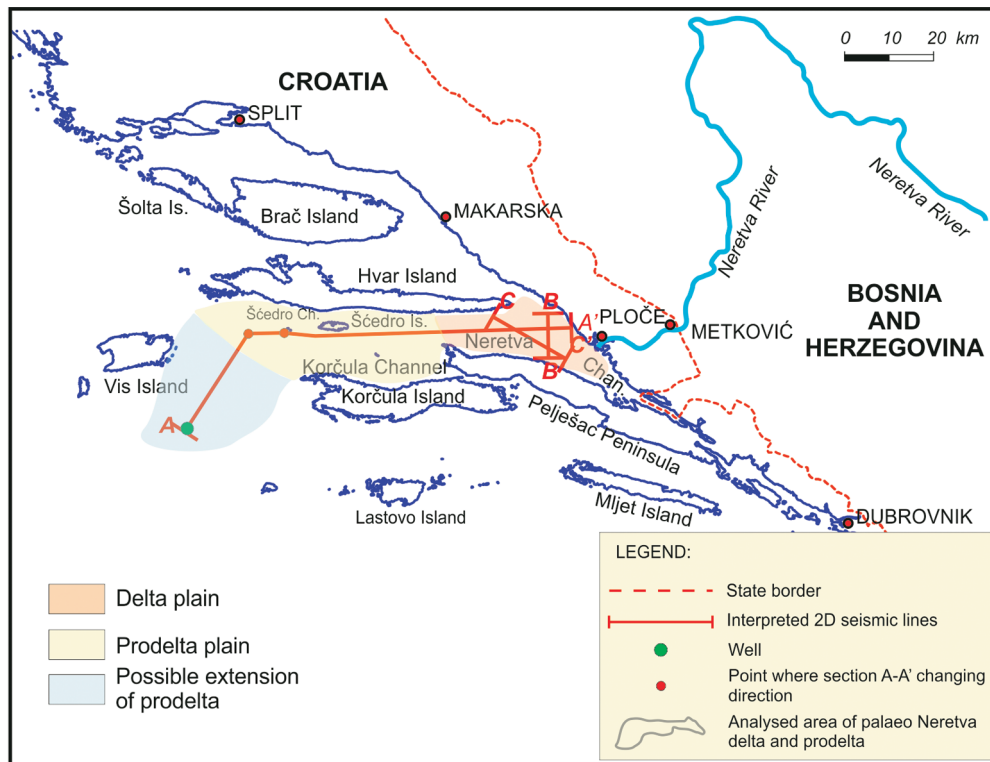
Nekoliko istraživanja (JURINA, IVANIĆ, 2011; BULJAN I DR., 2013.) pružilo je dovoljan broj mjerenja i interpretacija kako bi se u prostoru Neretvanskog (posebice Malostonskog zaljeva) i Korčulanskog kanala uspostavile nove pliocenske, pleistocenske i holocenske litostratigrafske jedinice. U tim prostorima morski ili slatkovodni okoliši taloženja bili su povremeno popunjavani klastitima taloženim u delti ili prodelti rijeke Neretve. Pri tomu je poluotok Pelješac (Sl. 7.) bilo markantno geomorfološko uzdignuće koje je utjecalo na progradaciju rijeke Neretve u more, tj. u prostor Neretvanskog kanala, a time i Malostonskog zaljeva kao najistočnijeg dijela toga prostora, ali i dalje prema zapadu u prostor Korčulanskog kanala. Sve je to bilo razlogom da se cijela pliocensko, pleistocensko, holocenska sekvencija, sastavljena pretežito od gline te dodatno silta i pijeska, s vrlo malo šljunka, imenuje formacijom Neretvanski kanal. Unutar nje mogu se naći taložine morskog, brakičnog i slatkovodnog podrijetla, no u svima njima moguće je naći klastite istaložene djelovanjem rijeke Neretve. Taložine te formacije jasno se litološki razlikuju od karbonatne podine (miocenske ili starije). Debljina im se kreće između 100 i 400 metara, što je prikazano na Sl. 7. na kojoj se može očitati okomita skala u milisekundama. U prikazanom slučaju vrijedi sljedeće pravilo pretvorbe: 1,5 m odgovara 1 ms u morskoj vodi, a 2 m 1 ms u klastitima ispod nje (kod gline vrijedi 1 – 2,5 m/ms, kod “mokrog” pijeska 1,5 – 2,0 m/ms).

### The new lithostratigraphic units in the Pliocene, Pleistocene and Holocene in the Southern Dalmatia offshore

Based on previous reports on Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits in Neretva and Korčula Channels, significant amount of clastics had been transported in palaeo-Neretva environments (BALIĆ, MALVIĆ, 2013). However, total sediment thicknesses are significantly lower than in Po depressions. In both areas, the sandy and silty components were transported through deltas and prodeltas.

#### Neretva Channel Formation

Several reports (JURINA, IVANIĆ, 2011; BULJAN ET AL., 2013), have provided sufficient measurements and interpretations in Neretva Channel (especially Mali Ston Bay) and Korčula Channel to establish new Pliocene, Pleistocene and Holocene lithostratigraphic division characteristics for this area. In those locations, marine or freshwater environments were periodically influenced by the palaeo-Neretva delta and prodelta. Pelješac Peninsula (Fig. 7) was one of the most imposing geomorphological features of the region during the Pliocene, Pleistocene and Holocene, directing the Neretva River system seaward from the present coastline, *i.e.*, into the Neretva Channel, including the easternmost edge of the Mali Ston Bay, and Korčula Channel. All of those reasons determined the need for the entire Pliocene, Pleistocene and Holocene clastic sequence — (predominantly) clay, silt and sand, with very sporadic gravel — to be named Neretva Channel Formation, as the area where all lithotypes of marine, brackish, freshwater and, especially, lithotypes formed by Neretva River are found. The clastics of this formation are clearly different and recognisable from the carbonates of the Miocene (or older) basement. The approximate formation thickness varies from 100 to 400 m, as shown in Figure 7 (down). The scale is in milliseconds (ms), but the equivalent depth and thickness may be easily calculated from the following velocities in different materials: 1.5 m/ms in seawater, and about 2 m/ms in clastics (clay = 1–2.5 m/ms, wet sand = 1.5–2.0 m/ms).



Slika 7. Područje taloženja rijeke Neretve tijekom pliocena, pleistocena i holocena

Izvor: prilagođena prema BALIĆ I MALVIĆ, 2013.

Figure 7 The depositional area of Neretva River during the Pliocene, Pleistocene and Holocene

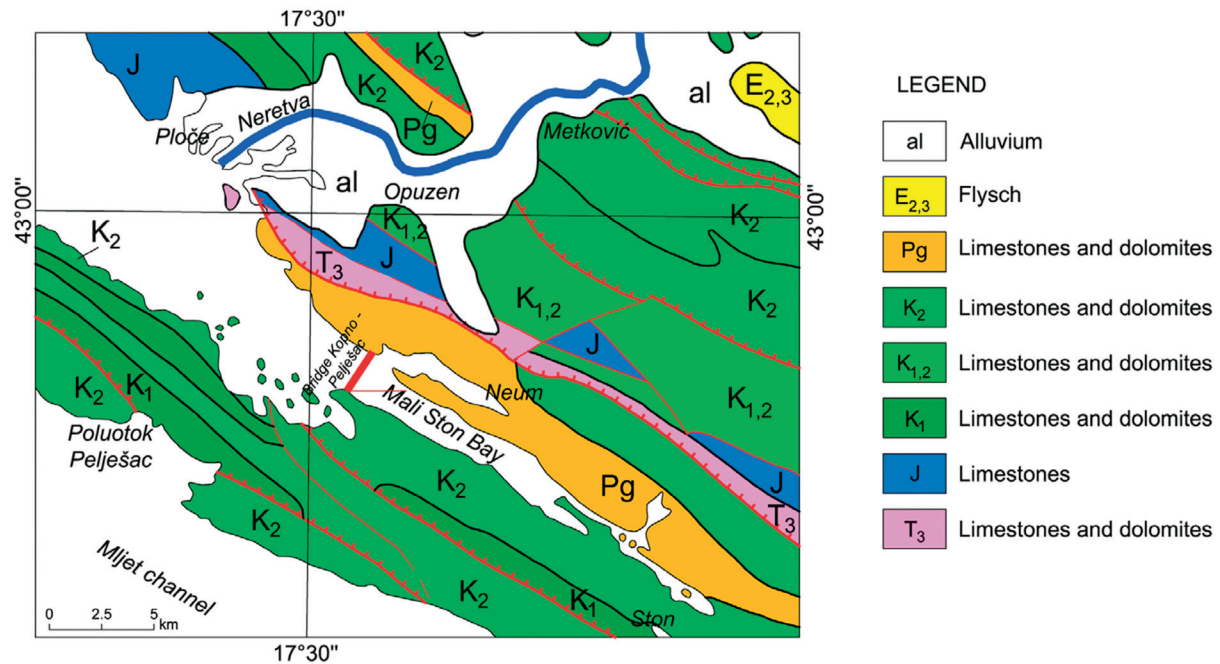
Source: modified after BALIĆ, MALVIĆ, 2013

### Član Malostonski zaljev

Član Malostonski zaljev predstavlja tipičnu pleistocensko-holocensku izmjenu glinovitih, morskih taložina s povremenim klastitima kopnenog podrijetla. Sekvencija je opisana u radu BULJAN I DR. (2012.), gdje su autori istražili geološka i geomehanička svojstva kvartarnih taložina na mjestu budućeg mosta kopno – Pelješac (Pelješacki most). Te taložine prekrivaju eocenske i mezozojske karbonate (dio Jadranske karbonatne platforme) u podini. Oko 12,5 kilometara sjeverno-zapadno od budućeg mosta nalazi se današnje ušće rijeke Neretve (Sl. 8.), koje je donosilo većinu pjeskovitog detritusa u područje Neretvanskog kanala. Tijekom kvartarnih oledbi

### Mali Ston Bay Member

Mali Ston Bay Member: This is a typical Pleistocene-Holocene succession of clayey marine deposits with occasionally intercalated terrigenous clastics. It was described in BULJAN ET AL. (2012), where the authors investigated the geological and geomechanical properties of the thick Pleistocene and Holocene deposits for the construction of the future large “Mainland–Pelješac” bridge (“the Pelješac Bridge”). The sediments overlie the Eocene and Mesozoic carbonate basement of the Adriatic Carbonate Platform. Also, about 12.5 km to the north-west from the future bridge lies the present-day Neretva River mouth (Fig. 8) which transported most of the sandy clastics in Neretva



Slika 8. Geološka karta, izvorno 1:100 000, listovi Ploče i Ston (MAGAŠ I DR., 1979.; RAIĆ I DR., 1980.), s naznačenim smjestaštem budućeg mosta, odnosno područjem uzorkovanja u Malostonskom zaljevu (BULJAN I DR., 2012.)

Figure 8 Geological map, originally 1:100 000 scale, Ploče and Ston sheets (MAGAŠ ET AL. (1979; RAIĆ ET AL. 1980), with the future bridge site as the sampled area in Mali Ston Bay (BULJAN ET AL., 2012)

takav prijenos odvijao se znatno dalje na zapad, u područje Korčulanskog kanala, a rezultati nekih istraživanja otvaraju mogućnost da je utjecaj rijeke Neretve mogao doseći čak i prostore današnjeg otoka Visa (npr: SURIĆ I DR., 2005.; CRMARIĆ, 2009; SURIĆ, 2009.; BALIĆ, MALVIĆ, 2013.; SIKORA I DR., 2014.).

Unutar Malostonskog zaljeva BULJAN I DR. (2012.) opisali su tipске litološke i geomehničke jedinice (Sl. 9.). Najmlađa jedinica A sadrži vrlo mekane i viskozne holocenske taložine, prosječne debljine 28 metara (najviše do 38 metara). U njima su pronađene slatkovodne i marinske školjke i puževi čiji fragmenti mogu činiti čak do 20% sadržaja sedimenta. BULJAN I DR. (2012.) naglasili su snažan utjecaj delte rijeke Neretve u njihovu nastanku te dominaciju karbonatnih minerala u odnosu na smektit i vermikulit.

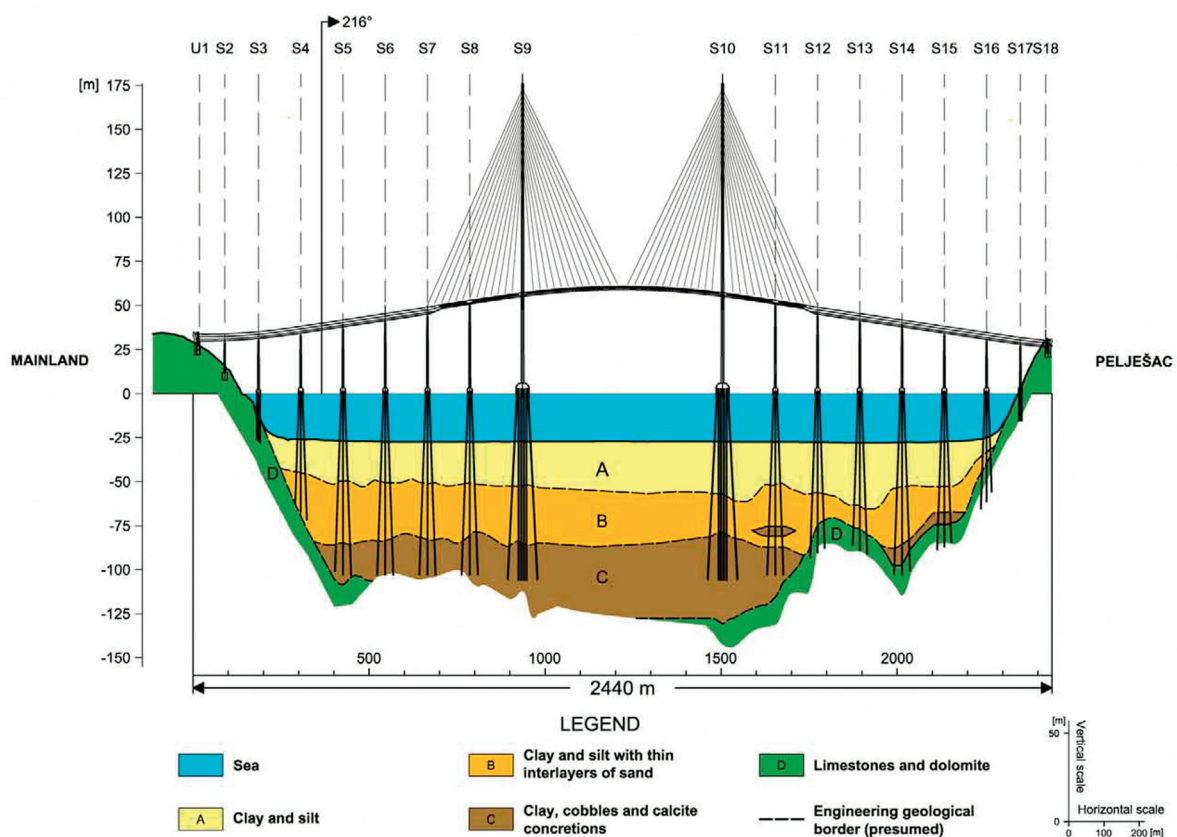
Jedinica B sastavljena je od mekanih do čvrstih taložina, uglavnom vrlo plastične gline i silta, s proslojcima pijeska. U donjem dijelu pronađene su kalcitne kongrecije promjera približno 1 centimetar, a općenito dominiraju karbonatni minerali. BULJAN I DR. (2012.) taloženje tih

Channel, and during the Quaternary glacials possibly far away in the Korčula Channel. Some results indicated that prodelta could reach present day Vis Island (e.g. SURIĆ ET AL., 2005; CRMARIĆ, 2009; SURIĆ, 2009; BALIĆ, MALVIĆ, 2013; SIKORA ET AL., 2014).

BULJAN ET AL. (2012) described typical lithological and geomechanical units in Mali Ston Bay (Fig. 9). The youngest (unit A) includes very soft and viscous Holocene sediment with an average thickness of 28 m (max. 38 m), including both freshwater and marine bivalves and gastropod fragments comprising up to 20% of the content. BULJAN ET AL. (2012) stressed the strong influence of Neretva River delta, and the predomination of carbonate minerals compared with smectite and vermiculite.

Unit B is composed of soft to firm sediments, mainly highly plastic clay and silt, with sandy intrabeds. Calcite concretions about 1 cm in size are found in the lower sediments. BULJAN ET AL. (2012) described the sediment deposition in a predominantly shallow low-energy marine environment. Carbonate minerals prevail. The





Slika 9. Shematski inženjersko-geološki profil s pojednostavljenom konstrukcijom mosta. Okomito mjerilo je uvećano deset puta u odnosu na vodoravno.

Izvor: BULJAN I DR., 2012.

Figure 9 Schematic engineering geological cross-section showing simplified bridge construction. Vertical scale exaggeration is 10 times.

Source: BULJAN ET AL., 2012

sedimenata svrstali su unutar plitkog, morskog okoliša, niske energije. Debljina se kreće između 25 i 38 metara, a granica prema krovini je postupna. Starost člana je pleistocenska, osim najmlađeg dijela koji je holocenski.

Jedinica C sastoji se od čvrste, plastične gline s kalcitnim konkcijama (čine više od 10% masenih udjela). Debljina može doseći 40 metara, a član uključuje tri povremena proslojka pijeska i šljunka (svaki je debljine oko 3 metra). Granice prema krovini (jedinici B) i karbonatnoj podini (jedinica D, opisana niže) su oštre. Od minerala dominira kvarc, a fosili foraminifera ukazali su na okoliš otvorenog mora (PAVELIĆ, 2005.).

Jedinica D sastavljena je od karbonata gornje krede i vapnenaca donjega eocena, povremeno rekristaliziranih i dolomitiziranih te često frakturiranih.

thickness is 25–38 m, with a gradational boundary with unit A. The top of the member is presumed Holocene, but the rest belongs to the Pleistocene.

Unit C is firm plastic clay with calcite concretions (more than 10% by mass) with variable thickness up to 40 m, and includes three sporadic 3 m-thick beds of sandy and gravelly detritus. Boundaries with unit B and the carbonate basement (unit D; see below) are sharp. Quartz dominates; the mineral and foraminiferal content implies an open marine environment (PAVELIĆ, 2005).

Unit D is made of carbonate rocks of Upper Cretaceous and lower Eocene limestones, locally recrystallized, dolomitised and frequently very fractured.

Mali Ston Bay Member includes two clearly lithologically different components. Units A and

Član Malostonski zaljev uključuje dvije litološki različite cjeline. Jedinice A i B sastoje se od glinovitog, mekanog do vrlo mekanog, detritusa, taloženog u plitkoj vodi. No jedinica C sastavljena je od čvrstih, plastičnih glina taloženih u "otvorenom" morskom okolišu, koje sadrže i relativno deblje proslojke pijeska i šljunka, kalcitnih konkrecija te vapnenačkog detritusa. Nadalje, sve ove tri jedinice obilježene su dominacijom pelitnog detritusa – različitih glina s karbonatnom komponentom te povremenim intervalima s dominacijom silta, pijeska ili šljunka. Sve opisani litofacijesi odredili su kvartarnu litologiju kao tipičan litostratigrafski član, jasno razlikovan od svoje podine.

#### *Pijesci Neretva*

U opisu kvartarnih taložina Malostonskog zaljeva BULJAN I DR., 2012., 236, su ustvrdili kako *su nedavno oblikovanje i prostorna svojstva sitnozrnatih, morskih taložina blisko povezani s prijenosom kopnenog materijala obližnjom rijekom Neretvom, zatim stalnom tektonskom aktivnošću koja je prouzročila izdizanje južnog dijela hrvatske obale te promjenama razine mora u Mediteranu, a time i Jadranu, tijekom gornjeg pleistocena i holocena*. Očito je detritus prenošen i taložen u različitim paleookolišima rijeke Neretve oblikovao brojna pjeskovita i siltna tijela tijekom pliocena, pleistocena i holocena unutar Malostonskog zaljeva te Neretvanskog kanala, ali i Korčulanskog kanala vjerojatnom progradacijom prodelte na zapad/jugozapad. Ti propusni intervali nisu regionalno prepoznati izvan toga prostora, odnosno njihovo prostiranje nije veće od nekoliko kilometara (JURINA, IVANIĆ, 2011.). To ocrta činjenicu kako pelitni detritus (tj. glina) dominira u prostoru još od donjega pliocena, a maksimum njezina taloženja bio je u morskim (tek katkad brakičnim i slatkovodnim), plitkim okolišima gornjeg pleistocena i holocena.

Nadalje, lako je raspoznati, prema granulometriji, zrna taložena u prostorima ušća, delte ili prodelte Neretve, od onoga detritusa taloženog bez utjecaja rijeke, a posebice onoga u kojima klastita gotovo i nema. Po tom kriteriju, JURINA, IVANIĆ (2011.) lako su razvrstali taložine unutar Neretvanskog kanala i to na one u kojima dominira pjeskoviti silt taložen djelovanjem Neretve od taložina u kojima pjeskoviti detritus nedostaje te su opisane (SHEPARD, 1954.) siltne gline. Isti autori su ispitali uzorke holocenskih

B include very soft to soft mostly clayey detritus, deposited in shallow water, whereas unit C comprises firm, plastic clay of an open marine environment, with relatively thick interbeds of sand and gravel, calcite concretions and limestone detritus. However, all three units are proven to be dominated by pelitic detritus — clays with a carbonate component but also with sporadic intervals of increasing silt, sand or gravel detritus. All of those properties have defined this Quaternary lithology as a typical lithostratigraphic member, clearly different from the bottom.

#### *Neretva Sands*

In the descriptions of Mali Ston Bay Quaternary deposits BULJAN ET AL., 2012, 236, stated that: "*The Recent formation and spatial setting of marine fine clastic deposits is closely related to: transport of the terrigenous material by the nearby Neretva River; permanent tectonic activity causing the uplift of the south part of Croatian Adriatic coast; and to oscillating sea level in the Mediterranean including the Adriatic Sea sedimentary basin during the Upper Pleistocene and Holocene.*" It is obvious that detritus transported in different palaeo-Neretva environments formed numerous silty and sandy sections during the Pliocene, Pleistocene and Holocene throughout Mali Ston Bay and Neretva and Korčula Channels, probably with the prodelta far on the west/south-west. Silts and sands are not regionally extended. The size of such section is usually not larger than few kilometres (JURINA, IVANIĆ, 2011). This implies that pelitic detritus, i.e. clay was the dominant component since the early Pliocene, deposited mainly in marine environments during the Upper Pleistocene and the Holocene, sometimes in brackish and fresh, shallow water environments.

It is easy to distinguish grain size deposited by the Neretva River mouth, delta or prodelta from those in which either no clastics, or perhaps a minor portion, were transported by the river. Thus, JURINA, IVANIĆ (2011) easily classified deposits from the present-day Neretva River system as sandy silts, while other deposits in the Neretva Channel are missing the coarser-grained sandy detritus, and are described as silty clays (SHEPARD, 1954). JURINA, IVANIĆ (2011) examined core samples up to 50 cm long from 19 locations in the Neretva River system and 31 in the channel with the presumption that Holocene samples were collected.

jezgara do 50 centimetara dužine, uzete na 19 smjestašta unutar područja djelovanja rijeke Neretve te na dodatnom 31 mjestu unutar Neretvanskog kanala.

Tijekom kvartarnih glacijala kopneni prostor znatno se raširio jadranskim područjem (npr. VELIĆ, MALVIĆ, 2011.) te je posljedično došlo do progradacije rijeke Neretve unutar Neretvanskog i Korčulanskog kanala, pa možda i dalje (npr. BALIĆ, MALVIĆ, 2013.). Progradacija je uzrokovala taloženje uglavnom pješčanih tijela koja su nastajala od ranoga pliocena pa sve do danas. Stoga u tom prostoru vrijedi općenito pravilo kako na mjestima gdje udjel pijeska, siltne pijeska, pjeskovitog silta i silta prelazi 50% volumena, takva litološka jedinica se može imenovati pijescima Neretva.

#### *Nove jedinice u priobalju Južne Dalmacije (područje djelovanja rijeke Neretve)*

Sve novoopisane formacije i članovi u tom području prikazani su na slici 10., zajedno s njihovim prosječnim debljinama i litologijama. Tipski pliocenski litotip nije bilo moguće opisati, iako se u tom razdoblju pretpostavila pretežito pelitna, bazenska sedimentacija (morska, brakična ili slatkovodna). Na temelju postojećih podataka takvo taloženje nastavljeno je i kasnije, no uz sporadične slojeve krupnije zrnatog detritusa (silta, pijeska, šljunka). Pliocenski litofacijesi mogli bi biti nalik na najstarije kvartarne taložine Malostonskog zaljeva, no za njihovu litostratigrafsku odredbu trebaju biti prikupljeni dodatni podatci.

Pijesci Neretva mogu bočno biti ekvivalent cijele formacije Neretvanski kanal (Sl. 10.). No takva pojava može se očekivati samo u slučajevima (a) kada su taložine starije i mlađe od pijesaka Neretva odnesene erozijom; (b) tamo gdje su taložine rijeke Neretve neprekinuto odlagane od donjega pliocena do danas. Taj član razvijen je lokalno, što je posljedica relativno maloga prostora zahvaćenog djelovanjem rijeke Neretve (ušće, delte, prodelte), koji se uz to s vremenom pomicao, pa lokalno nisu ni mogli biti istaložene veće količine psamita.

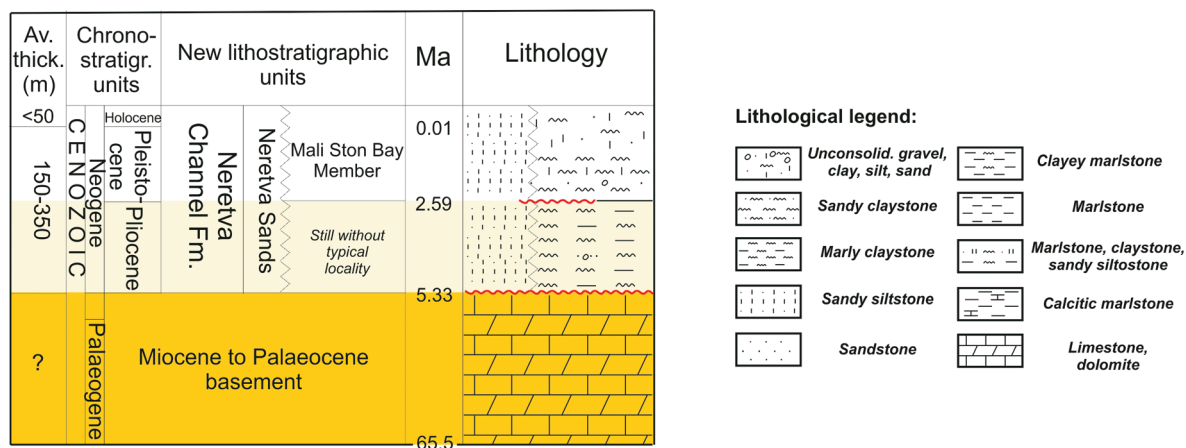
During the glacials the land mass extended along the palaeo-Adriatic in the Quaternary (e.g. VELIĆ, MALVIĆ, 2011) and the consequent progradation of the Neretva River delta and prodelta out from Neretva Channel into Korčula Channel and even further (e.g. BALIĆ, MALVIĆ, 2013) resulted in predominantly sandy depositional bodies. Such lithologies have been sporadically deposited since the early Pliocene until recently. Therefore, all localities where it has been proven that the proportion of sand, silty sand, sandy silt or silt is more than 50% of the total volume belong to lithostratigraphical unit named the Neretva Sands.

#### *The new units in the Southern Dalmatia offshore (area of the Neretva River activity)*

All newly proposed formations and members are shown in Figure 10, which also presents their average thicknesses and lithologies. There is still not described Pliocene type location characterised by predominantly or pelitic basin sedimentation (marine, brackish, fresh water) in the wider area of the Neretva River system. Based on available reports and interpretations, in those areas of predominantly pelitic (clayey) lithofacies and some coarser-grained detritus (silt, sand or gravel) were transported sporadically covering relatively small areas. Pliocene lithofacies might be very similar to the oldest Quaternary lithology in Mali Ston Bay locality, but this needs to be confirmed before naming of lithostratigraphic units.

Neretva Sands can laterally completely replace Neretva Channel Formation, as shown in Figure 10. However, it is valid only for specific cases (a) where older and younger basin deposits from Neretva Sands were carried away by erosion; and (b) where the Neretva depositional environments continuously existed from the early Pliocene until recently. However, this member is developed locally, due to the relatively small area covered by sediments deposited in Neretva River mouth, delta and prodelta depositional environments that migrated in space over time. It is why it is unlikely that large quantities of pure sand accumulated there.

*Middle Adriatic/Southern Dalmatia  
(the Neretva River sediments)*



Slika 10. Odnos između novoimenovanih litostratigrafskih jedinica u plitkom moru Južne Dalmacije (Neretvanski i Korčulanski kanal)

Figure 10 Relationships between the newly named lithostratigraphic units in the shallow offshore sea in Southern Dalmatia (Neretva and Korčula Channels)

## Zaključak

Pliocenski i pleistocenski sedimenti u hrvatskom dijelu Padske depresije sadrže velike rezerve biogenog metana, a ukupna debljina doseže im 6000 metara. U tom dijelu prvo su imenovane nove formacije Istra i Ivana, poštujući činjenicu da taložni okoliš ima svoje posebnosti u odnosu na talijanski dio. To je učinjeno prema pravilima Sjevernoameričkoga stratigrafskog kodeksa. Nakon toga je u formaciji Ivana slijedilo imenovanje triju novih članova: Anamarija, Katarina i Izabela.

Dalje prema jugoistoku, stupanj istraženosti hrvatskog priobalja znatno je niži. Nekoliko je razloga tomu. Prvi je što duž hrvatske obale tijekom pleistocena i holocena nisu postojali "veći" riječni, deltni taložni okoliši pa su takve taložine relativno malih debljina. Zbog toga tamo nisu tražena ležišta ugljikovodika pa nije ni dosegnut stupanj istraženosti koji prati takva otkrića. No bilo je ispitivanja druge vrste, posebice u taložinama koje pripadaju deltnim i prodeltnim okolišima rijeke Neretve. Jedno takvo je seizmička interpretacija pliocenskih, pleistocenskih i holocenskih sedimenata u području Neretvanskog i Korčulanskog kanala. Drugo je opis pleistocenskih i holocenskih

## Conclusions

Pliocene and Pleistocene deposits in the Croatian part of Po Depression include large reservoirs of mostly biogenic methane. The total thickness of Pl–Q deposits is up to 6000 m. New formations Istria and Ivana have recently been proposed for the Croatian region, respecting the specific depositional environments compared with Italian side and instructions for inclusion in the North American Stratigraphic Code. Such division was extended by new members, namely Anamarija, Katarina, Izabela, in the Ivana Formation.

Further to the south-east along the Croatian coast, the level of exploration has been lower due to several factors. Large deltaic systems did not exist during the Pliocene, Pleistocene and Holocene, and such sediments are relatively thin. Consequently no hydrocarbon accumulations are to be expected, which is reflected on the level of exploration. However, some other research was conducted on contemporary and past deposits of Neretva River past delta and prodelta depositional environment. It included seismic interpretations of Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits of Neretva and Korčula Channels. Moreover, interpretation of the Pleistocene and Holocene deposits with regard to future location of the



taložina na budućoj lokaciji Pelješačkog mosta. Uz pomoć tih podataka načinjena je potpuno nova litostratigrafska nomenklatura toga prostora. Uspostavljena je formacija Neretvanski kanal koja uključuje pliocenske, pleistocenske i holocenske naslage u plitkom moru analiziranog prostora Južne Dalmacije. One se jasno razlikuju od svoje karbonatne podine. U nekim dijelovima te formacije, ili čak kao njezin potpuni bočni ekvivalent, prepoznati su pretežito pjeskovito-siltni intervali imenovani pijescima Neretva, poštujući nazivom izvor materijala. Nadalje, tipične kvartarne naslage taložene u morskom, brakičnom ili slatkovodnom okolišu bez (gotovo) ikakva utjecaja rijeke Neretve u prošlosti nazvane su članom Malostonski zaljev. To su glinovite naslage s mjestimičnim karbonatnim kongregacijama, karbonatnim detritusom ili izmjenom pijeska, silta i rijetko šljunka. Tipični pliocenski litofacijes zasad još nije moguće opisati i imenovati.

### Zahvala

Istraživanje je provedeno u okviru geomatematičkog projekta "Razvoj geomatematičkih metoda za analizu mezozojskih i kenozojskih taložnih okoliša Jadranske karbonatne platforme" (voditelj R. Rajić), financijski potpomognuto od Sveučilišta u Zagrebu u programu "Financijska potpora istraživanjima" u 2014. godini.

the Pelješac Bridge was carried out. Completely new lithostratigraphic nomenclature at the rank of formation was established. Neretva Channel Formation includes all Pliocene, Pleistocene and Holocene deposits in the explored shallow offshore along Southern Dalmatia coast. Those deposits are clearly recognisable when compared to the older carbonate basement. If some parts of this formation, or even entire formation as lateral equivalent, were recognised as intervals of sand domination they were named Neretva Sands, respecting the name of source of such detritus. Moreover, typical Pleistocene and Holocene sediments deposited in marine, brackish or continental freshwater environments, without (almost) any influence of palaeo-Neretva River, have been named Mali Ston Bay Member. Those are clayey deposits with sporadic carbonate concretions, carbonate detritus and alternations of sand, silt, and sometimes gravel. The typical Pliocene lithofacies has yet to be described, and consequently this part has not been named as a discrete member within the explored area.

### Acknowledgment

The research was carried out as part of geomathematical research project entitled «Development of geomathematical methods for analysis of Mesozoic and Cainozoic depositional environments in the Adriatic Carbonate Platform» (head R. Rajić), financially supported by the University of Zagreb in programme «Financial supports for research» in 2014.»

## LITERATURA / BIBLIOGRAPHY

- ALJINOVIĆ, D., SREMAC, J. (1997): *The Middle and Upper Permian deposits in Gorski kotar: facts and misconceptions*, Geologia Croatica, 50/2, 231-242.
- ANDERSON, H. A., JACKSON, J. A. (1987): *Active tectonics of the Adriatic region*, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, 91, 937-983.
- BALIĆ, D., MALVIĆ, T. (2013): *Pliocene-Quaternary stratigraphy and sedimentation at the Neretva River Mouth, on the Croatian Adriatic Coast*, Geological Quarterly, 57/2, 233-242.
- BENNETT, R. A., HREINSDÓTTIR, S., BUBLE, G., BAŠIĆ, T., BAČIĆ, Ž., MARJANOVIĆ, M., CASALE, G., GENDASZEK, A., COWAN, D. (2008): *Eocene to present subduction of southern Adria mantle lithosphere beneath the Dinarides*, Geology, 36/1, 3-6.
- BULJAN, R., POLLAK, D., GULAM, V. (2012): *Engineering properties of marine sediments in Mali Ston Bay (Croatia) based on "Mainland-Pelješac" bridge investigation*, Geologia Croatica, 65/2, 233-242.
- BUSER, S. (1989): *Development of the Dinaric and the Julian Carbonate platforms and of the intermediate Slovenian basin (NW Yugoslavia)*, Memorie della Società Geologica Italiana, 40, 313-320.
- CHANNELL, J. E. T., HORVÁTH, F. (1976): *The African/Adriatic promontory as a palaeogeographical premise for alpine orogeny and plate movements in the Carpatho-Balkan region*, Tectonophysics, 35/1-3, 71-101.
- CITA, M. B., RYAN, W. B. F. (1973): *The Pliocene Record in deep sea Mediterranean sediments*, u: Initial Reports Deep sea drilling project, 13/2, (ur. Kaneps, A. D.), University of California, University of Washington, Washington, 1341-1343.
- COLANTONI, P., GALLIGNANI, P., LENAZ, R. (1979): *Late Pleistocene and Holocene evolution of the North Adriatic continental shelf (Italy)*, Marine Geology, 33, 41-50.
- CORREGGIARI, A., ROVERI, M., TRINCARDI, F. (1996): *Late Pleistocene and Holocene Evolution of the North Adriatic Sea*, Quaternario, 9/2, 697-704.
- CRMARIĆ, R. (2009): *Geološko kartiranje podmorja - primjer područja otoka Lastova, Mljeta i Korčule*, Magistarski rad, Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet, pp. 88.
- D'ARGENIO, B., HORVATH, F. (1984): *Some remarks on the deformation history of Adria, from the Mesozoic to the Tertiary*, Annales Geophysicae, 2, 143-146.
- DONN, W. L., FARRAND, W. R., EWING, M. (1962): *Pleistocene Ice Volumes and Sea-Level Lowering*, Journal of Geology, 70/2, 206-214.
- DRAGIČEVIĆ, I., VELIĆ, I. (1994): *Stratigraphical position and significance of reef facies at the northern margin of the Dinaric carbonate platform during the Late Jurassic and Cretaceous in Croatia and Bosnia*, Géologie Méditerranéenne, 3-4, 59-63.
- FAIRBANKS, F. G. (1989): *A 17 000 years glacio-eustatic sea level record: influence on glacial melting rates on the Younger Dryas event and deep-ocean circulation*, Nature, 342, 637-642.
- GHIELMI, M., MINERVINI, M., NINI, C., ROGLEDI, S., ROSSI, M., VIGNOLO, A. (2009): *Sedimentary and Tectonic Evolution in the Eastern Po Plain and Northern Adriatic Sea Area from Messinian to Middle Pleistocene (Italy)*, Rendiconti Lincei, Scienze Fisiche e Naturali, 21/1, 131-166.
- GUŠIĆ, I., JELASKA, V. (1990): *Stratigrafija gornjokrednih naslaga otoka Brača u okviru geodinamske evolucije Jadranske karbonatne platforme (Upper Cretaceous stratigraphy of the Island of Brač within the geodynamic evolution of the Adriatic Carbonate Platform)*, JAZU, Institut za geološka istraživanja, Zagreb, pp. 160.
- IVY-OCHS, S., KERSCHNER, H., REUTHER, A., PREUSSER, F., HEINE, K., MAISCH, M., KUBIK, P. W., SCHLÜCHTER, C. (2008): *Chronology of the last glacial cycle in the northern European Alps*, Journal of Quaternary Science, 23, 559-575.
- JELASKA, V. (1973): *Paleogeografska i naftogeološka razmatranja zapadnog dijela karbonatnog šelfa Dinarida*, Geološki vjesnik, 25, 57-64.
- JURINA, I., IVANIĆ, M. (2011): *The Neretva River Delta: Distribution Pattern of Sediments and Characterization of Nanosized Mineral Phases*, Znanstveni susreti 3. vrste, Institut Ruđer Bošković, Zagreb, neobjavljeno.

- KALAC, K. (2008): *Biostratigrafsko-kronostratigrafska istraživanja pliocensko-pleistocenskih naslaga u podmorju Jadrana s posebnim osvrtom na klimatske promjene*, Naftaplin, 45/8, pp. 104.
- KENNETT, J. P. (1977): *Cenozoic evolution of Antarctic glaciation, the circum-Antarctic Ocean, and their impact on global paleoceanography*, Journal of Geophysical Research: Ocean and Atmospheres, 82, 3843-3860.
- MAGAŠ, N., MARINČIĆ, S., BENČEK, Đ. (1979): *Osnovna geološka karta SFRJ, Tumač za list Ploče K 33-35*, Institut za geološka istraživanja Zagreb, Savezni geološki zavod Beograd, Beograd, pp. 52.
- MALVIĆ, T., ĐUREKOVIĆ, M., ŠIKONJA, Ž., ČOGELJA, Z., ILIJAŠ, T., KRULJAC, I. (2011): *Exploration and Production Activities in northern Adriatic Sea (Croatia), successful joint venture INA (Croatia) and ENI (Italy)*, Nafta, 62/9-10, 287-296.
- MARIĆ ĐUREKOVIĆ, Ž. (2011): *Litofacijesne i stratigrafske značajke pleistocenskih naslaga podmorja sjevernoga Jadrana na temelju visokorazlučivih karotažnih mjerenja*, Doktorska disertacija, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, pp. 167.
- MERCER, J. H., SUTTER, J. F. (1982): *Late miocene—earliest pliocene glaciation in southern Argentina: implications for global ice-sheet history*, Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 38/3-4, 185-206.
- MINISINI, D., TRINCARDI, F., ASIOLI, A. (2006): *Evidence of slope instability in the Southwestern Adriatic Margin*, Natural Hazards and Earth System Sciences, 6/1, 1-20.
- MUTTONI, G., CARCANO, C., GARZANTI, E., GHIELMI, M., PICCIN, A., PINI, R., ROGLEDI, S., SCIUNNACH, D. (2003): *Onset of major Pleistocene glaciations in the Alps*, Geology, 31/11, 989-992.
- NAKADA, M., LAMBECK, K. (1988): *The melting history of the Late Pleistocene Antarctic ice sheet*, Nature, 333, 36-40.
- NOCQUET, J. M., CALAIS, E. (2003): *Crustal velocity field of western Europe from permanent GPS array solutions, 1996–2001*, Geophysical Journal International, 154, 72-88.
- OGORELEC, B. (1987): *Sedimentary features of the Upper Triassic (Norian and Rhaetian) rocks of the Dinaric carbo-nate platform (SW Slovenia)*, in: Proceedings of the International Symposium on Evolution of the Karstic Carbonate Platform: relation with other periadriatic carbonate platforms, (eds. Costa, E., Cuchi, F., Pugliese, N.), Università degli studi di Trieste, Istituto di geologia e paleontologia., Trieste, 45-45.
- PAVELIĆ, D. (2005): *Stratigrafska determinacija naslaga jadranskog podmorja u okolici Pelješca*, Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb, neobjavljeno.
- POLŠAK, A. (1965): *Stratigrafija jurskih i krednih naslaga srednje Istre (Stratigrafie des couches jurassiques et crétacées de l'Istrie centrale)*, Geološki. vjesnik, 18/1, 167–184.
- POLŠAK, A. (1981): *Upper Cretaceous biolithitic complexes in a subduction zone: examples from the Inner Dinarides, Yugoslavia*, in: European Fossil Reef Models, (ed: Toomey, D. F.), SEPM Spec. Publ. Soc. Econ. Paleon. Min., Tulsa, 30, 447-472.
- PRELOGOVIĆ, E., KRANJEC, V. (1983): *Geološki razvitak područja Jadranskog mora*, Annals of Maritime Studies, 21, 387-405.
- RAIĆ, V., PAPEŠ, J., AHAC, A., KOROLIJA, B., BOROVIĆ, I., GRIMANI, I., MARINČIĆ, S. (1980): *Osnovna geološka karta SFRJ, 1:100000, list Ston K 33-48 (Basic Geological Map 1:100000, Stone sheet K 33-48)*, "Geoinženjering" – OOUR Institut za geologiju Sarajevo (1972-1980) and Institut za geološka istraživanja Zagreb (1967-1968), Savezni geološki zavod, Beograd, Beograd.
- RIO, D., CHANNEL, J. E. T., BERTOLDI, R., POLI, M. S., VERGERIO, P. R., RAFFI, I., SPROVIERI, R., THUNELL, R. C. (1997): *Pliocene sapropels in the northern Adriatic area: Chronology and paleoenvironmental significance*, Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology, 135, 1-25.
- SHEPARD, F. P. (1954): *Nomenclature based on sand-silt-clay ratios*, Journal of Sedimentary Petrology, 24, 151-158.
- SIKORA, M., MIHANOVIĆ, H., VILIBIĆ, I. (2014): *Paleo-coastline of the Central Eastern Adriatic Sea, and Paleo-Channels of the Cetina and Neretva rivers during the last glacial maximum*, Acta Adriatica., 55/1, 3-18.

- SOKAČ, B., ŠUŠNJAR, M., BUKOVAC, J., BAHUN, S. (1976): *Osnovna geološka karta SFRJ, tumač za list Udbina (Basic Geological Map of Yugoslavia, Guide for sheet Rovinj – in Croatian)*, Croatian Geological Survey, Zagreb, pp. 62.
- SREMAC, J. (2005): *Equatorial shelf of the Palaeozoic supercontinent – cradle of the Adriatic Carbonate Platform*, *Geologia Croatica*, 58/1, 1-19.
- SREMAC, J. (2012): *Influence of terrestrial sedimentation in Pennsylvanian rocks of Croatia*, *Geologia Croatica*, 65/3, 273-282.
- STANLEY, D. I. (1995): *A global sea level curve for the late Quaternary: the impossible dream?*, *Marine Geology*, 125, 1-6.
- SURIĆ, M., JURAČIĆ, M., HORVATINČIĆ, N., KRAJCAR BONIĆ, I. (2005): *Late Pleistocene-Holocene sea level rise and pattern of coastal karst inundation: records from submerged speleothems along the Eastern Adriatic Coast (Croatia)*, *Marine Geology*, 214, 163-175.
- SURIĆ, M. (2009): *Reconstructing sea-level on the eastern Adriatic Sea (Croatia) - an overview*, *Geoadria*, 14/2, 181-199.
- ŠUŠNJARA, A., SAKAČ, K., JELEN, B., GABRIĆ, A. (1992): *Upper Permian evaporites and associated rocks in Dalmatia and borderline area of Lika and Bosnia*, *Geologia Croatica*, 45, 95-114.
- TIŠLJAR, J. (1983): *Coated grains facies in the Lower Cretaceous of the Outer Dinarides (Yugoslavia)*, in: *Coated Grains*, (ed. Peryt, T.), Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 566-576.
- TIŠLJAR, J. (1992): *Origin and depositional environments of the evaporite and carbonate complex (Upper Permian) from the central part of the Dinarides (Southern Croatia and Western Bosnia)*, *Geologia Croatica*, 45, 115-126.
- TIŠLJAR, J., VLAHOVIĆ, I., VELIĆ, I., SOKAČ, B. (2002): *Carbonate platform megafacies of the Jurassic and Cretaceous deposits of the Karst Dinarides*, *Geologia Croatica*, 55/2, 139-170.
- TURK, M. (1971): *Građa tercijarnog bazena u sjeveroistočnom dijelu Jadranskog mora*, *Nafta*, 22/4-5, 275-434.
- VELIĆ, I., TIŠLJAR, J., SOKAČ, B. (1987): *The variability of thicknesses of the Aptian and Albian carbonates as a consequence of changing depositional environments and emersions*, in: *Proceedings of the International Symposium on Evolution of the Karstic Carbonate Platform: relation with other periadriatic carbonate platforms*, (ed. Costa, E., Cuchi, F., Pugliese, N.), Università degli studi di Trieste, Istituto di geologia e palenontologia, Trieste, 59-62.
- VELIĆ, J., MALVIĆ, T. (2011): *Depositional conditions during Pliocene and Pleistocene in Northern Adriatic and possible lithostratigraphic division of these rocks*, *Nafta*, 62/1-2, 25-38.
- VELIĆ, I., VLAHOVIĆ, I., MATIČEC, D. (2002): *Depositional sequences and palaeogeography of the Adriatic Carbonate Platform*, *Memorie Società Geologica Italiana*, 57, 141-151.
- VELIĆ, J., KLJAJO, D., VELIĆ, I. (2011): *Sedimentary bodies, forms and occurrences in the Tudorevo and Mirovo glacial deposits of northern Velebit (Croatia)*, *Geologia Croatica*, 64/1, 1-16.
- VELIĆ, J., MALVIĆ, T., CVETKOVIĆ, M., VELIĆ, I. (2015): *Stratigraphy and petroleum geology of the Croatian part of the Adriatic Basin*, *Journal of Petroleum Geology*, 38/3, 281-300.
- Some aspects of the shallow water sedimentation on the Adriatic carbonate platform (Permian to Eocene)*, (ur. Velić, I., Vlahović, I.), *The Second International Symposium on the Adriatic Carbonate Platform – Relations with Adjacent Regions*, Excursion Guide-Book, Zagreb, Institut za geologiju, 1991, pp. 121.
- VLAHOVIĆ, I., TIŠLJAR, J., VELIĆ, I., MATIČEC, D. (2005): *Evolution of the Adriatic Carbonate Platform: Palaeogeography, main events and depositional dynamics*, *Palaeogeography Palaeoclimatology Palaeoecology*, 220/3-4, 333-360.
- WARD, S. N. (1994): *Constraints on the seismo-tectonics of the central Mediterranean from very long baseline interferometry*, *Geophysical Journal International*, 117, 441-452.
- YOKOYAMA, Y., DE DECKKER, P., LAMBECK, K., JOHNSTON, P., FIFIELD, L. K. (2001): *Sea-level at the Last Glacial Maximum: evidence from northwestern Australia to constrain ice volumes for oxygen isotope stage 2*, *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 165, 281-297.