

# Procjena dubine granice odobalnog transporta sedimenta na plaži Dugi Rat na temelju sastava sedimenta

---

Mikičić, Ivan

Master's thesis / Diplomski rad

2020

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:164993>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-28**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno – matematički fakultet  
Geološki odsjek

**IVAN MIKIČIĆ**

**PROCJENA DUBINE GRANICE ODOBALNOG TRANSPORTA  
SEDIMENTA NA PLAŽI DUGI RAT NA TEMELJU SASTAVA  
SEDIMENTA**

Diplomski rad  
predložen Geološkom odsjeku  
Prirodoslovno – matematičkog fakulteta  
Sveučilišta u Zagrebu  
radi stjecanja akademskog stupnja  
magistra geologije

Zagreb, 2020.

Ovaj diplomski rad izrađen je na geološkom odsjeku pod vodstvom mr. Kristine Pikelj u sklopu diplomskog studija Geologija zaštite okoliša na Prirodoslovno – matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

## **Zahvala**

*Veliku zahvalnost upućujem svojoj mentorici dr. sc. Kristini Pikelj na pomoći pri odabiru teme, pronalaženju znanstvene literature i njenim dragocjenim savjetima na terenu. No prije svega velika hvala na dostupnosti, razumijevanju i strpljenju.*

*Zahvaljujem svim profesorima koji su mi predavali tijekom studija na razumijevanju i riječima potpore te su mi na taj način pomogli da ustrajem u studiranju i steknem znanja koja ću moći upotrijebiti u svom daljnjem životu.*

*Velika hvala mojoj obitelji koja mi je omogućila studiranje, poticala me i bila uz mene u svakom trenutku.*

*Posebnu zahvalu upućujem mojem pokojnom djedu i baki koji nisu dočekali ovaj dan. Bili su mi uzori cijelog mog života. Gradili su moje samopouzdanje, vjerovali u mene kad ni ja sam nisam i zbog njih sam ono što sam danas – bolji čovjek.*

*Vi ne znate moj bijeli Sipar i moje žalo  
gdje sam kao dijete malo  
letio za snima, lovio leptire  
tražio školjke po žalu  
čudio se vjetru i valu i moru  
i čekao kad ću na Učku goru  
da vidim vile i vilenjake  
što na krilatim konjima  
love sunčane trake.  
Vi ne znate Sipar i žalo  
moje carstvo malo  
kao starac ne smijem tamo.*

*Rikard Katalinić Jeretov*

# TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno – matematički fakultet  
Geološki odsjek

## Diplomski rad

PROCJENA DUBINE GRANICE ODOBALNOG TRANSPORTA SEDIMENTA NA  
PLAŽI DUGI RAT NA TEMELJU SASTAVA SEDIMENTA

IVAN MIKIČIĆ

**Rad je izrađen:** Geološko – paleontološki zavod PMF-a, Horvatovac 102A, 10000 Zagreb

**Sažetak:** Procjena granice dubine odobalnog transporta sedimenta je ključni koncept u razumijevanju morfodinamike plaža. U ovom radu je po prvi put rađena procjena DoC u RH i to na temelju granulometrijskog sastava i porijekla zrna sedimenta. Za usporedbu su korištene i jednadžbe za izračunavanje DoC dostupne u literaturi. Rezultati sastava sedimenta su ukazali da se procijenjeni DoC nalazi u rasponu dubina od 1,2 m do 3,4 m. Dubine DoC dobivene jednadžbama su pliće i kreću se u rasponu od 0,4787 do 0,7611 m i smatra se da su te dubine podcijenjene kad je u pitanju plaža u Dugom Ratu. Takvi rezultati mogu biti odraz korištenih valnih parametara koji nisu mjereni, već modelirani. Primjenjena metoda procjene DoC na temelju karakteristika sedimenta realnije ukazuje na dubinu DoC na istraživanoj plaži u Dugom Ratu.

**Ključne riječi:** plaža, DoC, granulometrijski sastav sedimenta

**Rad sadrži:** III + 46 stranica, 22 slike, 7 tablica, 29 referenci

**Jezik izvornika:** hrvatski

**Rad je pohranjen u:** Središnja geološka knjižnica PMF-a, Horvatovac 102A, 10000 Zagreb

**Mentor:** doc. dr. sc. Kristina Pikelj

**Ocjenjivači:** doc. dr. sc. Kristina Pikelj  
prof. dr. sc. Marijan Kovačić  
doc. dr. sc. Karmen Fio Firi

**Rad prihvaćen:** 07. veljače 2020.

## BASIC DOCUMENTATION CARD

University of Zagreb  
Faculty of Science  
Department of Geology

### Master thesis

ESTIMATION OF DEPTH OF CLOSURE OF THE DUGI RAT BEACH BASED ON  
SEDIMENT COMPOSITION

IVAN MIKIČIĆ

**Thesis completed in:** Department of Geology, Faculty of Science, Horvatovac 102A, 10 000 Zagreb

**Abstract:** Estimation of Depth of Closure is a key concept in understanding of beach morphodynamics. This thesis was the first attempt to estimate DoC in Republic of Croatia based on granulometric composition and origin of sediment. Equations for calculation of DoC available in literature were used to compare results obtained by sediment analysis. Results of sediment composition indicated that estimated DoC is in depth range of 1.2 m to 3.4 m. Depths of estimated DoC obtained by equations are shallower and range from 0.4787 m to 0.7611 m and are considered underestimated for the investigated beach. These results may reflect the usage of modeled wave parameters instead of measured ones. Applied method for estimation of DoC based on sediment characteristics gives more realistic indication of DoC on investigated beach in Dugi Rat.

**Keywords:** Beach, DoC, granulometric composition of sediment

**Thesis contains:** III + 46 pages, 22 figures, 7 tables, 29 references

**Original in:** Croatian

**Thesis deposited in:** Central Geological Library, Faculty of Science, Horvatovac 102A, 10000 Zagreb

**Supervisor:** doc. dr. sc. Kristina Pikelj

**Reviewers:** doc. dr. sc. Kristina Pikelj  
prof. dr. sc. Marijan Kovačić  
doc. dr. sc. Karmen Fio Firi

**Thesis accepted:** February 07<sup>th</sup> 2020

## Sadržaj

1.	UVOD .....	1
2.	PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA .....	3
2.1.	Erozija plaža.....	3
2.2.	Granica dubine odobalnog transporta sedimenta .....	6
3.	GEOLOŠKE, GEOMORFOLOŠKE I GEOGRAFSKE KARAKTERISTIKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA .....	9
3.1.	Geološki razvoj istočne obale Jadranskog mora .....	9
3.2.	Geološke i geomorfološke karakteristike područja Dugi Rat.....	10
3.3.	Geografske karakteristike Dugog Rata.....	12
3.3.1.	Plaža Dugi Rat.....	14
4.	MATERIJALI I METODE .....	16
4.1.	Uzorkovanje .....	16
4.2.	Laboratorijska mjerenja i analize .....	19
4.2.1.	Morfometrijska analiza .....	19
4.2.2.	Granulometrijska analiza.....	21
4.2.3.	Pregled sedimenta metodom mikroskopiranja .....	23
4.2.4.	Statistička analiza.....	24
4.2.5.	Određivanje DoC na temelju sastava sedimenta .....	25
4.2.6.	Određivanje DoC na temelju analitičke kalkulacije.....	26
5.	REZULTATI.....	28
5.1.	Granulometrijska analiza.....	28
5.2.	Pregled sedimenta metodom mikroskopiranja .....	35
5.3.	Rezultati procjene DoC na temelju analitičke kalkulacije .....	36
6.	RASPRAVA .....	37
7.	ZAKLJUČAK .....	41
8.	LITERATURA.....	43



## 1. UVOD

Od najranije ljudske povijesti ljudi su obalni okoliš percipirali kao pogodan za život. Razlog tome leži u bogatstvu prirodnih resursa (pitke vode, plodnog tla te biljnih i životinjskih vrsta) što im je omogućilo zadovoljavanje životnih potreba. Čovjek nije značajno utjecao na odvijanje prirodnih procesa na obali već je razvijao gospodarske aktivnosti koje su bile usko povezane s postojećim resursima (poljoprivreda, ribarstvo, pomorstvo, trgovina i dr.). Industrijska revolucija, znanstvene inovacije i izgradnja prometne infrastrukture potaknuo je promjene koje su se najčešće pozitivno odrazile na životni standard velikog broja ljudi, dok je istodobno stanje prirodnih sastavnica okoliša postajalo sve lošije (Marušić, 2017). Najveće promjene u obalnom okolišu nastale su procesom litoralizacije. Marušić (2017) navodi da su se od početka 20. stoljeća, a posebice nakon Drugog svjetskog rata, kontinuirano izmjenjivale aktivnosti ili gospodarske djelatnosti koje su u datom razdoblju najviše utjecale na promjenu okoliša, vrlo često negativno. Poljoprivreda, industrijalizacija, urbanizacija i betonizacija su aktivnosti kojima čovjek osim što mijenja prirodne sastavnice okoliša intenzivira i prirodne procese kao što je erozija prilikom koje dolazi do gubitka materijala od kojih je obala građena te na taj način „nestaje“ kopno koje u obalnom prostoru čini važan gospodarski resurs. Intenzitet erozije obala ovisi o stijenskom sastavu obale, energiji valova, morfologiji plaža (ako su prisutna na nekoj obali), smjeru vjetrova i njima generiranim valovima u odnosu na obalu te njihovoj jačini, zatim veličini zrna sedimenta, rasponu morskih mijena i općenito trajanju perioda prijenosa značajnih količina energije na kopno (Anthony, 2005).

Plaže su dio obalnog okoliša i često su percipirana kao prostori rekreacije, odmora i provođenja slobodnog vremena no one predstavljaju i važan prirodni i gospodarski resurs te prepoznatljiv turistički proizvod. Erozija plaže može biti rezultat bilo kojeg prirodnog ili antropogenog utjecaja na donos sedimenta te njegov uzdužni ili poprečni transport na obali (Bird, 1996). Isti autor također navodi da su istraživanja ukazala da je tendencija većine svjetskih plaža, njih 70% erozija. Ovaj podatak ukazuje da je erozija obale (a osobito plaža) intenzivirana ljudskim djelovanjem važan segment koji ima dalekosežne posljedice ne samo u gospodarskom smislu već i ekološkom, biološkom te estetskom narušavanju izgleda prostora. Uzimajući sve navedeno u obzir ovom problemu se mora pristupiti sustavno u svrhu postizanja održivog razvoja.

U svrhu rješavanja problema erozije plaža, ali i povećanja kupališnih kapaciteta često se pristupa prihranjivanju ili nasipanju prirodnih plaža te gradnji umjetnih plaža. Ovaj trend

je prisutan i na hrvatskoj obali. Za racionalno rješavanje ovog izazova potrebno je odabrati hidrodinamički povoljne pozicije te izvršiti adekvatan izbor materijala za nasipavanje. Lošim izborom dovodi se do materijalnih šteta (odnošenje nasipanog materijala u dubinu) te degradacije krajobraza i biocenoze morskog dna (Lončar i dr., 2016). Uzimajući sve navedeno u obzir ovom problemu se mora pristupiti sustavno u svrhu postizanja održivog razvoja. Jedan od temeljnih koncepata u obalnom inženjerstvu je dubina granice odobalnog transporta sedimenta (eng. *Depth of Closure* ili skraćeno DoC) koji je između ostalog važnu primjenu našao i u planiranju očuvanja plaža (nasipavanja), ali i zaštiti infrastrukture odnosno objekata koji mogu biti ugroženi erozijom obale.

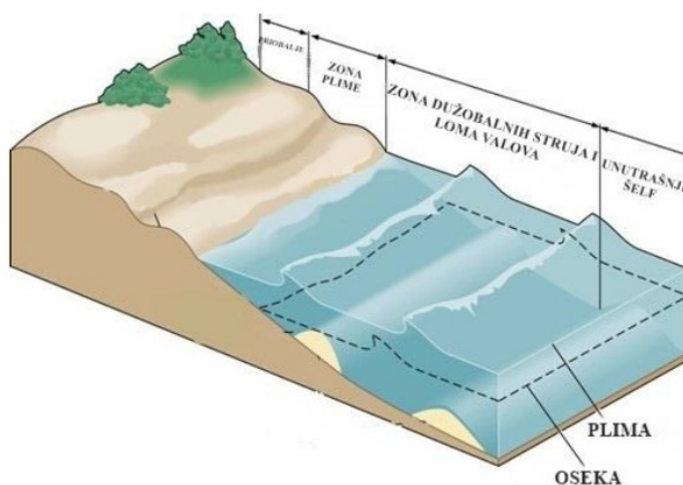
Cilj ovog diplomskog rada je procjena dubine do koje je došao sediment kojim je nasipana umjetna plaža u Dugom Ratu u svrhu određivanja dubine granice odobalnog transporta sedimenta te područja utjecaja tog sedimenta na morsko dno.

## 2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

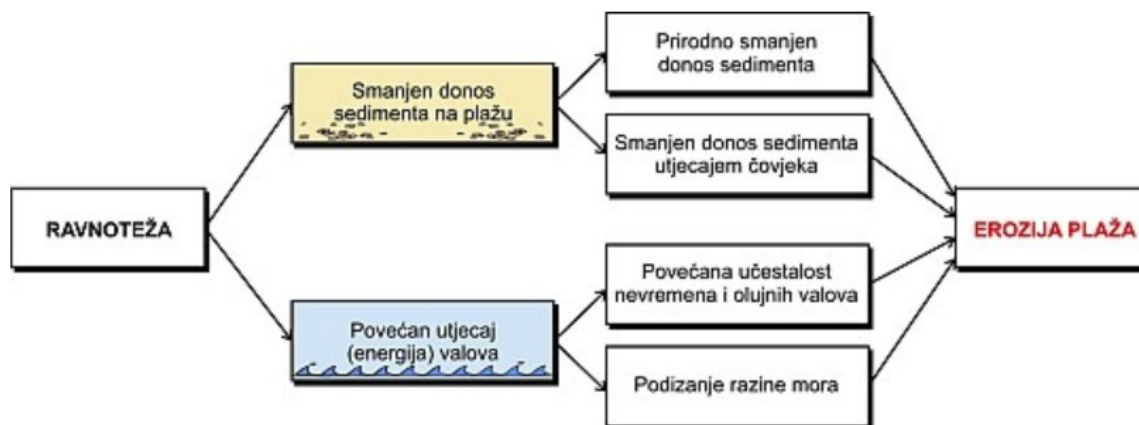
### 2.1. Erozijska plaža

Williams i Micaleff (2009) plažu definiraju kao „*nakupinu nekonsolidiranog materijala (npr. pijeska, šljunka, gline – ili njihova mješavina) koja se proteže od kopnenog ruba plaže, što može biti padina sipine ili valobran, do dubine mora na kojoj nema značajnih kretanja sedimenta*“. Plaže su područja direktnog kontakta kopna i mora, pohranjivanja i transporta sedimenta te predstavljaju zaštitu obale ublažavanjem djelovanja valova. Posljednjih desetljeća plaže su područja intenzivnih promjena koje su pod utjecajem prirodnih ili antropogenih čimbenika. Prirodni čimbenici su visokoenergetski valovi, morske mijene, morske struje, porast razine mora, vrsta i količina transportiranog sedimenta i dr.

Benac (2016) navodi da je „*marinska erozija egzodinamički proces koji označuje mehaničko i kemijsko razaranje obala hidrodinamičkim djelovanjem valova i struja, struganja pokrenutog materijala, kemijskim djelovanjem vode i radom organizama koji žive na obalama*“. Erozijski je prirodan i neizbježan proces koji se neprestano odvija u obalnom području no posljednjih desetljeća je intenziviran ljudskim djelovanjem. Erozijsko djelovanje (odnošenje materijala) pojavljuje se uglavnom u zoni *swash* (oplićavanja) vala s intenzitetom ovisnim o učestalosti pojedinih incidentnih valnih spektara tijekom promatranog razdoblja. Erodirani materijal se „odvlači“ u veće dubine, gdje se sedimentira i kao takav predstavlja gubitak – trošak nasipnog materijala plaže (Lončar i dr., 2016).



Slika 1. Prikaz profila plaže (Prema: Brooks i Cole, 2005)

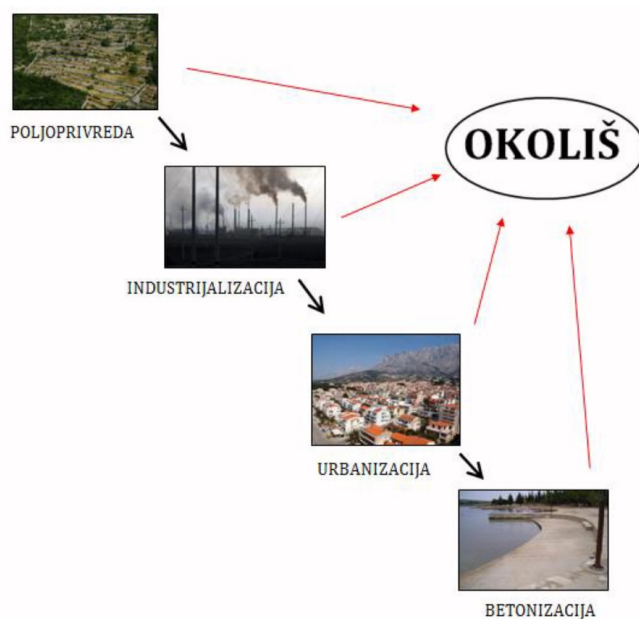


Slika 2. Osnovni procesi koji dovode do erozije plaža

Internetski izvor 1.

Prirodni čimbenici koji dovode do erozije su visokoenergetski valovi, morske mijene, morske struje, porast razine mora, vrsta i količina transportiranog sedimenta i dr. Prijenos sedimenta se odvija okomito na obalu i uzduž linije obale. Transport sedimenta okomito na liniju obale je rezultat djelovanja valova (osobito tijekom zimskih oluja) i očituje se odnošenjem sedimenta s plaže na morsko dno. Uzdužni transport sedimenta se odvija litoralnim pomakom ili *driftom* koji se odvija u zoni uspinjanja vala gdje valovi podižu sediment i prenose ga u smjeru njihovog nailaska te ga okomito na obalu povlače natrag u more. Turbulencije unutar zone vala zatim miješaju materijal u suspenziju koju odnose struje paralelne s obalom (SPO) (Maleš, 2017).

Antropogeno djelovanje na obalni okoliš je potaknuto porastom stanovništva te razvojem gospodarskih djelatnosti kao što je turizam gdje plaže predstavljaju vrijedan turistički proizvod i gospodarski resurs. No pretjerano iskorištavanje prirodnih sastavnica okoliša te djelovanje čovjeka u prilagodbi prostora potrebama razvoja gospodarstva je sveprisutni trend tijekom 20. stoljeća koji nije zaobišao ni istočnu obalu Jadranskog mora, gdje se nalazi istraživano područje (Slika 3).



Slika 3. Prevladavajući pritisci koji su tijekom 20. stoljeća utjecali na okoliš srednjodalmatinskog priobalja (shematski prikazano od najranije do najkasnije faze) (Marušić, 2017)

U zaštiti obalnog prostora, a time i plaža, često se pristupa stabilizaciji prostora obale. Charlier i Meyer (1995) dijele pristupe stabilizaciji obale na „tradicionalne“ i „mekе“. Tradicionalni pristup uključuje gradnju pera (*groynes*), razbijača valova (*breakwaters*) i obalnih zidova (*seawalls*). Grade se okomito ili paralelno s obalom. Nedostatci ovog pristupa su skupo održavanje i popravak oštećenja uslijed djelovanja valova koji potkopavaju strukturu. Meki pristup se odnosi na periodično nasipavanje materijala (pijeska ili šljunka) na plažu. Ovaj pristup zahtijeva dobro poznavanje hidrodinamičkih i morfoloških procesa i vrsta sedimenta u prostoru gdje se planira provesti nasipavanje. Vrlo važan čimbenik je odabir materijala kojim će se nasipavati jer mora biti što sličniji sedimentu od koje je plaža građena. Ovaj oblik zaštite od erozije je također skup, ali se smatra potencijalno poželjnim oblikom zaštite, jer je u većoj mjeri u skladu s prirodnim obalnim procesima.

## 2.2. Granica dubine odobalnog transporta sedimenta

Granica dubine odobalnog transporta sedimenta je ključan teorijski koncept u razumijevanju morfodinamike obala i često se koristi u istraživanjima plaža. U tim istraživanjima koristi se za evaluaciju budžeta sedimenta plaže, istraživanja morfodinamike, identificiranje aktivne zone donosa sedimenta za prihranjivanje te planiranje i dizajnu obalnih struktura za zaštitu obale. Ovaj koncept se odnosi na:

- a) empirijski doseg/granicu značajnog odobalnog poprečnog transporta sedimenta prema Kraus i dr. (1998)
- b) odobalnu prijelaznu zonu u kojoj je utjecaj valova na morsko dno i transport sedimenta značajno manji u odnosu na surf zonu valova ili višoj zoni obalnog lica,
- c) prijelaznu geološku zonu.

Kraus (1998) definira DoC *kao najveću dubinu kopna prema moru gdje nema značajnije promjene u odizanju morskog dna i značajnijeg priobalnog i odobalnog transporta sedimenta u određenom ili karakterističnom vremenskom intervalu*. Pojam DoC je teorijski koncept koji se koristi za razgraničavanje dviju zona različite morfodinamske aktivnosti duž profila plaže u kratkom ili srednje dugom vremenskom periodu (1 – 10 godina); gornje obalno lice se opisuje kao područje gdje se zamjećuju značajne promjene profila plaže, dok je donje obalno lice područje koje se pruža od granice značajnije promjene do baze vala gdje je morfološka promjena zanemariva (ili unutar nesigurnih granica) (Valiente i dr., 2018). Za procjenu morfološke dubine granice odobalnog transporta korišteno je nekoliko pristupa istraživanjima koji se mogu podijeliti na direktne i indirektne metode.

*Direktne metode* su temeljene na promatranjima morfoloških podataka koji definiraju anvelopu (skup) varijacija profila plaže koja se smanjuje sa dubinom. Analiza nizova profila je najefikasnija procjena DoC pri čemu su važna dva kriterija: fiksna promjena dubine (FDC) i standardna devijacija promjene dubine (SDDC). FDC definira DOC kao točku kod koje je varijacija dubine jednaka ili manja od prethodno odabranog kriterija usporedbe za dva profila s iste lokacije. Odabrani kriterij usporedbe je vezan za točnost mjerenja kod izrade profila. SDDC definira DoC kao točku na kojoj standardna devijacija doseže konstantan „rep“ koji nije jednak nuli, a koji se često podudara s točnošću mjerenja tijekom izrade profila (Aragonés i dr., 2018). Ove metode istraživanja su se temeljile na usporedbi profila, ali zahtijevaju prikupljanje većeg skupa podataka kroz najmanje nekoliko godina s ponavljanjem istraživanja duž poprečnog presjeka plaže, što iziskuje mnogo

vremena te je relativno skupo. Nemogućnost mjerenja svih obala u adekvatnom intervalu uzoraka motivirao je istraživače na razvijanje *indirektnih metoda* koje se zasnivaju na hidrodinamici valova i karakteristikama sedimenta koji utječu na obalno lice.

Hallermaier (1977, 1981) je razvio prvi analitički pristup procjeni godišnjem DoC i maksimalnoj dubini aktivnosti dna (*DoC – motion*) na mikrotajdalnim (mikroplimnim) pješčanim plažama, pri čemu je koristio podatke valova za vrijeme ekstremnih uvjeta. Predložio je jednadžbu za određivanja DoC koja je rezultat laboratorijskih i terenskih istraživanja te ju je definirao kao vanjsku granicu litoralne zone gdje razlika skupova podataka ponavljanih profila iznosi manje od 0,3 metra:

$$DoC = 2,28H_{12,t} - 68,5\left(\frac{H_{12,t}^2}{gT_t^2}\right) \quad (1)$$

gdje je DoC pretpostavljeni DoC kroz period od  $t$  godina koji se odnosi na srednju vrijednost niske vode (Hinton i Nicholls, 1998),  $H_{12,t}$  predstavlja neprekidnu značajnu visinu vala koja premašuje za 12 sati za  $t$  period godina,  $T_t$  je vezani period vala i  $g$  je ubrzanje uslijed gravitacije.

Birkemeier (1985) navodi da izraz koji je predložio Hallermaier (1978) precjenjuje promatranja za oko 25% te predlaže prilagođeni izraz za DoC:

$$DoC = 1,75H_{12,t} - 57,9\left(\frac{H_{12,t}^2}{gT_t^2}\right) \quad (2)$$

Drugi autori su predlagali alternativne formule pojednostavljujući Hallermaierovu formulu pa su npr. Capobianco i dr. (1997) predložili izraz koji je samo funkcija za neprekidnu značajnu visinu vala koja premašuje 12 sati:

$$DoC = KH_{12,t}^{0,67} \quad (3)$$

gdje konstanta  $K$  ima vrijednost 3,4, 2,8 i 2,1 za maksimalnu vertikalnu varijaciju u profilu na 0,05 m, 0,1 m i 0,2 m kroz godinu do srednje dugog vremenskog perioda.

Jednadžbe (1), (2) i (3) omogućuju dobro predviđanje DoC na relativno izloženim, mikrotajdalnim (mikroplimnim) pješčanim obalama.

Sve navedene jednadžbe su primijenjene u praksi u istraživanjima DoC. Nicholls i dr. (1998a, 1998b) su usporedili podatke batimetrije i priobalne statistike valova kroz 12 godina na plaži Duck u Sjevernoj Karolini (SAD), kod koje je varijacije dubine jednaka ili manja od odabranog kriterija usporedbe, koristeći jednadžbu (1). Ustvrdili su da ona omogućuje konzervativnu procjenu godišnje vrijednosti granične dubine odobalnog transporta sedimenta za različite kriterije (maksimalna vertikalna varijacija od 0,06 m, 0,1 m i 0,15 m), ali uspješno predviđa granicu tijekom erozijskih događaja. Kasnije su Robertson i dr. (2008) testirali jednadžbe (2) i (3) koristeći promatranja mjerenih promjena na poluotoku Floridi i pokazali da se Hallermeierova formula temeljena na valovima najbolje poklapa sa promatranjima tog područja (Valiente i dr., 2019).

Metode koje se temelje na valovima su i dalje uobičajene i u širokoj upotrebi u predviđanju dubine granice odobalnog transporta. U literaturi se pojavljuju i novi pristupi kao npr. Robertson i dr., (2008) koji predlažu pristup odnosno metodu koja se temelji na utjecaju neerodiranog dna ili čvrstog terena upotrebom zračnih snimaka. Autori ovu metodu utemeljenu na promatranjima smatraju dobrim pristupom kod istraživanja područja gdje čvrsto dno ima važnu ulogu u određivanju dubine odobalnog transporta sedimenta. Hartman i Kennedy (2016) naglašavaju utjecaj morskih struja u procjeni DoC. Aragonés i dr. (2018) predlažu metodu određivanja DoC na temelju granulometrijskih karakteristika sedimenta.

U Hrvatskoj istraživanja dubine odobalnog transporta sedimenta do sada nisu provedena, te je ovo prvi takav pokušaj.



### 3. GEOLOŠKE, GEOMORFOLOŠKE I GEOGRAFSKE KARAKTERISTIKE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

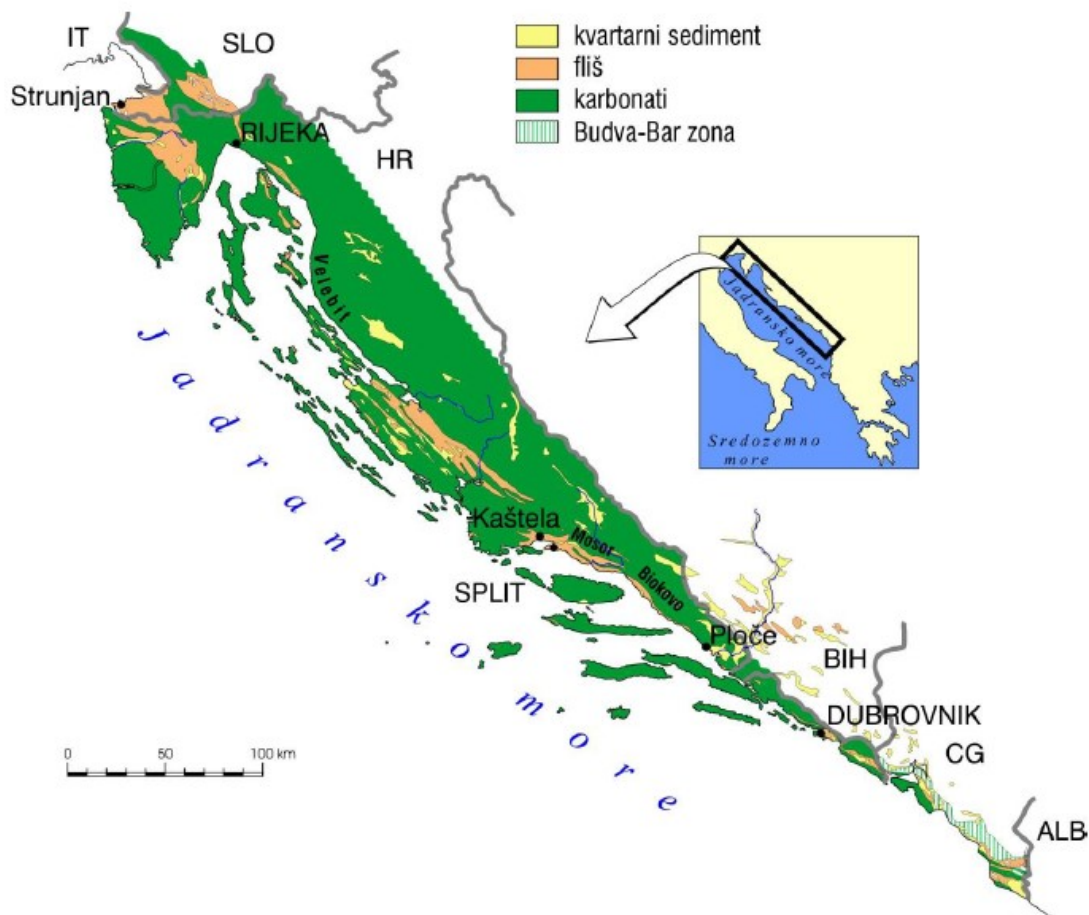
#### 3.1. Geološki razvoj istočne obale Jadranskog mora

Razni autori u literaturi istočnu obalu Jadranskog mora opisuju kao visoku i stjenovitu s malim brojem plaža (Barić i dr., 2008). Današnji reljef istočne obale Jadranskog mora je utemeljen prije 240 milijuna godina tijekom srednjeg trijasa kada je na izoliranoj platformi formiranoj na jadranskoj (Adria) ploči počela plitkomorska sedimentacija (Vlahović i dr., 2005). Tijekom mezozoika i ranog paleogena nastavila se plitkomorska sedimentacija karbonata u nekoliko faza što je rezultiralo nekoliko kilometara debelim (i do 8 km) karbonatnim (vapnenaca i dolomita) naslagama (Vlahović i dr., 2005). Na prijelazu iz krede u rani paleogen uslijed pojačane sinsedimentacijske kompresijske tektonike s maksimalnim pritiskom u smjeru jugozapad – sjeveroistok dolazi do prekida plitkomorske sedimentacije te započinje izdizanje Dinarida. Uslijed tih kretanja formirani su flišni bazeni uglavnom tijekom eocena (Pikelj i Juračić, 2013).

Korbar (2009) navodi da je današnji tektonski okvir u području istočnog Jadrana započeo u razdoblju od miocena do donjeg pliocena. Karakteriziraju ga rasjedi, bore i navlačne strukture s glavnim smjerom pružanja sjeverozapad – jugoistok (tzv. Dinarsko pružanje); paralelni s istočnom obalom Jadranskog mora. Moccochain i dr. (2009) iznose svoju pretpostavku da su izdignute i vrlo tektonizirane uglavnom karbonatne strukture bile okršavane od miocena.

Konačni izgled istočna obala Jadranskog mora je poprimila na prijelazu iz kasnog pleistocena u rani holocen. Uslijed porasta razine mora krški reljef je bio djelomično potopljen. Vrhovi nekadašnjih primorskih planina su postali otoci (antiklinale) koji prate smjer planina na kopnu dok su kopnene doline postale zaljevi i morski kanali. U svjetskoj literaturi ovaj tip obale se naziva „dalmatinski tip obale“ (Fairbridge, 1968).

U litologiji ovog područja (Slika 4) većina otoka i kopnene obale (preko 90% dužine) grade mezozojski karbonati (vapnenci, dolomiti i karbonatne breče) koje su djelomično prekrivene boksitom i zemljom crvenicom tzv. „*terra rossa*“. Manji udio u građi (oko 6% ukupne duljine) zauzima eocenski fliš (izmjena lapora, prahovnjaka, pješčenjaka i karbonatnih breča). Naslage fliša i karbonata su mjestimice prekrivene sedimentima kvartarne starosti. Izuzetno mali dio istočne obale Jadrana je građen od magmatskih stijena i piroklastita (otoci Jabuka i Brusnik te Komiža na otoku Visu) (Pikelj i Juračić, 2013).



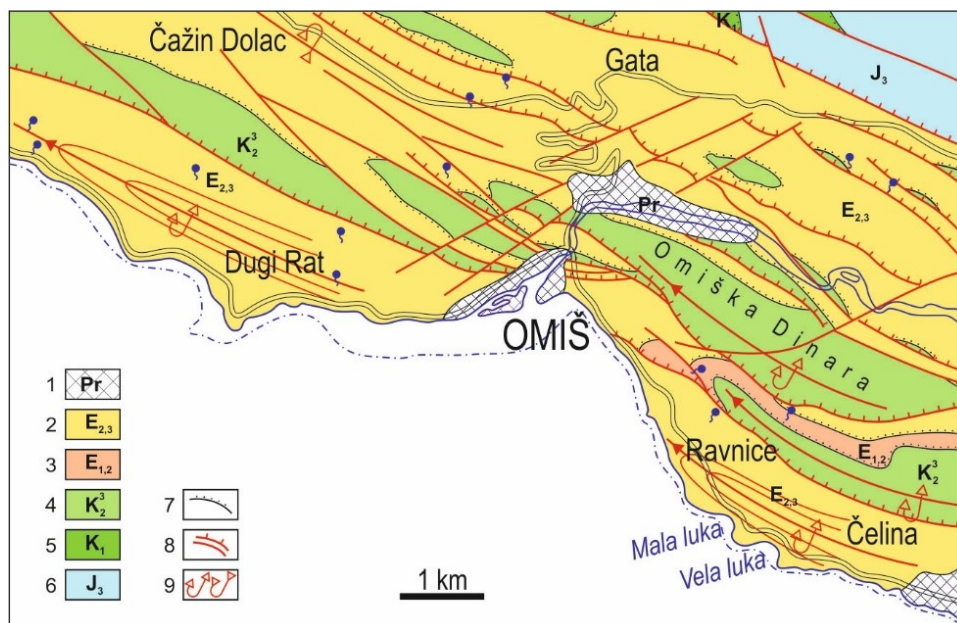
Slika 4. Politička i pojednostavljena litološka karta istočne obale Jadrana  
(Pikelj i Juračić, 2013)

### 3.2. Geološke i geomorfološke karakteristike područja Dugi Rat

Recentni tektonski sklop šireg istraživanog područja pripada Vanjskim Dinaridima i karakteriziran je visokim stupnjem tektonske poremećenosti uslijed složenih geoloških zbivanja koja su trajala od mezozoika do danas. U geomorfološkoj regionalizaciji Republike Hrvatske ovo područje je dio geomorfološke regije *Gorski hrbat Mosora s podgorjem i grede Kozjaka i omiške Dinare s pobrdima* (Bognar, 2011). Prostor je izgrađen pretežito od karbonatnih i klastičnih naslaga mezozojske i kenozojske starosti (Marinčić i dr., 1977). Osnovna strukturna karakteristika je pružanje svih deformacijskih oblika u smjeru sjeverozapad – jugoistok (dinarsko pružanje). Kontinuirana plitkovodna sedimentacija karbonata odvijala se tijekom mezozoika na plitkoj i stabilnoj karbonatnoj platformi. Kraj mezozoika obilježila je laramijska orogeneza kad je mezozojski sedimentacijski prostor razbijen nizom manjih kordiljera na čijim rubovima su se taložile klastične naslage

(Marinčić i sur., 1977). Prijelaz iz krede u paleogen je obilježen periodom emerzije (najčešće boksitima) na svim dijelovima Jadranske (Adria) karbonatne platforme. U donjem paleogenu regionalna transgresija je omogućila taloženje breča i pločastih vapnenaca. Tijekom donjeg i srednjeg eocena talože se foraminiferski vapnenci koji u srednjem eocenu dolaze u emerziju. Tijekom eocenskih tektonskih faza učestali orijentirani potisci prevrću i natiskuju stare strukture što rezultira formiranjem ljuskave građe, terena i navlaka. Vapnenci senona na južnim padinama Mosora tvore prevrnutu antiklinale reversno natisnute tektonski reduciranim krilima na eocenski fliš (Marinčić i dr., 1977).

Uže područje istraživanja Dugog rata i drugih naselja uz obalu dominantno izgrađuju flišne naslage srednjeg do gornjeg eocena. Naslage malma grade debelo uslojeni oolitični vapnenci ( $J_3$ ) koji na Mosoru izgrađuju jezgru antiklinalne strukture. Slabo uslojeni vapnenci senona ( $^3K^3_2$ ) su najrasprostranjenije unutar krednih naslaga. Na južnim padinama Mosora u području na kojem su rasprostranjene paleogene naslage tvore antiklinale. Pretežno su gromadasti, svijetlosivi sa sporadičnim ulošcima dolomita. Srednje – eocenske breče i brečo – konglomerati s fragmentima foraminiferskog vapnenca ( $^1E_{2,3}$ ) tvore erozijsko – diskordantnu granicu prema senonskim slabouslojenim vapnencima. Ovaj kompleks izgrađuju uslojene breče s tanjim lećama lapora. Ovaj transgresivni član označava početak taloženja srednjeeocenskog fliša. Tanko uslojeni eocenski kalkareniti ( $^2E_{2,3}$ ) karakteriziraju postupnu alteraciju iz breča u fliš ( $^3E_{2,3}$ ) koje nalazimo od zapadnih padina Mosora i koji se u najvećoj mjeri izdanjuje u istraživanom području Dugog Rata i okolice. Fliš izgrađuju pješčenjaci i dendritični vapnenci u izmjeni s laporima koji nisu uslojeni. U području Sv. Martina do Krila rasprostranjene su kvartarne breče (Pr) koje su trošeni materijali karbonatno – klastičnih stijena jurske, kredne ili tercijarne starosti akumulirani u hipsometrijski nižim područjima (Marinčić i dr., 1977).



Slika 5. Pojednostavljena geološka karta područja Dugi Rat.

Litološke jedinice su opisane u tekstu (prema Marinčić i dr., 1976)

### 3.3. Geografske karakteristike Dugog Rata

Dugi Rat je općina u srednjoj Dalmaciji, 15 kilometara jugoistočno od Splita. Prostire se na 10,44 km<sup>2</sup> od vrha planine Mosor do obale Bračkog kanala. Općinu uz Dugi Rat (koji je i administrativno središte) čine još i naselja Duće i Jasenice. Prema posljednjem popisu stanovništva iz 2011. godine u općini Dugi Rat živi 7.092 stanovnika. Obalna naselja u općini povezuje Jadranska magistrala u dužini od oko 9 kilometara od ušća Cetine na istoku do općine Podstrana na sjeverozapadu (Baučić, 2000).

Dugi Rat se kao naselje javlja kasno i njegov razvoj je vezan uz gradnju tvornice kalcijeva karbida i kalcijeva cijanamida 1908. godine. Rad tvornice je značajno utjecao razvoj naselja i zapošljavanje ali je imao i negativan utjecaj na okoliš uslijed nepropisnog odlaganja otpada te onečišćenja zraka zbog nekorištenja filtera na dimnjacima (Marušić, 2017). Tvornica je obustavila proizvodnju ali je znatno ograničila mogućnost razvoja turizma pa je 2014. godine donesen *Sanacijski program tvorničkog kruga bivše tvornice ferolegura u Dugom Ratu* nakon koje bi se taj prostor prenamijenio u turističku zonu. Daljnji napredak donijela je izgradnja Jadranske magistrale 60-tih godina koja je trasirana uz obalu te je omogućila bolju prometnu povezanost ali i razvoj turizma. Zanimljivo je da su se na području Dugog Rata istovremeno razvijale dvije različite gospodarske grane (industrija i turizam) koje su trošile iste prirodne resurse.

Turizam je postao glavna gospodarska grana, a antropogene aktivnosti u cijelom su se području intenzivirale i značajno ga preobrazile. Mala agrarno – stočarska naselja, u prošlosti smještena na padinama, podalje od mora, danas su napuštena, a nova središta kupališnog turizma osnovana su na obali. To se ogleda u povećanom broju građevinskih radova nedaleko od mora, pretežno izgradnji kuća i apartmana, ali i izgradnji različitih obalnih konstrukcija duž same obalne linije. Prilikom izgradnje jadranske magistrale i kuća čiji su temelji usijekali u strme padine, velika se količina materijala (pretežno flišnog) odlagala u užem obalnom prostoru. Na taj način već jako rano ljudske aktivnosti ometaju prirodne procese i prirodni razvoj plaža (Rajčić i dr., 2010).

U reljefu općine Dugi Rat se mogu izdvojiti tri različita uzdužna dijela: primorska kosa (planina Mosor), flišna padina i obalna naplavina (Slika 6). Planina Mosor je izgrađena od krednih vapnenaca. Strmo je nagnut prema jugozapadu gdje na nadmorskoj visini od 250 – 300 m naliježe na flišne naslage. Najveći dio općine zauzima fliš koji je podložan eroziji pa je pretežno pokriven rahlim tlom, pogodnim za rast vegetacije (Baučić, 2000).



Slika 6. Tri reljefne cjeline općine Dugi Rat

Internetski izvor 2.

Istraživano područje Dugog Rata ima mediteransku klimu s dugim toplim i suhim ljetima i blagim i vlažnim zimama. Područje spada u najsunčanije dijelove Republike Hrvatske. Prosječna godišnja temperatura mora u priobalnom pojasu iznosi oko 17,6°C i više, a u kolovozu oko 26°C i više. Padalina ima najviše u kasnoj jeseni i početkom zime, a najmanje u ljetnim mjesecima.

Reljefna eksponiranost prema jugu štiti istraživano područje od nepovoljnih utjecaja jakih i hladnih sjevernih vjetrova (bure) te najvećem dijelu općine osigurava povoljnija klimatska obilježja od prosječnih u srednjoj Dalmaciji. Istočni dio općine u zimskom periodu ima učestaliji i jači utjecaj bure i juga, ali je zaštićen od velikih valova koje povremeno stvara jugozapadni vjetar, lebić. Ovdje je manje izražen i ljetni osvježujući dnevni vjetar, maestral, a jače se u ostalom dijelu općine osjeća utjecaj noćnog burina (Baučić, 2000).

### **3.3.1. Plaža Dugi Rat**

Šire istraživano područje (od Omiša do Dugog Rata) je značajno područje pjeskovitog sedimenta. Pijesak rijeke Cetine se zbog dužobalnog transporta u smjeru sjeveroistoka taloži sve do Dugog Rata koji je udaljen 4 km, zbog čega je pojas od Omiša do Dugog Rata među rijetkima na području Dalmacije s pješćanim plažama (Marušić, 2017). Postojanje takvih nanosa predstavlja prirodni resurs koji je korišten za različite ljudske gospodarske djelatnosti koje su značajno utjecale na taloženje i količinu nataloženog sedimenta. Početkom 20. stoljeća jedna od najjačih aktivnosti u istraživanom području je bilo salbunarstvo ili pržinarenje odnosno vađenje morskog pijeska s morskog dna ili skupljanje pijeska neposredno uz obalu koji se kasnije koristio u građevinarstvu (Marušić, 2017). Snažan utjecaj je imala i gradnja tvornice kalcijeva karbida i kalcijeva cijanamida 1908. godine koja je izgrađena na samoj obali nasipanjem materijala te izgradnja Jadranske magistrale koja je trasirana neposredno uz obalu i na taj način suzila obalni prostor. U novije vrijeme razvojem turizma pješćane plaže postaju važan resurs za rekreativne aktivnosti i provođenje slobodnog vremena.

Istraživani dio umjetne plaže u Dugom Ratu se odnosi na jedan od tri umjetno formirana zaljeva, pri čemu se istraživana plaža pruža uz najsjeverniji zaljev (Slika 7).



Slika 7. A - karta lokacije plaže Dugi Rat na istočnoj obali Jadranskog mora.

B - izgled plaže 2005. godine. C - izgled plaže 2012. godine.

(B i C fotografije isto kameno pero na jugoistočnom kraju južnog dijela plaže  
(Pikelj i dr., 2018.)

Plaža je duga 80 metara sa smjerom pružanja zapad – sjeverozapad, jug – jugoistok. Na tom području plaža prethodno nije u pravom smislu postojala, ali su za potrebe sve intenzivnijeg razvoja kupališnog turizma 2005. godine započeli radovi na formiranju podloge plaže. U tu svrhu prostor je nasipan krupnim komadima stijena i izgradnjom pera, a zatim sitnijim materijalom. S obzirom da je novo izgrađena umjetna plaža u Dugom Ratu pod utjecajem konstantne erozije od 2005. godine se provodi godišnje nasipanje (najčešće u travnju drobljenim vapnencom iz kamenoloma na Mosoru). Materijal korišten za nasipavanje je u veličinskoj frakciji 4 – 8 mm. Sama plaža je podijeljena na dva dijela betonskim molom s temeljima u moru (Slika 7). Nakon sugestije općinskim vlastima prekinuta je praksa nasipavanja drobljenim materijalom te se po prvi puta 2018. godine kao materijal za nasipavanje koristio krupniji oblatak riječnog porijekla, heterogenog mineralnog sastava i boje.

## 4. MATERIJALI I METODE

### 4.1. Uzorkovanje

Za potrebe ovog istraživanja uzeti su uzorci sedimenta s plaže i uzorci morskog sedimenta (Slika 8).

Uzorci nasutog sedimenta plaže uzeti su s dvije lokacije 2016. godine. Naknadno je nakon nasipavanja 2018. godine nasumce duž cijele plaže sakupljen kompozitni uzorak populacije krupnijih oblutaka. Navedeni uzorci će u daljnjem tekstu biti označeni kao DR 13, DR 16 i DR krupno.

U Dugom Ratu sediment iz mora je uzorkovan s 5 lokacija gravitacijskim jezgrilom uz pomoć dodatnih utega kako bi se uspio zahvatiti krupniji sediment.



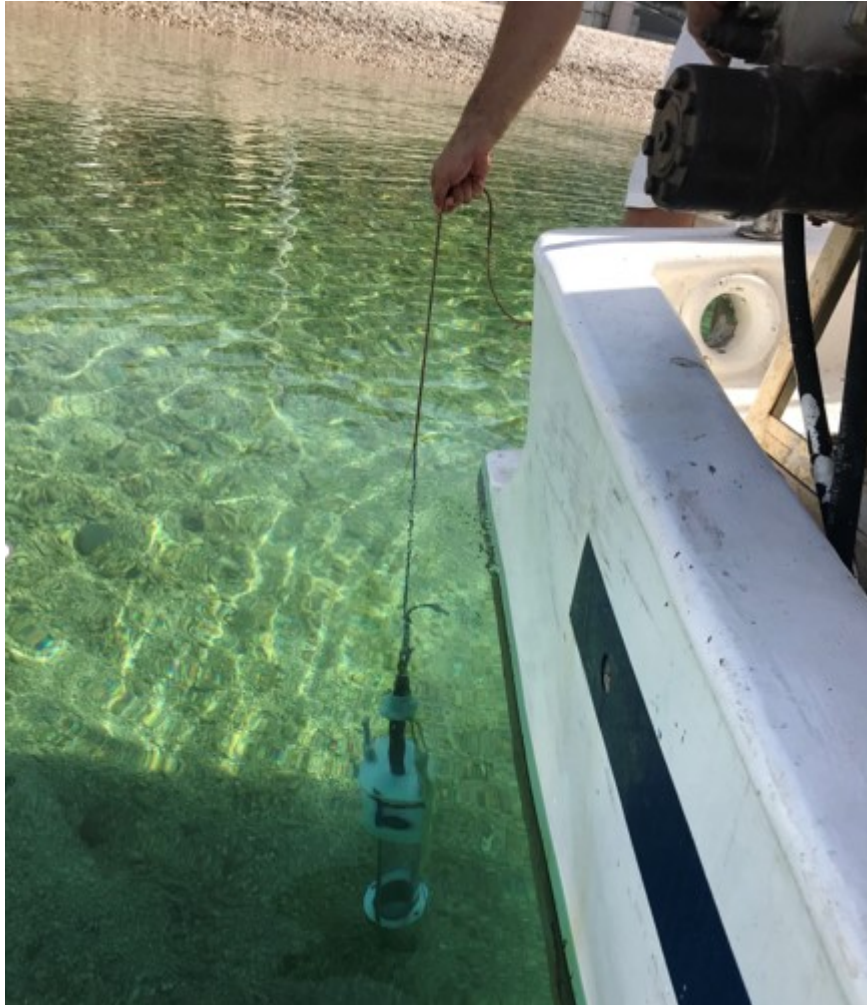
Slika 8. Lokacije uzorkovanja materijala na plaži (profili 13 i 16) i u moru (lokacije 1-5)

Prilikom uzorkovanja korišten je UWITEC gravitacijsko jezgrilo promjera 90 mm koji se sastoji od osnovnog tijela u koji se umeće prozirna PVC cijev. Ona se na jezgrilo pričvršćuje pomoću dvije poluge. Na vršnom dijelu jezgrila se na polugu pričvršćuje konop



sa gumenom kuglom koji se sa suprotne strane jezgrila napinje i pričvrsti za vršni dio jezgrila. Napetost konopa osigurana je težinom jezgrila.

Prilikom uzorkovanja gravitacijski jezgrilo se spuštalo s broda okomito na morsko dno (Slika 9). Pri kontaktu jezgrila s morskim dnom uslijed osnovne ili dodatne težine jezgrila zabija se PVC cijev u sediment. Težina jezgrila prividno nestaje za sustav nategnutog konopa te se otpušta konop s kuglom.



Slika 9. Uzorkovanje sedimenta u moru UWITEC jezgrilom  
(fotografirala Kristina Šeparović Markota)

Nakon toga je izvađeno gravitacijsko jezgrilo s uzorkovanim sedimentom. Prilikom izlaska donjeg dijela PVC cijevi, kugla se pozicionira na dno cijevi čime sprječava gubitak uzorkovanog sedimenta.

Prilikom vađenja jezgrila iz mora u plastičnoj cijevi je bilo do 15 cm sedimenta (Slika 10) nakon čega je spremljen u plastične vrećice te su iste označene prema lokaciji s koje je sediment uzorkovan.



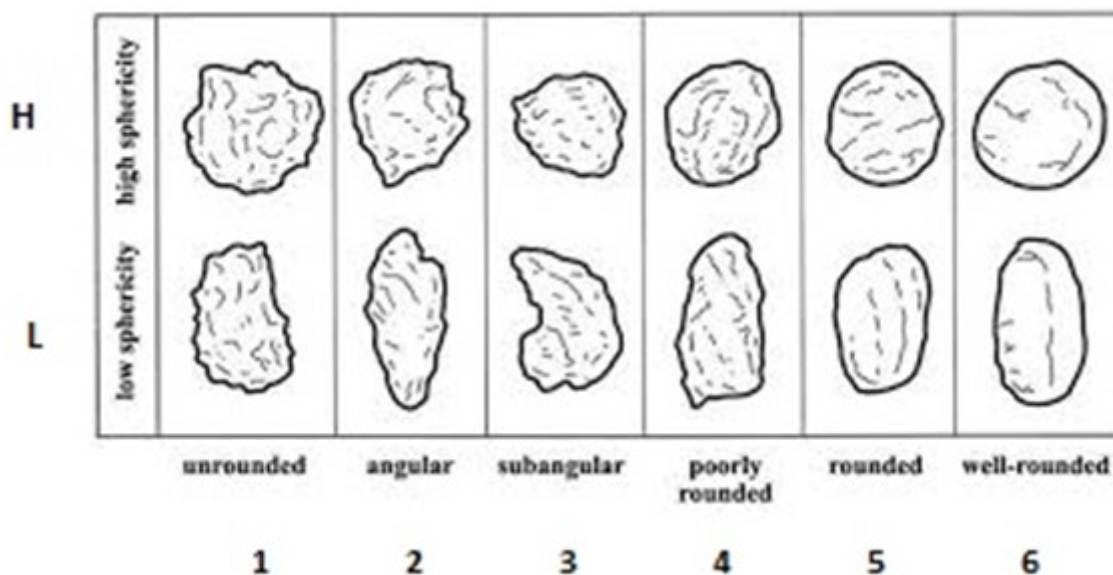
Slika 10. Prikupljeni sediment iz mora  
(fotografirala Kristina Šeparović Markota)

Poslije uzorkovanja sediment je stavljen na sušenje, a potom je osušeni uzorak poduzorkovan za granulometrijsku analizu.



Morfometrijska analiza zrna daje informacije o strukturnim i teksturnim karakteristikama sedimenta i interpretira uvjete transporta i post – taložnog trošenja. Pri ovim analizama proučavaju se oblik zrna, sferičnost i zaobljenost zrna. Analize veličine i oblika zrna se temelje na duljini tri međusobno okomite osi: najdulje (l ili a) os, srednje (I ili b) os i najkraće (S ili c) osi.

Morfometrijska analiza je u ovom radu provedena na uzorcima plaže DR 13, DR 16 i DR krupno metodom izravnog mjerenja pomoću digitalnog pomičnog mjerila. Iz svakog uzorka je poduzorkovano 300 reprezentativnih zrna kojima su izmjerene najdulja, srednja i najkraća os, te vaganjem masa zrna. Sferičnost i zaobljenost zrna su određene vizualno prema standardnoj tablici (Slika 11) koju je dao Powers (1953). Zaobljenost zrna Powers je razvrstao u kategorije od 1 do 6 (vrlo uglato do vrlo zaobljeno), a sferičnost u kategorije L (niska sferičnost) i H (visoka sferičnost).



Slika 11. Grafički prikaz za vizualno određivanje stupnja sferičnosti i zaobljenosti zrna (Powers, 1953)

#### **4.2.2. Granulometrijska analiza**

Granulometrijska analiza svakog uzorka određena kombiniranom metodom mokrog sisanja za čestice veće od 0,063 mm, a za čestice manje od 0,063 mm korišten je sedigraf.

##### **METODA MOKROG SIJANJA**

Ova metoda je provedena za određivanje granulometrijskog sastava čestica većih od 0,063 mm. Analiza svakog uzorka napravljena je na način da se 100 g osušenog i odvagano sedimenta prosijao kroz niz sita s otvorima veličine: 4 mm, 2 mm, 1 mm, 0,5 mm, 0,125 mm i 0,063 mm. Tijekom sisanja je korištena destilirana voda radi ispiranja zaostalog sedimenta sa sita. Frakcije koje su ostale na pojedinom situ su osušene te su nakon toga izvagane na preciznoj vagi. Nakon toga je sediment spremljen u vrećice s oznakama lokacije uzorka, veličine i mase frakcija.



Slika 12. Aparatura za mokro sisanje  
(fotografirao Ivan Mikičić)

## SEDIGRAF

Zaostala frakcija svakog uzorka koja je prošla kroz sito s otvorima veličine 0,063 mm ostavljene su da se istalože i najsitnije čestice. Višak vode je dekantiran (ostala je debljina stupca vode jednaka debljini sedimenta). Na taj način je postignuta zahtijevana gustoća suspenzije za analizu na sedigrafu.



Slika 13. SediGraph 5100 (Micromeritics Instrument Corporation)  
(fotografirao Šimun Aščić)

Uzorci su analizirani na uređaju za sedimentacijsku analizu SediGraph 5100 (Micromeritics Instrument Corporation). Uređaj se sastoji od analizatora, sučelja i računala (Slika 13). Ova metoda određivanja veličine zrna se temelji na sedimentaciji pod utjecajem gravitacije koju opisuje Stokes-ov zakon i apsorpciji x-zraka. Za analizu sedigrafom korištena je kao suspenzijska tekućina destilirana voda i heksametafosfat ( $\text{NaPO}_3$ )<sub>6</sub> u koncentraciji 1 g/l kao antikoagulans. Svaka suspenzija je dodatno razmućena uz pomoć ultrazvučne kade (3 – 5 minuta) radi sprječavanja sljepljivanja čestica. Tako pripremljene suspenzije ulivene su u posudu za miješanje i sustavom pumpi doveden u ćeliju za analizu. Prije analize uzoraka analizirana je suspenzijska tekućina čime je dobivena bazna linija – linija koja pokazuje prolaznost (apsorpciju) x-zraka u pripremljenoj otopini. Prolaznost za dotične analize je bila 118 Kcents/s (kilo/tisuću udaraca fotona u sekundi). Da bi analiza bila valjana, krivulja prolaznosti x-zraka za suspendirani uzorak treba biti 50 – 70% bazne linije

(59 – 83 Kcnts/s) (Micrometrics, 2002). Nakon analize frakcije manje od 0,063 mm na sedigrafu, dobiveni podaci su spojeni s podacima dobivenim postupkom mokrog sisanja.

#### **4.2.3. Pregled sedimenta metodom mikroskopiranja**

Frakcije osušenih i izvaganih uzoraka promatrane su svjetlosnom lupom pod raznim povećanjima radi utvrđivanja dominacije ekstraklasta ili bioklasta u uzorcima. Korištena je binokularna svjetlosna lupa Stereo Zoom Microscope XTL-3400 (Slika 14). Svaka frakcija sedimenta je stavljena pomoću porculanske žlice na tamnu posudicu koja je grafički podijeljena u 24 kvadrata. Kod većih frakcija na svaki kvadrat je stavljeno po jedno zrno sedimenta dok su kod manjih frakcija promatrani primjerci unutar jednog kvadrata.

Na temelju dubina i identifikacije sadržaja sedimenta pokušat će se odrediti prevladavajući utjecaj mora ili kopna odnosno plaže.



Slika 14. Svjetlosna stereo lupa XTL- 3400

(fotografirao: Ivan Mikičić)

#### 4.2.4. Statistička analiza

Podaci granulometrijske analize kombiniranom metodom mokrog sijanja i sedigrafa za svaki uzorak su spojeni u set podataka koji su uneseni u Microsoft Excel tablice i obrađeni pomoću statističkog paketa Gradistat® (Blott&Pye, 2001). Na taj način dobiveni su podaci o količini pojedine frakcije u uzorku, sortiranosti uzorka, srednje i prosječne veličine zrna te asimetričnosti raspodjele i zaoštrenosti krivulje. Za određivanje tipa sedimenta korištena je Folkova klasifikacija (1954). Očitavanjem vrijednosti veličina zrna u  $\Phi$  jedinicama iz kumulativne krivulje kod kumulativnih postotaka: 5, 16, 25, 50, 75, 84 i 95 automatski su izračunati slijedeći granulometrijski parametri (Folk & Ward, 1957):

**Srednja veličina zrna** (median) predstavlja vrijednost od koje je 50% čestica veće, a 50% manje:

$$M_d = \Phi 50$$

**Prosječna veličina zrna** (mean):

$$M_z = \frac{(\Phi 16 + \Phi 50 + \Phi 84)}{3}$$

**Sortiranje** (sorting) koje pokazuje jednoličnost distribucije:

$$S_o = \frac{(\Phi 84 - \Phi 16)}{4} + \frac{(\Phi 95 - \Phi 5)}{6,6}$$

Kategorije sortiranosti sedimenta:

< 0,35 .....	vrlo dobro sortirano
0,35-0,50 .....	dobro sortirano
0,50-0,70 .....	umjereno dobro sortirano
0,70-1,00 .....	umjereno sortirano
1,00-2,00 .....	loše sortirano
2,00-4,00 .....	vrlo loše sortirano
> 4,00 .....	izrazito loše sortirano

**Asimetričnost raspodjele** (skewness) pokazuje devijacije u raspodjeli čestica. Pozitivne vrijednosti pokazuju da prevladava krupnija frakcija odnosno da je krivulja iskošena prema sitnijim sedimentima, a negativne da prevladava sitnija frakcija, odnosno da je krivulja iskošena prema krupnijim sedimentima:

$$Sk = \frac{\Phi 16 + \Phi 84 - \Phi 50}{2(\Phi 84 - \Phi 16)} + \frac{\Phi 16 + \Phi 84 - \Phi 50}{2(\Phi 95 - \Phi 5)}$$



Kategorije asimetričnosti krivulje:

-1,00 do -0,30.....	vrlo negativno zakošena krivulja
-0,30 do -0,10.....	negativno zakošena krivulja
-0,10 do 0,10.....	gotovo simetrična krivulja
0,10 do 0,29.....	pozitivno zakošena krivulja
0,30 do 1,00.....	vrlo pozitivno zakošena krivulja

**Zaoštrenost krivulje** (kurtosis) odnosi se na raspršenost raspodjele. Ako je krivulja zaoštrena, materijal je raspoređen oko jedne veličine zrna, a ako je zaravnjena, prisutno je više granulometrijskih frakcija.

$$K = \frac{(\Phi_{95} - \Phi_5)}{2,44 (\Phi_{75} - \Phi_{25})}$$

Kategorije zaoštrenost krivulje:

< 0,67.....	vrlo zaravnjena krivulja
0,67-0 90.....	zaravnjena krivulja
0,90-1,11.....	srednje zaoštrena krivulja
1,11-1,50.....	zaoštrena krivulja
1,50-3,00.....	vrlo zaoštrena krivulja
> 3,00.....	izuzetno zaoštrena krivulja

**4.2.5. Određivanje DoC na temelju sastava sedimenta**

U ovom diplomskom radu korištena je novija metoda određivanja DoC koju su predložili Aragonés i dr., (2018). Odabrana metoda se temelji na granulometrijskim karakteristikama sedimenta koje se mogu koristiti kao pokazatelj granice dubine odobalnog transporta sedimenta.

Karakteristike morskog sedimenta ovise o uvjetima valovanja i strujama te o energiji u okolišu. Smanjenje energije u okolišu koja se smanjuje s povećanjem dubine uzrokuje taloženje čestica sedimenta. U istraživanjima raspodjele sedimenta na morskom dnu ukazuju da se srednja veličina zrna smanjuje od obale. Vrlo važan čimbenik čine i uvjeti valovanja. Visoko energetske valovi mogu pomaknuti deblji sediment u dubinu s koje je valovi niske energije neće moći vratiti. Valovi niske energije transportiraju sitniji sediment u dubinu do određene točke na profilu te ga olujni vjetrovi transportiraju iza te točke. Ukoliko se takva situacija pogleda u profilu, s povećanjem dubine smanjuje se veličina zrna, a nakon čega

dolazi do prekida te tendencije te do povećanja i ponovnog smanjivanja zrna. Aragonés i sur. (2018) definiraju DoC kao mjesto najmanje srednje veličine zrna prije nego se ona počne mijenjati.

Analiza nizova profila je najefikasnija metoda procjene DoC ali u ovom istraživanju uzorkovanje nije bilo moguće učiniti na profilima iz tehničkih razloga (nemogućnosti stabiliziranja broda). Iz tog razloga uzorci morskog sedimenta su uzeti s različitih dubina: DR UZ 1 1,2 m, DR UZ 2 4,2 m, DR UZ 3 3,4 m, DR UZ 4 4,5 m i DR UZ 5 2,8 m.

Cilj upotrebe rezultata dobivenih određivanjem granulometrijskih karakteristika sedimenta je okvirna procjena podudaranja granulometrijskih parametara i dubina s kojih je izvršeno uzorkovanje sedimenta. Na osnovu dobivenih rezultata također će se procijeniti da li granulometrijske karakteristike morskog sedimenta iz Dugog Rata mogu biti dobar pokazatelj dubine na kojoj se nalazi DoC.

#### 4.2.6. Određivanje DoC na temelju analitičke kalkulacije

Za određivanje DoC u ovom radu je korišten analitički izračun odnosno jednadžbe koje koriste podatke o valovima. Najčešće primjenjivane metode su jednadžbe koje su predložili Hallermaier (1978, 1981) i Birkemaier (1985), a koje se temelje na hidrodinamici valova.

Promatrana su tri vremenska perioda za koje su bili dostupni podaci (Tablica 2) a koji su dobiveni računalnom prognozom servisa BORA GEKOM.

Prognoze parametara valova su dobivene korištenjem modeliranih meteoroloških podataka. Prognostički podaci modelirani su modelom *Weather Research and Forecast* (WFR-ARW). Radi se o mezoskalnom numeričko – prognostičkom sustavu dizajniranom za potrebe operativnih prognoza i atmosferskih istraživanja, a razvio ga je NCAR (*The National Center for Atmospheric Research*, SAD). Rezultati modela se široko primjenjuju od proučavanja meteoroloških pojava sve do operativne prognoze mezoskalne i regionalne atmosferske cirkulacije i to od reda 100 m do 1000 km. Ovakav meteorološki model proračunava vrijednosti meteoroloških parametara u svim točkama mreže pa i na mjestima gdje ne postoje direktna mjerenja.

WWM II Model se forsira dinamičkim nehomogenim poljem vjetra koji se dobiva iz WRF modela. Radi se o spektralnom valnom modelu treće generacije koji je razvijen u suradnji tajvanskog Nacionalnog Sveučilišta Cheng Kung i Tehničkog Sveučilišta u Darmstadtu. Model uzima u obzir realno širenje vala u vremenu i prostoru, prostorne razlike rasporeda dubine more, dolazak vala u plitko (*shoaling effect*), refrakciju valova uzrokovanu

promjenom dubine, s njom vezanu promjenu frekvencije, stvaranja valova vjetrom, trostruku i četverostruku interakciju valova, pojavu pjenjenja, trenja s dnom i lom valova uslijed promjene dubine. WWM II model je forsiran podacima dinamičkog nehomogenog polja vjetra koje se dobiva iz prethodno navedenog WRF modela. Model se temelji na rješavanju Eulerove jednadžbe valnog djelovanja na nestrukturiranu mrežu konačnih elemenata s boljom rezolucijom uz područje obale. Na taj način je omogućen proračun valnih parametara oko brojnih otoka u Jadranskom moru.

Karte valova su vrlo korisne za planiranje operacija na moru u slučaju pogoršanja stanja mora te pomažu vidjeti trend razvoja stanja na nekom području kroz nekoliko dana.

Za periode promatranja za koje su modelom dobivene značajna visina vala  $H_s$  i period vala  $T$  uzeta su vremenska razdoblja: 31.01.2015. – 04.03.2015., 18.04.2015. – 22.05.2015. i 02.12.2015. – 09.03.2016. Prvo razdoblje je vezano za prva praćenja morfoloških promjena na plaži Dugi Rat (Tominić, 2017; Šeparović Markota, 2019). To je ujedno dio zimskog perioda tijekom kojeg se obično pojavljuju olujni valovi, no i period kad općenito zimska olujna nevremena jenjavaju. Drugi period se odnosi na razdoblje iste godine, a neposredno prije turističke sezone i to je razdoblje u kojem se u pravilu odvija redovito nasipanje i ravnanje plaže (Tominić, 2017; Šeparović Markota, 2019), pri čemu u pravilu izostaju olujni valovi. Treći period se odnosi na veći dio zimskog perioda u kojem se može očekivati češća pojava olujnih nevremena. Ovaj period se vremenski preklapa s prvim periodom i podaci dobiveni za taj period služe za usporedbu. Podaci o visini i periodu vala korišteni u ovom radu jedini su podaci koji su u datom trenutku bili dostupni.

Značajna visina vala ( $H_s$  ili  $H_{1/3}$ ) je veličina koja predstavlja srednju visinu 1/3 najviših valova u određenoj situaciji. Period koji je ovdje korišten je usrednjeni period za svako od razdoblja.

Tablica 2. Podaci o značajnoj visini i periodu vala  
za tri promatrana perioda na plaži Dugi Rat

Vrijeme praćenja stanja mora	Značajna visina vala (m)	Period vala (s)
31.01.2015. – 04.03.2015.	0,4615	2,2601
18.04.2015. – 22.05.2015.	0,2695	1,9328
02.12.2015. – 09.03.2016.	0,3236	2,034

## 5. REZULTATI

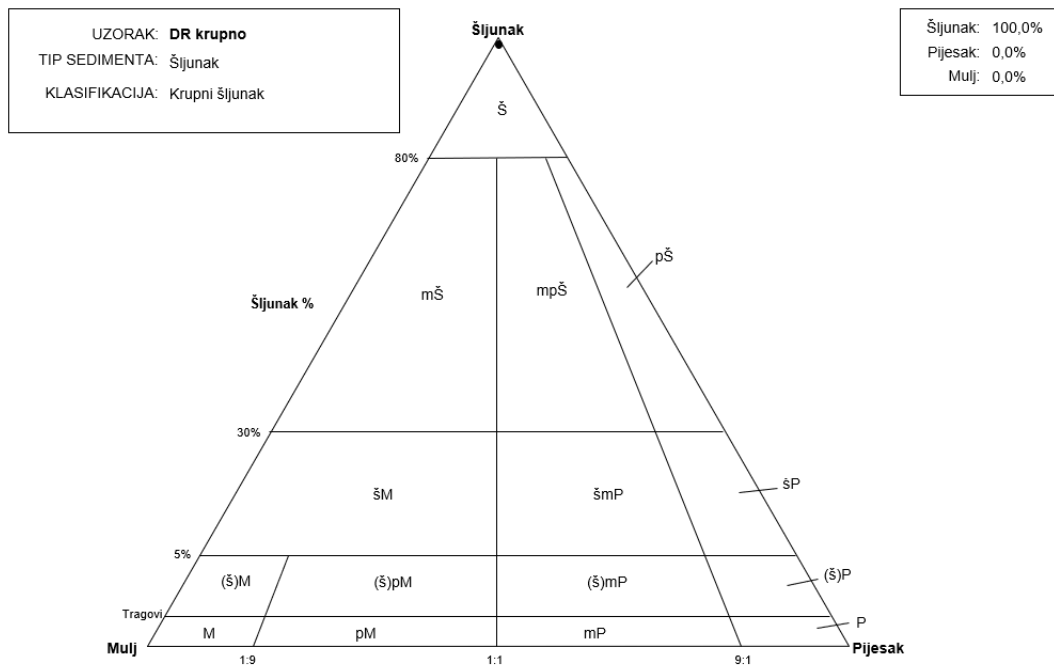
### 5.1. Granulometrijska analiza

Granulometrijskom analizom dobiveni su rezultati o tipu sedimenta, srednjoj veličini zrna ( $M_d$ ), prosječnoj veličini zrna ( $M_z$ ), koeficijentu sortiranoosti ( $S_o$ ), asimetričnost raspodjele ( $S_k$ ) i zaoštrenost krivulje ( $K_g$ ). Podaci o parametrima za uzorke sediment sa plaže i iz mora prikazani su u tablicama 2 i 3. Gradistatom su dobiveni i dijagrami šljunak-pijesak-mulj. Značenje kratica u dijagramu: M – mulj, pM – muljeviti pijesak, P – pijesak, (š)M – slabo šljunkoviti mulj, (š)pM – slabo šljunkoviti pjeskoviti mulj, (š)mP – slabo šljunkovito muljeviti pijesak, (š)P – slabo šljunkoviti pijesak, šM – šljunkoviti mulj, šmP – šljunkovito muljeviti pijesak, šP – šljunkoviti pijesak, mŠ – muljeviti šljunak, mpŠ – muljevito pjeskoviti šljunak, pŠ – pjeskoviti šljunak, Š – šljunak. Podaci o tipu sedimenta za sediment plaže prikazani su u dijagramima na slikama 15 – 17, a za sediment iz mora na dijagramima na slikama 18 – 22.

Tablica 3. Rezultati granulometrijske analize uzoraka sedimenta sa plaže

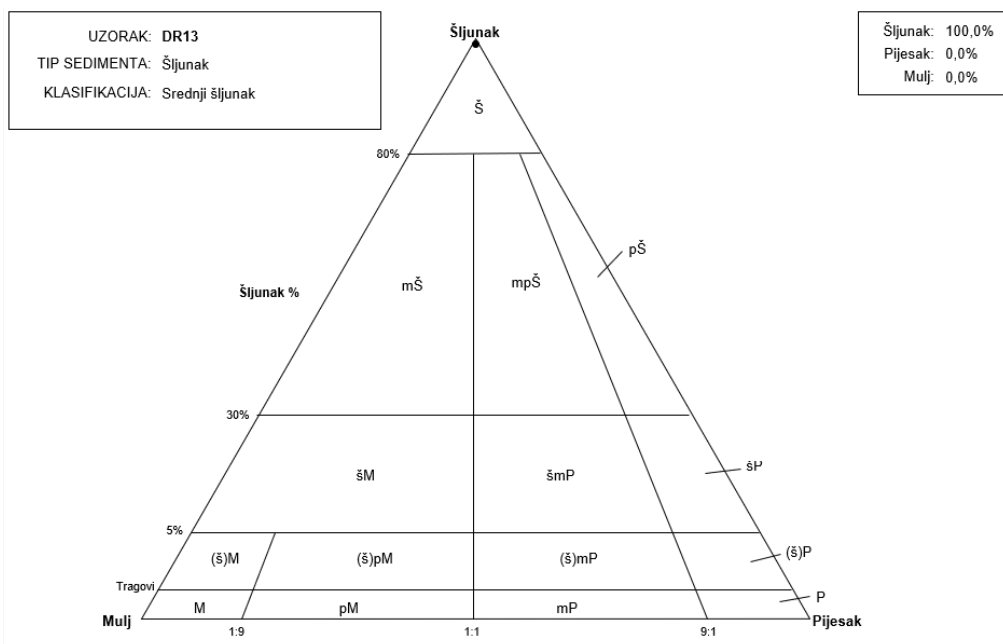
UZORAK	TIP SEDIMENTA	GRANULOMETRIJSKI PARAMETRI						
		$M_d$		$M_z$		$S_o$	$S_k$	$K_g$
		$\phi$	mm	$\phi$	mm	$\phi$	$\phi$	$\phi$
DR krupno	Šljunak	-4,533	23,146	-4,533	23,146	0,137	-2,093	-0,232
DR 13	Šljunak	-3,020	8,112	-3,047	8,264	0,481	0,695	0,285
DR 16	Šljunak	-3,346	10,169	-3,263	9,599	0,364	4,890	0,108

U uzorku DR krupno metodom izravnog mjerenja pomičnim mjerilom izmjereno je 300 zrna. Sediment je klasificiran kao šljunak. Srednja veličina zrna ( $M_d$ ) iznosi 23,146 mm. Prosječna veličina zrna ( $M_z$ ) iznosi 23,146 mm. Koeficijent sortiranoosti ukazuje na vrlo dobru sortiranoost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na vrlo negativno zakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na vrlo zaravnjenu krivulju.



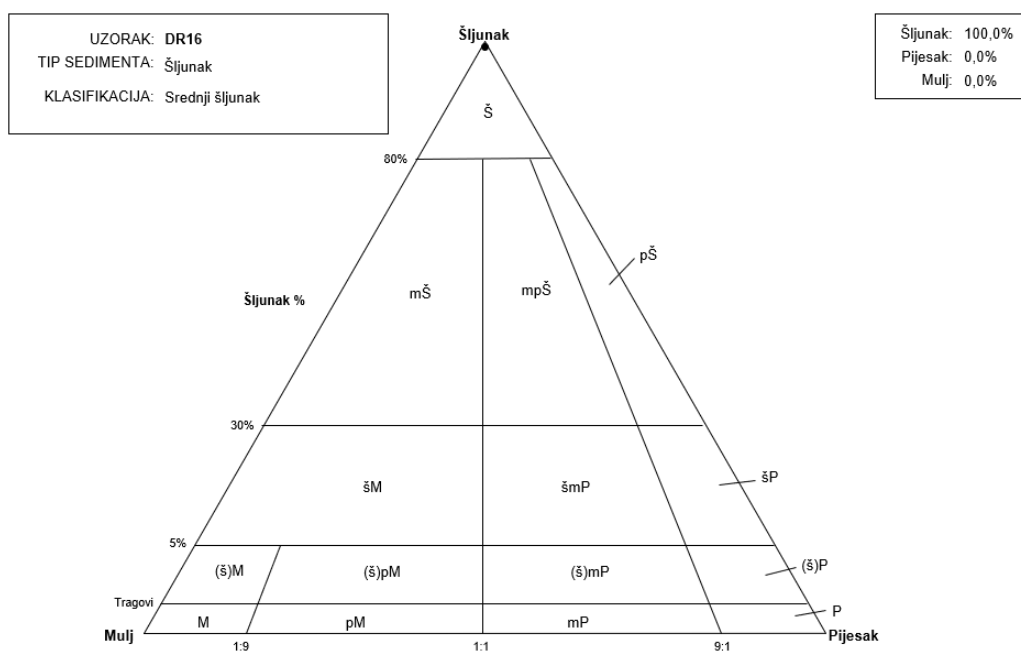
Slika 15. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR krupno

U uzorku DR 13 metodom izravnog mjerenja pomičnim mjerilom izmjereno je 305 zrna. Sediment je klasificiran kao šljunak. Srednja veličina zrna iznosi 8,112 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 8,264 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na dobru sortiranost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na pozitivno zakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na vrlo zaravnjenu krivulju.



Slika 16. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR 13

U uzorku DR 16 metodom izravnog mjerenja pomičnim mjerilom izmjereno je 314 zrna. Sediment je klasificiran kao šljunak. Srednja veličina zrna iznosi 10,169 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 9,599 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na dobru sortiranost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na vrlo pozitivno nakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na vrlo zaravnjenu krivulju.

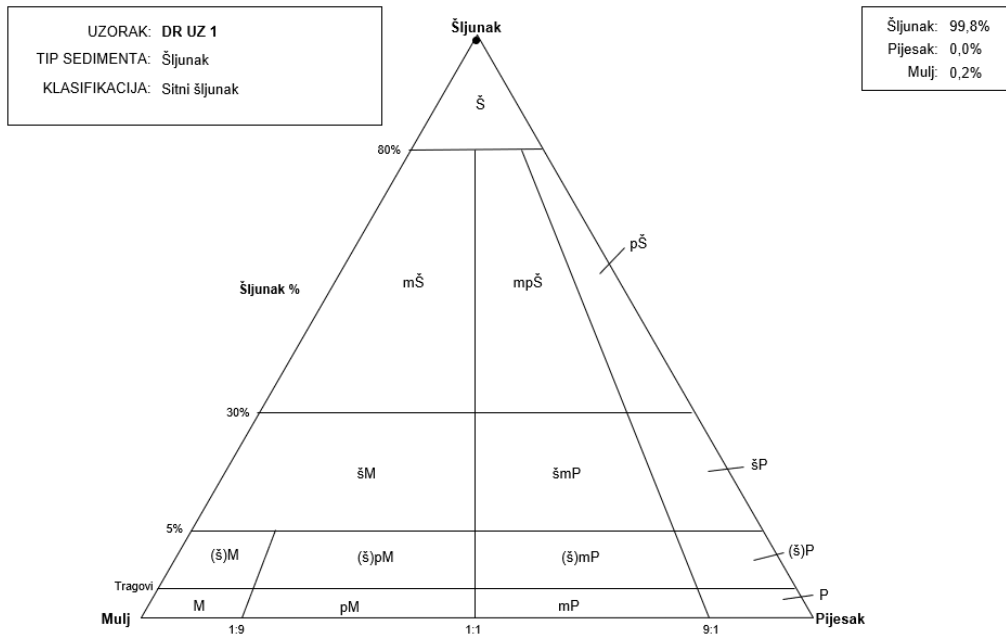


Slika 17. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR 16

Tablica 4. Rezultati granulometrijske analize za uzorke sedimenta iz mora

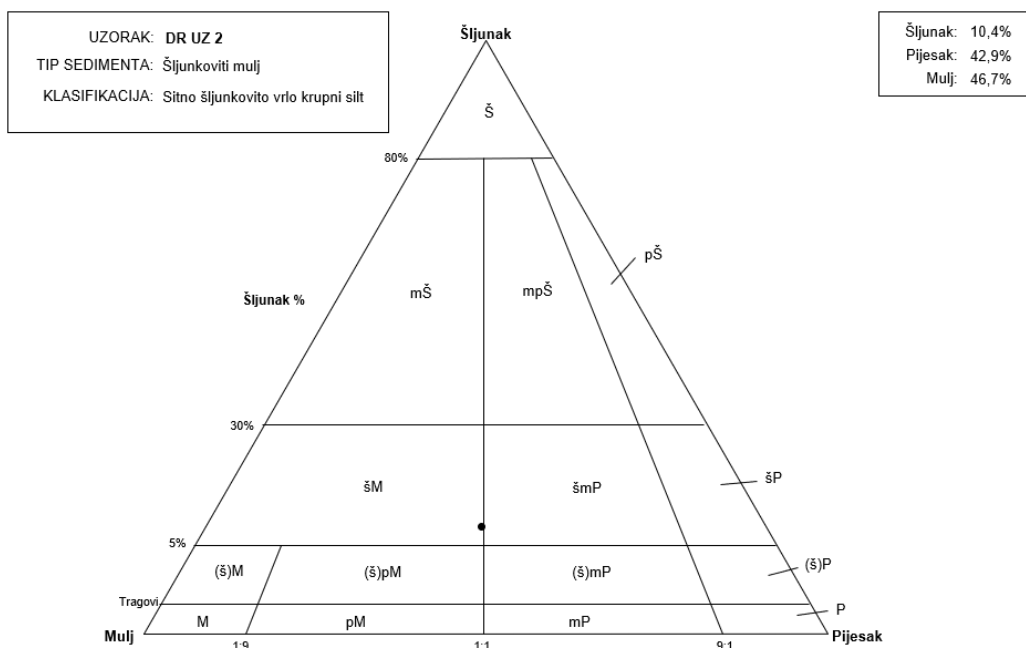
UZORAK	TIP SEDIMENTA	GRANULOMETRIJSKI PARAMETRI						
		Md		Mz		So	Sk	Kg
		φ	mm	φ	mm	φ	φ	φ
DR UZ 1	Šljunak	-2,523	5,747	-2,618	6,139	0,913	-0,194	1,563
DR UZ 2	Šljunkoviti mulj	3,868	0,069	3,914	0,066	3,711	0,007	1,427
DR UZ 3	Muljevito pjeskoviti šljunak	-0,29	1,223	0,333	0,794	2,843	0,355	0,687
DR UZ 4	Malo šljunkovito pjeskoviti mulj	5,026	0,031	5,505	0,022	2,867	0,132	1,041
DR UZ 5	Šljunak	-2,844	7,179	-1,455	2,742	0,734	5,08	9,056

Rezultati granulometrijske analize uzorka DR UZ 1 dobiveni su kombinacijom mokrog sisanja i izravnog mjerenja 309 zrna frakcije veće od 4 mm i 300 zrna frakcije od 2 – 4 mm. Sediment je klasificiran kao šljunak. Srednja veličina zrna iznosi 5,747 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 6,139 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na umjerenu sortiranost. Asimetričnost krivulje ukazuje na negativno zakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na vrlo zaoštrenu krivulju.



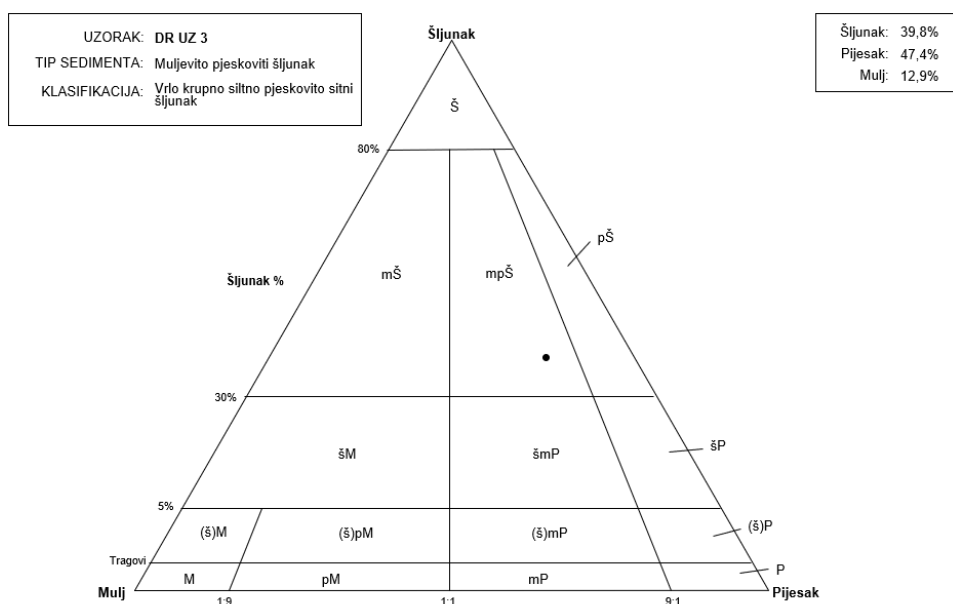
Slika 18. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR UZ 1

Rezultati granulometrijske analize uzorka DR UZ 2 dobiveni su metodom mokrog sisanja i sedigrafa. Sediment je klasificiran kao šljunkoviti mulj. Srednja veličina zrna iznosi 0,069 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 0,066 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na vrlo lošu sortiranost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na gotovo simetričnu krivulju, a zaoštrenost krivulje na zaoštrenu krivulju.



Slika 19. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR UZ 2

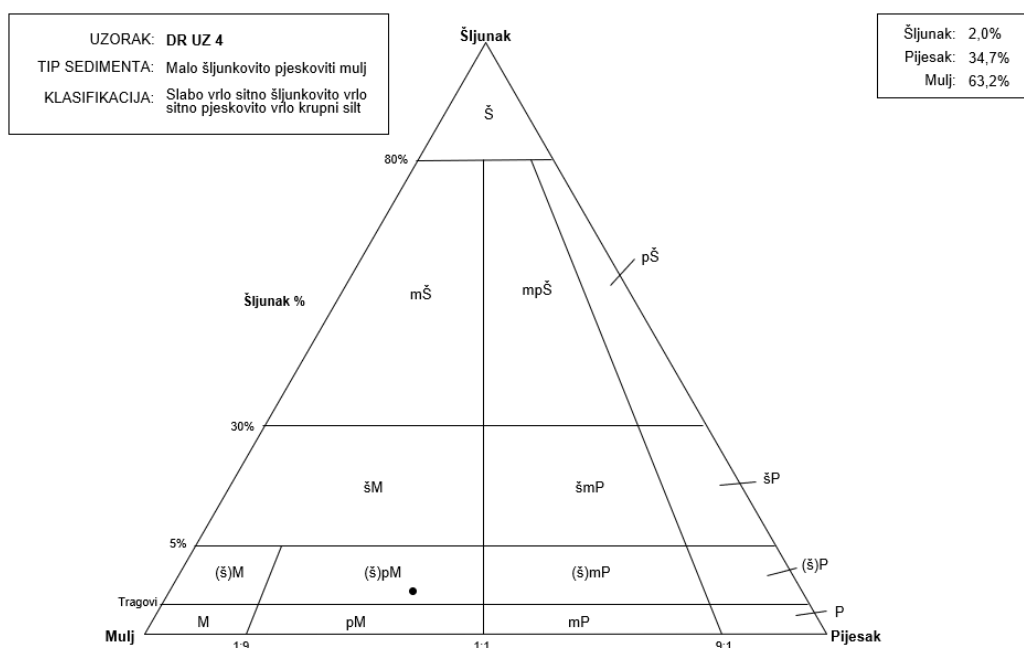
Rezultati granulometrijske analize uzorka DR UZ 3 dobiveni su metodom mokrog sisanja i sedigrafa. Sediment je klasificiran kao muljevito pjeskoviti šljunak. Srednja veličina zrna iznosi 1,223 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 0,794 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na vrlo lošu sortiranost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na vrlo pozitivno zakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na zaravnjenu krivulju.



Slika 20. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR UZ 3

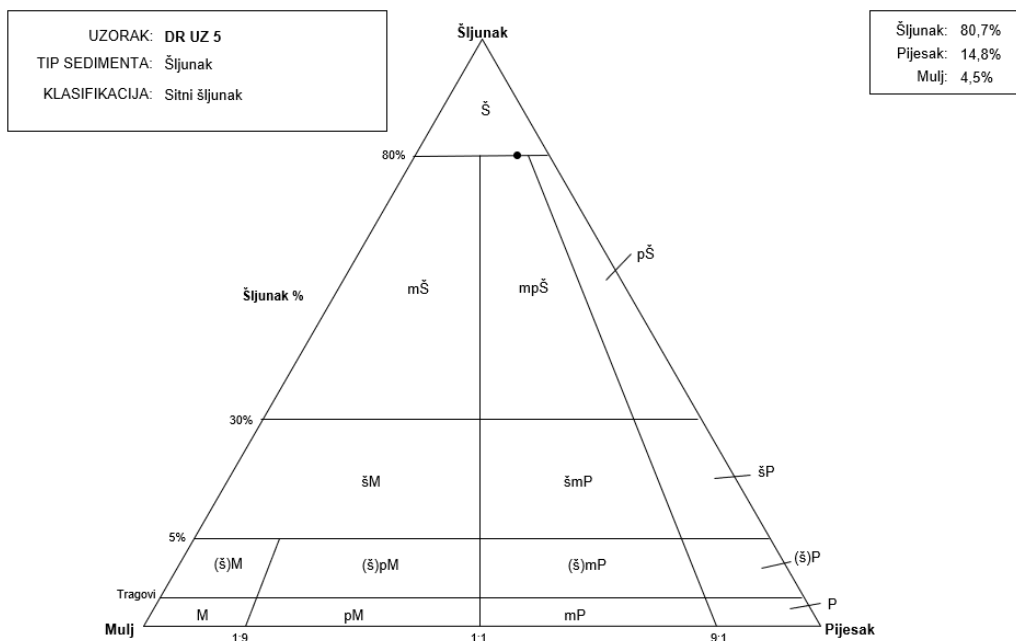


Rezultati granulometrijske analize uzorka DR UZ 4 dobiveni su metodom mokrog sisanja i sedigrafa. Sediment je klasificiran kao malo šljunkovito pjeskoviti mulj. Srednja veličina zrna iznosi 0,031 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 0,022 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na vrlo lošu sortiranost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na pozitivno zakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na srednje zaoštrenu krivulju.



Slika 21. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR UZ 4

Rezultati granulometrijske analize uzorka DR UZ 5 dobiveni su metodom mokrog sisanja i sedigrafa. Sediment je klasificiran kao šljunak. Srednja veličina zrna iznosi 7,179 mm. Prosječna veličina zrna iznosi 2,742 mm. Koeficijent sortiranosti ukazuje na umjerenu sortiranost. Asimetričnost raspodjele ukazuje na vrlo pozitivno zakošenu krivulju, a zaoštrenost krivulje na izuzetno zaoštrenu krivulju.



Slika 22. Dijagram šljunak pijesak mulj za uzorak DR UZ 5

Provedena je analiza odnosa srednje i prosječne veličine zrna sa dubinom s kojih su uzeti uzorci morskog sedimenta. Rezultati ukazuju da se srednja i prosječna veličina zrna smanjuje s povećanjem dubine. U uzorcima DR UZ 2 i DR UZ 4 koji su uzorkovani s većih dubina (4,2 m odnosno 4,5 m) postoji značajno smanjenje srednje i prosječne veličine zrna sedimenta. Odstupanje je zabilježeno kod uzorka DR UZ 5 koji je uzorkovan neposredno ispred betonskog mola sa dubine 2,8 m koji remeti prirodnu cirkulaciju sedimenta. U navedenom uzorku srednja veličina zrna je viša od očekivane vrijednosti i odstupa od rezultata koji ukazuju na smanjenje veličine zrna sa povećanjem dubine.

Tablica 5. Usporedba srednjih i prosječnih veličina zrna u uzorcima mora s povećanjem dubine

Uzorak	DR UZ 1	DR UZ 5	DR UZ 3	DR UZ 2	DR UZ 4
Dubina (od najmanje do najveće)	1,2	2,8	3,4	4,2	4,5
Srednja veličina zrna (mm)	5,747	7,179	1,223	0,069	0,031
Prosječna veličina zrna (mm)	6,139	2,742	0,794	0,066	0,022

## 5.2. Pregled sedimenta metodom mikroskopiranja

Mikroskopiranjem se utvrđivala dominacija ekstraklasta ili bioklasta u uzorcima iz mora.

Tablica 6. Rezultati pregleda sedimenta metodom mikroskopiranja

UZORAK	FRAKCIJE (mm)						
	> 4	2 - 4	1 - 2	0,5 - 1	0,25 - 0,5	0,125 - 0,25	0,063 - 0,125
DR UZ 1	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	—	—	—	dominiraju ekstraklasti	ne može se odrediti dominacija
DR UZ 2	dominiraju bioklasti	dominiraju bioklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	ne može se odrediti dominacija
DR UZ 3	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	ne može se odrediti dominacija
DR UZ 4	dominiraju bioklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju bioklasti	dominiraju bioklasti	dominiraju bioklasti	ne može se odrediti dominacija
DR UZ 5	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju ekstraklasti	dominiraju bioklasti	dominiraju bioklasti	dominiraju ekstraklasti	ne može se odrediti dominacija

U uzorku DR UZ 1 dominiraju ekstraklasti. Šljaka je prisutna u frakciji 0,125 – 0,25 mm. U uzorku DR UZ 2 pretežno dominiraju ekstraklasti dok bioklasti dominiraju u frakcijama >4 mm i 2 – 4 mm. Šljaka je prisutna u frakcijama 1 – 2 mm i 0,125 – 0,25 mm. U uzorku DR UZ 3 dominiraju ekstraklasti. Šljaka je prisutna u frakcijama 1 – 2 mm i 0,125 – 0,25 mm. U uzorku DR UZ 4 pretežno dominiraju bioklasti dok su ekstraklasti dominantni u frakcijama 2 – 4 mm i 1 – 2 mm. Šljaka je prisutna u frakciji 0,125 – 0,25 mm. U uzorku DR UZ 5 pretežno dominiraju ekstraklasti dok su bioklasti dominantni u frakcijama 0,25 – 0,5 mm i 0,125 – 0,25 mm. Šljaka je prisutna u frakciji 0,5 – 1 mm.

Prema dobivenim rezultatima vidi se da su ekstraklasti prisutni na nižim dubinama što ukazuje na porijeklo zrna koja su s plaže. Na većim dubinama povećava se broj bioklasta (DR UZ 2 i DR UZ 4) dominantnih u frakcijama. Odstupanje je prisutno u uzorku DR UZ 5.

### 5.3. Rezultati procjene DoC na temelju analitičke kalkulacije

U svrhu procjene DoC na temelju analitičke kalkulacije korišteni su modelirani podaci o valovima (visina vala i period vala) za tri razdoblja praćenja stanja mora te su za kalkulaciju korištene jednadžbe Hallermaiera (1978, 1981) i Birkemeiera (1985).

Tablica 7. Rezultati procjene DoC metodom analitičke kalkulacije

Vrijeme praćenja stanja mora	Značajna visina vala (m)	Period vala (s)	$DoC = 2,28H_{12,t} - 68,5\left(\frac{H_{12,t}^2}{gT_t^2}\right)$ Hallermaier	$DoC = 1,75H_{12,t} - 57,9\left(\frac{H_{12,t}^2}{gT_t^2}\right)$ Birkemeier
31.01.2015 – 04.03.2015.	0,4615	2,2601	0,7611	0,5615
18.04.2015. – 22.05.2015.	0,2695	1,9328	0,4787	0,3569
02.12.2015. – 09.03.2016.	0,3236	2,034	0,5611	0,4169

U ovom istraživanju uzorkovanje nije bilo moguće učiniti na profilima iz tehničkih razloga (nemogućnosti stabiliziranja broda). Kraus i dr. (1998) preporučuju upotrebu Hallermeierove jednadžbe kao primarne metode procjene DoC jer ona omogućuje konzervativniju procjenu DoC. Dobiveni rezultati (Tablica 7) pokazuju da se izračunate vrijednosti DoC za plažu Dugi Rat nalaze u rasponu 0,4787 – 0,7611 m.

## 6. RASPRAVA

Dosadašnja istraživanja umjetne plaže Dugi Rat bila su usmjerena na varijabilnost morfologije i volumena plaže i procjenu stabilnosti plaže nakon korekcije nasipavanja (Pikelj i dr., 2018; Tominić, 2017; Šeparović Markota, 2019). Cilj ovog rada je procjena dubine odobalnog transporta sedimenta (DoC) na umjetnoj plaži Dugi Rat na temelju sastava sedimenta i analitičkih kalkulacija, te je po prvi put napravljen prvi izračun za plažu na hrvatskoj obali. Granica dubine odobalnog transporta sedimenta je ključan teorijski koncept u razumijevanju morfodinamike obala i često se koristi u istraživanjima plaža. Navedena plaža se redovito nasipa, a od 2018. godine se kao materijal za nasipavanje koriste krupniji oblutci riječnog porijekla, heterogenog sastava i boje.

Granulometrijskom analizom dobiveni su rezultati o tipu sedimenta, srednjoj veličini zrna ( $M_d$ ), prosječnoj veličini zrna ( $M_z$ ), koeficijentu sortiranosti ( $S_o$ ), asimetričnost raspodjele ( $S_k$ ) i zaoštrenost krivulje ( $K_g$ ) za uzorke sedimenta plaže i iz mora. Podaci o tipu sedimenta za sediment plaže prikazani su u dijagramima na slikama 15 – 17, a za sediment iz mora na dijagramima na slikama 18 – 22. Za analizu sedimenta s plaže uzorci su uzeti s dvije lokacije 2016. godine te je naknadno nakon nasipavanja 2018. godine nasumce duž cijele plaže sakupljen kompozitni uzorak populacije krupnijih oblutaka (DR krupno, DR 13 i DR 16). Sediment sva tri uzorka s plaže su klasificirana kao šljunak, a koeficijent sortiranosti ukazuje na dobru sortiranost što je i očekivano s obzirom da se radi o nasipanom materijalu. Uzorci sedimenta iz mora su uzeti sa pet lokacija (DR UZ 1 do DR UZ 5; slika 8). Dva uzorka sedimenta DR UZ 1 i DR UZ 5 su klasificirana kao šljunak, a koeficijent sortiranosti ukazuje na umjereno dobru sortiranost. Uzorci DR UZ 2 je klasificiran kao šljunkoviti mulj, DR UZ 3 kao muljevito pjeskoviti šljunak te DR UZ 4 kao malo šljunkovito pjeskoviti mulj. Sva tri uzorka su vrlo loše sortirana što ukazuje na prisutnost različitih frakcija čija su zrna s obzirom na podrijetlo nejednoliko raspoređena u uzorcima.

Mikroskopiranjem je utvrđena dominacija ekstraklasta ili bioklasta koji ukazuju na utjecaj kopna, odnosno mora. S povećanjem dubine se u pravilu povećava i količina zrna koja su porijeklom iz mora. Kod DR UZ 4 koji je uzorkovan sa dubine od 4,5 m u kojem dominiraju bioklasti osim u frakcijama  $>4$  mm, 2 – 4 mm i 1 – 2 mm gdje dominiraju ekstraklasti koji ukazuju na zrna koja potječu s plaže, dok kod DR UZ 2 dominacija bioklasta se pojavljuje u frakcijama  $>4$  mm i 2 – 4 mm na dubini od 4,2 m. U ostalim sedimentima uzorkovanim na manjim dubinama dominiraju ekstraklasti koji potječu sa plaže. Odstupanje je prisutno u uzorku DR UZ 5 koji je uzet sa dubine od 2,8 m neposredno ispred betonskog

mola koji djelomično ometa cirkulaciju sedimenta te su zastupljeni uz ekstraklaste i bioklasti koji dominiraju u frakcijama 0,5 – 1 mm i 0,25 – 0,5 mm. Ovakvo odstupanje je vrlo vjerojatno i posljedica kombiniranog utjecaja mora i radova koji su prethodili. Tijekom proljeća 2018. godine ovaj betonski mol je rekonstruiran, pri čemu su radi ulaska bagera na mjesto rekonstrukcije u more nasute značajne količine izrazito krupnog materijala (i do 50 cm u promjeru) pretežito karbonatnog sastava, te su kasnije izvađene. Nakon te rekonstrukcije slijedilo je nasipavanje plaže krupnim riječnim materijalom, kao i tijekom 2019. godine.

Na osnovu dobivenih granulometrijskih karakteristika sedimenta iz mora te dubina s kojih su uzorci uzeti vidljivo je značajno smanjenje srednje i prosječne veličine zrna odnosno da se na dubinama od 1,2 m do 4,5 m postepeno pojavljuje sve sitniji materijal. Ovakvo pravilo vrijedi za sve prosječne veličine zrna, koje se nalaze u frakciji šljunka za uzorke DR UZ 1 i DR UZ 5, u frakciji vrlo krupnog pijeska za UZ DR 3, u frakciji vrlo sitnog pijeska za DR UZ 2 i konačno u frakciji mulja za DR UZ 4 (Tablica 5). Sličan je trend i kod srednje veličine zrna, osim što je iznimka od navedenog trenda uzorak DR UZ 5 kod kojeg su zabilježena najveća srednja veličina zrna. Razlog odstupanja do određene mjere može biti nakupljanje šljunka na plaži dužobalnom strujom i to s njegove JI strane, a koji se preko ili oko mola dalje transportira na drugi dio plaže ili se uz sami mol djelomično prenosi u dubinu. U slučaju transporta u dubinu, moguć je odraz takvog transporta na srednjoj veličini zrna. Drugi razlog odstupanja srednje veličine zrna na lokaciji DR UZ 5 mogu biti i gore spomenuti građevinski radovi, iza kojih je moglo zaostati krupno-zrnastijeg materijala na morskom dnu.

Rezultati granulometrijske analize pokazuju da uzorci DR UZ 2 i DR UZ 4 u svom sastavu imaju veću količinu frakcija pijeska i mulja, što je u skladu s povećanjem dubine na kojoj su uzorkovani. U oba uzorka je mikroskopiranjem utvrđeno prisustvo ekstraklasta u frakcijama pijeska. To je vrlo vjerojatno rezultat mehaničkog usitnjavanja materijala kojim je nasipana plaža, koji je nakon usitnjavanja povučen u veće dubine. Mehanizam usitnjavanja se na ovoj plaži ne smatra značajnim procesom, jer kako navode Pikelj i dr. (2018) nakon prakse nasipavanja drobljenim vapnencem znatan dio materijala je bio preseljen dužobalnim transportom ili erodiran i prenesen u dublje dijelove prije nego što se uopće stigao usitniti. Osim toga, u uzorcima DR UZ 2 i DR UZ 4 u sitnijim frakcijama pijeska dominiraju karbonatni bioklasti. U današnjim uvjetima u Jadranskom moru brzina produkcije karbonatnih bioklasta nije velika, pa ni brzina sedimentacije takvog materijala ne može biti velika (Pikelj, 2010). To znači da brzina usitnjavanja i zatrpavanja sporo rastućih

bioklasta također ne može biti velika. Zbog svega navedenog se na osnovi dobivenih rezultata o sastavu sedimenta može se pretpostaviti da se procijenjeni DoC nalazi upravo u rasponu dubina od 1,2 m do 3,4 m te da se karakteristike sedimenta mogu koristiti kao okvirni pokazatelj dubine na kojoj se nalazi DoC.

Za procjenu DoC analitičkim kalkulacijama korištene su jednadžbe Hallermaiera (1978, 1981) i Birkemeiera (1985) na osnovu modeliranih podataka o valovima (značajnoj visini vala i periodu vala). Dobiveni rezultati pokazuju raspon od 0,4787 – 0,7611 m po Hallermaieru i 0,3569 – 0,5615 m po Birkenmeieru (Tablica 7). Tijekom terenskog istraživanja i uzorkovanja sedimenta jasno je bilo vidljivo u prilično prozirnomo moru da se krupno-zrnasti sediment, uglavnom šljunak nalazi na dubinama koje premašuju najveću dubinu od 0,7611 dobivenu kalkulacijom. Primjerice na slici 9 je prikazano mjesto uzorkovanja uzorka DR UZ 1 i to sa dubine od 1,2 m. Kao što se može primijetiti na slici, morsko dno je u potpunosti prekriveno šljunkom, a sektor šljunka se nastavlja i dublje ispod broda. Prema zapažanjima na terenu, očito je da navedene analitičke kalkulacije podcjenjuju vrijednost DoC za plažu Dugi Rat.

Tijekom raznih dijelova godine dubina granice odobalnog transporta sedimenta se mijenja ovisno o uvjetima valovanja i morskim strujama. U području umjetne plaže Dugi Rat najveći utjecaj na uvjete valovanja imaju vjetrovi jugo i bura. Zimi i ujesen prevladavaju vjetrovi jugoistočnog smjera, osobito jugo koje izaziva najviše valove na Jadranu. Karakteristike tih valova olujnog vremena su visoka energija koja prenosi približno jednaku količinu sedimenta prenose prema obali i od obale. Kad je u pitanju kretanje sedimenta, na plaži Dugi Rat je primijećen generalni dužobalni transport od JI prema SZ (Pikelj i dr., 2018; Tominić, 2017; Šeparović Markota, 2019). Takav transport može prenijeti značajne količine sedimenta na krajnji SZ dio plaže, na kojem povratne struje valova juga odnose veliku količinu materijala plaže na potopljeno obalno lice i odobalje, što u konačnici za posljedicu ima eroziju plaže. Pretpostavlja se da se u takvim uvjetima DoC nalazi na većoj dubini. Tijekom drugih dijelova godine ekstremni uvjeti valovanja su rjeđi (ali se mogu dogoditi) i smanjuje se učestalost valova iz jugoistočnog smjera, kao i udio valova većih značajnih visina pa se procjenjuje da se DoC nalazi na manjoj dubini. Na postojanje mogućeg raspona DoC tijekom godine ukazuje i izračunati DoC koji je veći u periodu 31.01.2015. – 04.03.2015. od sličnog razdoblja koje je trajalo od zime 02.12.2015. – 09.03.2016. Mogući razlog za razliku između ova dva perioda je da je kod perioda 31.01.2015. – 04.03.2015. bilo više olujnih nevremena i jači utjecaj juga. Ekstremna juga u navedenom periodu zabilježena su u dostupnoj literaturi (Pikelj i dr., 2018). Period 18.04.2015. – 22.05.2015. pripada

razdoblju neposredno prije turističke sezone kada se odvija redovito nasipanje i ravnanje plaže te druge aktivnosti ljudi na plaži utječu na remećenje distribucije sedimenta. U tom periodu su rijetki ekstremni događaji (oluje) te valovi lijepog vremena u pravilu transportiraju u dubinu sediment u manjoj mjeri, pa se procijenjeni DoC nalazi na manjim dubinama.

Još jedan od razloga zbog kojeg su izračunate dubine DoC podcijenjene može biti i činjenica da su valni parametri korišteni u ovom diplomskom radu dobiveni modeliranjem prethodno također modeliranih meteoroloških uvjeta. Rezultati kalkulacije DoC bili bi realniji da su dostupni bili podaci mjerenih valova. Nadalje, jednadžbe korištene u ovom radu napravljene su za pješčane plaže većih dimenzija i značajnije izložene energiji valova, pa možda nisu u potpunosti idealne za primjenu u našim obalnim prilikama.

Kako je navedeno u uvodnom dijelu, procjena dubine DoC u praksi se često donosi na temelju analize profila plaža. Kontinuirano mjerenje profila na plaži Dugi Rat još uvijek ne postoji, a pokazalo se da je ono izuzetno bitno radi prakse nasipavanja koja ovdje traje već 15 godina, kao i radi kontinuirane erozije nasipanog sedimenta. Uzimajući u obzir sve navedeno može se zaključiti da je potrebno sustavno istraživanja plaža koja će dati uvid u sedimentološke i geomorfološke procese koji se odvijaju u takvim okolišima (i umjetnim i prirodnim). Na osnovu takvih istraživanja mogu se planirati mjere i smjernice održivog upravljanja plažama te poduzimanja aktivnosti u smjeru njihove zaštite.



## 7. ZAKLJUČAK

Na temelju provedenog istraživanja i dobivenih rezultata može se utvrditi da je procjena dubine odobalnog transporta sedimenta teorijski koncept koji do sada nije bio primjenjivan u istraživanjima plaža u Hrvatskoj. DoC se često primjenjuje u procjeni budžeta sedimenta plaže, nasipavanju plaže, numeričkom modeliranju obalnih promjena te dizajnu struktura za zaštitu plaža, obala i infrastruktura neposredno uz obalu.

Procesi litoralizacije imaju značajan utjecaj na sve okoliše ali najveće promjene se događaju u obalnom prostoru. Ljudske djelatnosti ubrzavaju prirodne procese kao što erozija obala a posebno mogu biti pogođene plaže koje predstavljaju važan prirodni i gospodarski resurs. U svrhu rješavanja problema erozije plaža, ali i povećanja kupališnih kapaciteta često se pristupa prihranjivanju ili nasipanju prirodnih te gradnji umjetnih plaža. Jedna od takvih umjetnih plaža je plaža u Dugom Ratu koja se redovito nasipava. Procjena DoC provedena je na temelju sastava sedimenta i analitičkih kalkulacija i to je prvi izračun takve vrste na našoj obali.

Dobiveni rezultati su pokazali da se granulometrijske karakteristike sedimenta mogu koristiti u gruboj procjeni granice dubine odobalnog transporta sedimenta. S povećanjem dubina (od 1,2 m do 4,4 m) smanjuje se srednja i prosječna veličina zrna što znači da se na tim dubinama nalazi sve sitniji materijal. Iznimka je uzorak DR UZ 5 koji je uzet sa dubine od 2,8 m neposredno ispred betonskog mola gdje su zabilježena odstupanja u srednjoj veličini zrna. Kod njega se na obali nakuplja šljunak i uz sami mol prenosi u dubinu, a nisu isključene ni posljedice građevinskih radova. U procjeni DoC na temelju analitičkih kalkulacija vrijednosti DoC su podcijenjene. Razlog nižih vrijednosti procjene DoC dobivenih analitičkim kalkulacijama usko su povezane s korištenjem valnih parametara koji su modelirani, a ne mjereni, s nepostojanjem podataka profila plaža te što su korištene jednadžbe izvedene i najčešće primjenjivane u procjeni DoC za pješčane plaže pod utjecajem drugačije energije valova. Prethodni rezultati iz literature pokazuju da je na istraženoj plaži prisutna kontinuirana erozija. Njezin utjecaj je vidljiv u južnom dijelu plaže gdje olujni valovi odnose sediment dok se u sjevernom dijelu materijal akumulira. Iz navedenog, detaljnija i preciznija istraživanja DoC mogu dati odgovore o učinkovitosti ponavljanih nasipavanja, adekvatnosti materijala za nasipavanja, najpovoljnijem periodu godine za nasipavanje te eventualnom redizajnu održavanja plaže. Na taj način se mogu smanjiti financijski izdaci koji nisu zanemarivi kod ovog načina prihranjivanja plaža.

U budućnosti procjene DoC bit će potrebno analizirati nizove profila i to minimalno na mjesečnoj bazi i nakon ekstremnih događaja kako bi se dobile upotrebljive anvelope za tu određenu plažu. Navedene analize trebale bi se provoditi kroz duži vremenski period imajući pri tome na umu da se uslijed klimatskih promjena najviši valovi mogu javiti i u dijelu godine u kojem ih se ne očekuje. Takvi ekstremni događaji su sve češće a očekuje se da će u budućnosti biti još češći i nepredvidljiviji.

Ovakva istraživanja iziskuju značajna financijska sredstva i vrijeme, ali su neophodna za implementiranje mjera za dugoročno i održivo upravljanje plažama te njihovom zaštitom. Metode koje se primjenjuju moraju se odabrati za svaku plažu posebno jer je svaka od njih pod različitim prirodnim i antropogenim utjecajima.

## 8. LITERATURA

**Anthony, E.J.** (2005): Beach erosion. In: Schwartz, M.I., *Encyclopedia of coastal science*. The Netherlands: Springer Science & Business Media, str. 140.

**Aragonés, L., Pagán, J. I., López, I., Serra, J.C.** (2018): New calculation method based on sediment data, *International Journal of Sediment Research*, Volume 33, str. 198-207

**Baučić, I.** (2000): Položaj, priroda, stanovništvo i naselja. In: Općina Dugi Rat, Dugi Rat, Poglavarstvo općine Dugi Rat, 7-14.

**Bird, E.C.F.** (1996): Beach management. John Wiley & Sons Ltd, Chichester, 5, 23, 281 str.

**Birkemeier, W.A.** (1985): Field data on seaward limit of profile change. *Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering* 111 (3); 598-602

**Blott, S.J. i Pye, K.** (2001): GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms*, 26, 1237-1248.

**Brutsché, K.E., Rosati III, J., Pollock, C.E., McFall, B.C.** (2016): Calculating Depth of Closure Using WIS Hindcast Data; Coastal and Hydraulics Engineering Technical Note; US Army Corps of Engineers

**Fairbridge, R.W.** (ed.), (1968): *The encyclopedia of Geomorphology*. New York: Reinhold Book, str. 1295.

**Folk, R.L. i Ward, W.C.** (1957): Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *Sediment Petrology*, 27, 3-26.

**Hallermeier, R.J.**, (1978): Uses for calculated limit depth to beach erosion. *Proceedings, Coastal Engineering*, 1493-1512.

**Hallermeier, R.J.**, (1981): A profile zonation for seasonal sand beaches from wave climate. *Coastal Engineering* 4; 253-277.

**Korbar, T.** (2009): Orogenic evolution of the External Dinaride sin the NE Adriatic region: a model constrained by tectonostratigraphy of Upper Cretaceous to Paleogene carbonates. *Earth Science Reviews*, 96(4), 296-312.

**Kraus, N.C., Larson, M. i Wise, R.A.** (1998): Depth of Closure in Beach-Fill Design. *Proceedings 12th National Conference on Beach Preservation Technology*, Tallahassee, Florida: Florida Shore & Beach Preservation Association, 271-286.

**Maleš, P.** (2017): Rješenje stabilizacije plaže primjenom numeričkog modela; diplomski rad; Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije.

**Marinčić, S., Korolija, B., Mamužić, P., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M. i Benček Đ.** (1976): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, List Omiš L33-22, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1968-1969); Savezni geološki institut, Beograd.

**Marinčić, S., Korolija, B., Mamužić, P., Magaš, N., Majcen, Ž., Brkić, M. i Benček Đ.** (1977): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, Tumač za list Omiš L33-22, Institut za geološka istraživanja, Zagreb (1968-1969); Savezni geološki institut, Beograd, 51 str.

**Marušić, D.** (2017): Utjecaj litoralizacije na suvremene promjene okoliša srednjodalmatinskog priobalja; doktorski rad; Sveučilište u Zadru, 290 str.

**Moccochain, L., Audra, P., Clauzon, G., Bellier, O., Bigot, J.Y., Parize, O. i Monteil, P.** (2009): The effect of river dynamics induced by the Messinian Salinity Crisis on karst landscape and caves: example of the Lower Ardeche River (mid Rhone Valley). *Geomorphology*, 109(12), 46-61.

**Nicholls, R.J., Birkemeier W.A., Lee, G.** (1998): Evaluation of depth of clodure using dana from Duck, NC, USA. *Marine Geology* 148, 179-201

**Pikelj, K.** (2010): Sastav i porijeklo površinskih sedimenata dna istočne strane Jadranskog mora. Doktorska dizertacija, Prirodoslovno-matematički fakultet, Sveučilište u Zagrebu, 239 str.

**Pikelj, K. i Juračić M.** (2013): Eastern Adriatic Coast (EAC): Geomorphology and Coastal Vulnerability of a Karstic Coast. *Journal of Coastal Research*, 29, 944-957.

**Pikelj, k., Ružić, I., Ilić, S., Kordić, B.** (2018): Implementing an efficient beach erosion monitoring system for coastal management in Croatia. *Ocean and Coastal Management*

**Powers, M.C.** (1953): A new roundness scale for sedimentary particles. *Journal of Sedimentary Petrology* 23 (2), 117-119

**Rajčić, S.T., Faivre, S. i Buzjak, N.** (2010): Promjene žala na području Medića i Mimica od kraja šezdesetih godina 20. stoljeća do danas. *Hrvatski geografski glasnik*, 72(2), 27-48

**Šeparović Markota, K.** (2019): Procjena stabilnosti plaže Dugi Rat nakon korekcije prakse nasipavanja; diplomski rad; Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno- matematički fakultet

**Tišljar, J.** (1994): Sedimentne stijene, Školska knjiga, Zagreb, 422 str.

**Tominić T.,** (2017): Varijabilnost morfologije i volumena žala Dugi Rat temeljena na SfM fotogrametriji; diplomski rad, Sveučilište u Zagrebu Prirodoslovno-matematički fakultet

**Valiente, N.G., Masselink, G., Scott, T., Conley, D. i McCarroll, R.J.** (2019): Role of waves and tides on depth of closure. *Marine Geology* 407, 60-75

**Vlahović, I., Tišljar, J., Velić, I. i Matičec, D.** (2005): Evolution of the Adriatic carbonate platform: palaeogeography, main events and depositional dynamics. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 220(34), 333-360

### **Internetski izvori**

<http://www.dugirat.com/novosti/101-znanost/20362-sto-se-dogada-s-plazama-iii>

<http://www.dugirat.hr/arhiva/download/2016-09-strategija-razvoja-opcine-dugi-rat.pdf>

<https://www.exploreiowageology.org/assets/powerpoint/LabMethods/ParticleSizeAnalysis.pdf>