Mogući holocenski tsunamiti u Jadranu

Lončar, Sara

Master's thesis / Diplomski rad

2017

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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:348692

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

SARA LONČAR

MOGUĆI HOLOCENSKI TSUNAMITI NA JADRANU

Diplomski rad

Zagreb, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET
GEOLOŠKI ODSJEK

SARA LONČAR

MOGUĆI HOLOCENSKI TSUNAMITI NA JADRANU

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

Mentor:
prof. dr. sc. Tihomir Marjanac

Zagreb, 2017.

Ovaj diplomski rad izrađen je na Geološko-paleontološkom zavodu pod vodstvom prof. dr. sc. Tihomira Marjanca, u sklopu diplomskog studija geologije zaštite okoliša na Prirodoslovno - matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu.

Zahvale

Veliko hvala...

... mentoru, **Tihomiru Marjancu** na pomoći kod odabira teme, savjetima, odvajanju slobodnog vremena, angažiranosti i omogućenom odlasku na teren.

...**Marini Čalogović** na odvojenom slobodnom vremenu i prijevozu na terenu.

...**prof. dr. sc. Jasenski Sremac** na ustupljenom uredu i mikroskopu te pomoći i sugestijama kod određivanja fosilnog sadržaja.

...prijateljima **Idi**, **Ireni**, **Luciji** i **Silviji** s kojima su dani studiranja proletjeli, kao i slobodno vrijeme zahvaljujući **Katici**, **Dori**, **Ines**, **Jani** i **Berdiku**.

...**Valeku**, na podršci, požurivanju i pomoći.

...obitelji, posebno **roditeljima** na podršci i omogućenom bezbrižnom studiranju.

TEMELJNA DOKUMENTACIJSKA KARTICA Diplomski rad

Sveučilište u Zagrebu

Prirodoslovno-matematički fakultet

Geološki odsjek

MOGUĆI HOLOCENSKI TSUNAMITI NA JADRANU

SARA LONČAR

Rad je izrađen na Geološko-paleontološkom zavodu Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska.

Sažetak: dio obale Paškog zaljeva na otoku Pagu, sjeverno od Crnike, prekriven je izdankom visine i do 5 m, u kojem je terenskom analizom utvrđena izmjena slojeva gline, pijeska i šljunka očigledno bogatih fosilnim sadržajem te je na dva mjesta izrađen sedimentološki stup s označenim slojevima i dubinama uzorkovanja. Terenskom i laboratorijskom analizom utvrđeno je da se marinski i terigeni organizmi javljaju u istim slojevima, što upućuje na promjenu okolišnih uvjeta te da veliki udio fosilnog sadržaja primarno obuhvaća marinske organizme, od kojih je mikrofauna pretaložena iz okolnih starijih naslaga, dok podrijetlo recentne makrofaune ostaje nerazjašnjeno. Prema nalazima keramike i stakla, koji upućuju na rimsko doba te blizini nekadašnjeg rimskog grada Cisse, današnje Caske, neobjašnjivog nestanka, moguća poveznica anomalnih slojeva s marinskom i terigenom faunom te nestanka grada je nagli i kratkotrajni događaj – oluja ili tsunami. S obzirom na nedostatak povijesnih zapisa i podataka, katastrofalnu štetu bez ikakvih tragova prijašnjih konstrukcija te veličinu i način života nekih od marinskih recentnih organizama, vjerodostojniji je scenarij tsunamija, iako ostaju nejasni uzrok, mjesto žarišta te putanja i način ulaska u Paški zaljev.

Ključne riječi: tsunami, tsunamit, fauna, fosilni sadržaj, Caska, Cissa, Pag

Rad sadrži: 72+X stranica, 53 slike, 2 tablice, 63 literaturnih navoda, 1 dodatak

Jezik izvornika: hrvatski

Rad je pohranjen u Središnjoj geološkoj knjižnici Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, Sveučilišta u Zagrebu, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Republika Hrvatska

Mentor: prof. dr. sc. Tihomir Marjanac

Ocjenjivači: - prof. dr. sc. Tihomir Marjanac, izvanredni profesor

- prof. dr. sc. Jasenka Sremac, redoviti profesor

- mr. sc. Dražen Kurtanjek, viši predavač

Rad prihvaćen: 30.6.2017.

BASIC DOCUMENTATION CARD Master Thesis

University of Zagreb

Faculty of Science

Department of Geology

POSSIBLE HOLOCENE TSUNAMITES IN THE ADRIATIC SEA

SARA LONČAR

Thesis completed at the institute of Geology and Paleontology, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Croatia

Abstract: coastal part of the Gulf of Pag at the Pag island, north of Crnika, is covered with outcrop in height up to 5 m made of alternation of layers of clay, sand and gravel, evidently rich in fossils as determined by the field analysis, where two sedimentological columns with marked layers and sampling depth have been made. Fieldwork and laboratory analysis found that the marine and land organisms are appearing in the same strata layers which indicates a change of environment, and also that the majority of the fossil record are of marine origin, with microfauna redeposited from the surrounding older strata while the origin of recent macrofauna remains unexplained. The discovery of Roman era glass and ceramics probably from the nearby Roman settlement Cissa, today known as Caska, which mysteriously dissapeared, together with the anomalic marine and terigenic fossils could indicate that the area was hit by a sudden and abrupt event like a storm or a tsunami. Considering the absence of historic record as well as no traces of previous constructions and the size of the recent marine organisms, the more probable cause is a tsunami, although the cause and the source of a tsunami remains unexplained, as well as its entry path in the Gulf of Pag.

Key words: tsunami, tsunamite, fauna, fossil record, Caska, Cissa, Pag

Thesis contain: 72+X pages, 53 figures, 2 tables, 63 references, 1 appendix

Thesis deposited in Central geological library, Faculty of Science, University of Zagreb, Horvatovac 102a, 10 000 Zagreb, Croatia

Original in: Croatian

Supervisor: Tihomir Marjanac, PhD

Reviewers: - Tihomir Marjanac, PhD, Associate Professor

- Jasenka Sremac, PhD, Full Professor

- Dražen Kurtanjek, MSc, Senior Lecturer

Thesis accepted: June 30th 2017

Sadržaj

1. UVOD 1
2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA 3
   2.1. NASTANAK TSUNAMIJA I TSUNAMITA 5
   2.2. ZNAČAJKE I RAZLIKOVANJE TSUNAMITA I TEMPESTITA 10
   2.3. POJAVE TSUNAMIJA NA JADRANU 12
      2.3.1. Podjela Jadrana na tsunamigene regije 16
      2.3.2. Tsunamiji u centralnom dijelu Jadrana – naglasak na talijanski dio obale 18
      2.3.3. Tsunamiji u južnoj Italiji i na području Sicilije 25
   2.4. TSUNAMITI NA JADRANU 30
      2.4.1. Tsunamiti na talijanskoj obali 30
      2.4.2. Tsunamiti na hrvatskoj obali 32
3. ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA 38
   3.1. GEOGRAFSKI SMJEŠTAJ 38
   3.2. GEOLOŠKA GRAĐA 39
   3.3. GENEZA ISTRAŽIVANOG TERENA 40
   3.4. TEKTONIKA 41
4. METODE ISTRAŽIVANJA 43
   4.1. TERENSKE METODE 43
   4.2. LABORATORIJSKE METODE 45
5. REZULTATI 46
   5.1. KVARTARNE NASLAGE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA 46
      5.1.1. Pleistocenske naslage 50
      5.1.2. Holocenske naslage 51
   5.2. FOSILNI SADRŽAJ 53
      5.2.1. Mikrofosili 53
      5.2.2. Makrofosili 59
6. DISKUSIJA 62
   6.1. ZNAČAJKE FAUNE 62
   6.2. INTERPRETACIJA REZULTATA 64
7. ZAKLJUČAK 68
8. LITERATURA 69
DODATAK I VII

1. UVOD

Elementarne nepogode važan su aspekt geologije potreban za izgradnju razumijevanja prirodnih pojava kroz svjetsku povijest, a najviše pažnje usmjereno je na potrese i u novije vrijeme tsunamije, kao izrazito razarajuće katastrofalne događaje koji se javljaju na našoj planeti (Shiki et al., 2000). U posljednjih nekoliko desetaka godina, zbog izrazito velikih ljudskih i ekonomskih gubitaka izazvanih udarima ekstremnih valova, došlo je do naglog porasta javne percepcije obalnih geohazarda, što je privuklo pozornost znanstvenika i potaknulo istraživanja sedimentnog zapisa nastalog djelovanjem tsunamija i snažnih oluja (Engel & Brückner, 2011).

Sedimenti interpretirani kao produkti udara tsunamija, nazivaju se tsunamiti i identificirani su u vidu geoloških i suvremenih "zapisa" u slijedu obalnih sedimenata na brojnim lokacijama diljem svijeta (Cantalamessa & Di Celma, 2005). Slojevi sedimenta istaloženi djelovanjem tsunamija javljaju se kao anomalne, neprirodne značajke unutar okolne stratigrafije te se ne mogu interpretirati u smislu normalnih taložnih procesa u raznim sedimentnim zapisima varijabilnima u pogledu starosti i okoliša, u kojima su opisani (Massari et al., 2009). Tsunamiti spadaju u kategoriju na koju se geolozi referiraju kao momentne, ili događajne naslage (engl. „event deposits"), tj. epizodične naslage kratkog trajanja povezane s neobičnim ili visoko-energetskim procesima, u odnosu na naslage svakidašnjih, normalnih uvjeta, koje se podrazumijevaju pod već spomenutim nazivom pozadinske naslage (engl. „background deposits"). Ne postoji konkretna definicija za momentni događaj kod ovakvih sedimenata, a u marinskom okolišu, fizički parametri najbliži tom pojmu su oluje, turbiditne struje, podmorska klizišta, odroni te tsunamiji (Bourgeois, 2009).

Na Jadranu su zabilježene pojave koje se mogu svrstati u tsunami, kao i naslage za koje se pretpostavlja da se radi o tsunamitima. Veći je broj zabilježenih pojava tsunamija i interpretiranih tsunamita duž talijanske obale, poglavito sa Sicilije, dok se na području Hrvatske spominju dubiozni sedimenti s otoka Brusnika te otoka Hvara (granica K-Pg) kao mogući primjeri tsunamita, a jasno su zabilježeni moderni slučajevi tsunamija u okolici Hvara iz 1962. s epicentrom u okolici Hvara (Herak et al., 2001) te iz 1978. s epicentrom u Grčkoj, tijekom kojeg je najviše pogođena Vela Luka, a nešto manje Starigrad na Hvaru te Mljet i Trogir (Zore-Armanda, 1988).

Zadatak je bio istražiti potencijalni tsunamit na obali hrvatskog dijela Jadrana, točnije na otoku Pagu u Paškom zaljevu (slika 1.1.) te ga usporediti sa tsunamitima opisanima u literaturi, kako bi utvrdili radi li se zaista o tsunamitu te mogućem scenariju tsunamija u Jadranskom moru tijekom holocena, odnosno rimskog doba. Na istraživanje tog dijela obale i izdanka nagnali su nas uzorci prije 9 godina prikupljeni s obližnjeg područja, čiji su nalazi makrofaune i arheoloških fragmenata uputili na mogućnost tsunamija kao taložnog procesa. Drugi slučaj koji smo uzeli u obzir je legenda o propasti rimskog grada Cisse, današnje Caske, koja je netragom nestala i tek u novije vrijeme pronađeni su opskurni ostaci zidova kuća te tragova konstrukcija nekadašnje luke. Propast grada veže uz potres oko 365. godine, s epicentrom u okolici Krete. Unatoč tome, u obzir smo uzeli mogući scenarij tsunamija, djelomično zbog legende koja spominje da je grad propao u more, tj. da ga je progutalo more, a većim dijelom zbog pronađenih sedimenata i činjenice o nedostatku pisanih zapisa ne samo o propasti grada, nego i o šteti koja bi u drugim gradovima bila evidentirana tako jakim potresom. Na istraživanom terenu, obišli smo dio obale kojom se prostire izdanak interesnog područja, kojeg smo detaljno proučili, na 2 mjesta duž izdanka s najizraženijom uslojenošću izradili smo sedimentološke stupove te prikupili uzorke za daljnju laboratorijsku analizu. Također, duž izdanka smo prikupili makrofosilni sadržaj i arheološke fragmente koji su se nazirali iz sedimenta.



Slika 1.1. Položaj otoka Paga te istraživanog područja (plava točka) na karti Europe i Hrvatske [1]

2. PREGLED DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA

Prva dokumentirana geološka istraživanja otoka Paga datiraju s polovice 19. stoljeća, kada su objavljeni prvi detaljniji geološki podaci u sklopu geološke karte i tumača Austro-Ugarske Monarhije, s općenitim prikazom stratigrafsko-strukturnih odnosa u Dalmaciji. Daljnji radovi također su podrazumijevali prikaz otoka Paga u specijalnim geološkim kartama i preglednim kartama, na kojima većina autora izdvaja paleogenske i kredne naslage, a od kraja 19. stoljeća objavljivani su radovi u kojima su autori iznosili rezultate istraživanja naslaga i njihovih odnosa koje prekrivaju područje Paga, koji su bili osnova za nadolazeća istraživanja.

Drugom polovicom 20. stoljeća, krenuo je veliki projekt izrade Osnovne geološke karte (OGK) mjerila 1:100.000, s kojim su započeta i detaljna geološka istraživanja na području čitave Hrvatske, tako i otoka Paga. U sklopu geološke karte za list Silba i Molat, koji obuhvaća dio otoka Paga s područjem našeg istraživanja, Mamužić et al. (1970) te Mamužić & Sokač (1973), detaljno opisuju odnose i tektoniku promatranog dijela otoka Paga i u geološkom tumaču potvrđuju da je Pag dio tektonske jedinice Ravni Kotari, odnosno nastavak sjevernodalmatinskog kopna i sastoji se od ostataka vrlo protegnute zone tektonskih korita koja su ispunjena srednjoeocenskim laporima, "diluvijalnim" pijeskom i kršjem. Osim na listu Silba i Molat, otok Pag se nalazi i na listovima Zadar, Gospić i neznatnim dijelom na listu Rab.

Bitno je spomenuti i geografski orijentirana istraživanja otoka Paga, kojima su se bavili Rogić (1972), u regionalizaciji otoka prema fizičko-geografskim kriterijima te Magaš (2000), koji je analizirao i opisao sve aspekte i obilježja otoka Paga, uključujući detaljan pregled geoloških značajki, iako se primarno posvetio fizičko-geografskim i socio-geografskim. Također, Faričić (2003), analizom starih kartografskih prikaza otoka Paga daje uvid u prostornu percepciju tadašnjih kartografa, a njihova odstupanja, u odnosu na današnji izgled, objašnjava prostornim procesima koji su oblikovali specifičan krajolik otoka, ali i samim kompleksnim krajolikom koji je zbunjivao kartografe. Duplančić Leder et al. (2004), iznose suvremenu definiciju pojma otok te rezultate mjerenja razvedene obalne crte hrvatskog dijela Jadrana, prema kojima je Cres površinom najveći hrvatski otok (do sada je bilo uvriježeno mišljenje da je to Krk), dok Pag ima najdulju obalnu crtu. Od nešto novijih istraživanja, Brenko (2015) analizira i interpretira nove strukturne podatke o borama i rasjedima na jugoistočnom dijelu otoka Paga.

Iako ne ulazi u istraživani dio terena, moramo spomenuti važnost nalazišta neogenskih ugljenonosnih sedimenata, čiju važnost naglašavaju Mamužić & Sokač (1973), u tumaču lista Silba i Molat, s obzirom da su od svih hrvatskih otoka identificirani jedino na otoku Pagu, u području Crnike (manjim dijelom Kolana), a istraživali su ih i Bulić & Jurišić-Polšak (2009), koji su opisali fosiliferne lapore Crnike – od čega su građeni, fosilni sadržaj, mjesto i vrijeme taloženja te Jiménez-Moreno et al. (2009), koji iznose rezultate stratigrafske studije neogenske jezerske sukcesije i uvjete taloženja. Područje Crnike u neposrednoj je blizini proučavanog terena te se idući prema jugu na Crniku nastavljaju promatrane naslage, uz izuzetak spomenutih neogenskih naslaga miocenske starosti koje na proučavanom terenu nisu otkrivene.

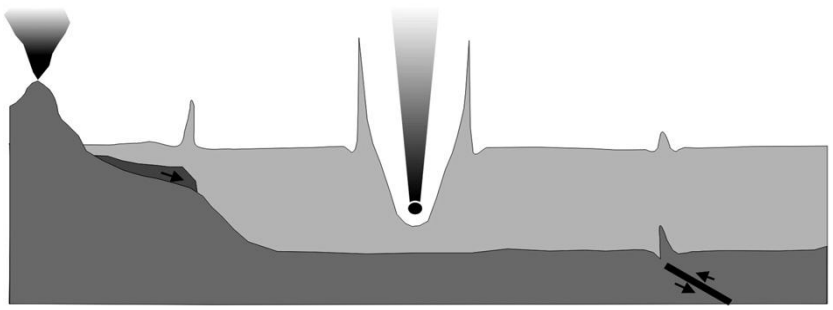
Dalje ćemo se osvrnuti na istraživanja u kojima su autori opisivali tsunamije i sedimentne naslage koje su interpretirali kao tsunamite. Prema Ambraseys (1962), najraniji zapisi o pojavi tsunamija općenito vežu se uz ranogrčke filozofe, od kojih je Thucydides u 5. stoljeću p.n.e. prvi iznio mišljenje kako uzrok fenomena poput tsunamija treba tražiti u potresima te kako bez potresa ne bi došlo do tsunamija. Aristotel je iznio tezu kako strujanjem zraka nastaju seizmički morski valovi i uzrokuju potrese, zbog kojih se otvaraju jame u morskom dnu u koje utječu voda i valovi, zbog čega se more ponekad povlači a ponekad poplavljuje obale. Nakon njega, Strabo je u 7 st. povezao promjene na morskom dnu s promjenama na površini mora i tražio objašnjenje u uzroku promjena na morskom dnu. Zanimljivo je da je Aristotelova teza ta koja se zadržala sve do renesanse kada Leonardo Da Vinci, 1489. iznosi slično mišljenje, a nakon toga, tek od kasne renesanse, fenomen tsunamija ponovno postaje objektom istraživanja. Uz začetke istraživanja tsunamija, Ambraseys donosi i katalog sa zabilježenim tsunamijima za istočni Mediteran i Jadran (13 zabilježeno), koji seže od 2 st. p.n.e. sve do danas. Paulatto et al. (2007), također donose katalog tsunamija, neovisno o njihovom postanku, za cijelu obalu Jadrana od 58. godine p.n.e., a Jadran su podijelili na 6 kategorija i za svaku opisali mogući scenarij tsunamija na temelju prošlih zabilježenih događaja. Tinti et al. (2004), u katalog tsunamija uvrštavaju događaje vezane isključivo za talijansku obalu, koji broje 67 tsunamija od erupcije Vezuva pa do danas. Sinteza svih triju kataloga, s bilješkama vezanima za područje Jadrana i talijanske obale, prikazana je u DODATKU 1.

Osim istraživanja tsunamija i tsunamita navedenih u poglavljima 2.1. i 2.2., istraživanjima usko vezanim za tsunamite i njihovo razlikovanje od drugih visokoenergetski istaloženih sedimenata, bavili su se Cantalamessa & Di Celma (2005), jedni od rijetkih koji su

istraživali karakteristike tokova povlačenja tsunamija (engl. „tsunami backwash“), unutar tsunamita u miocenskim pješčenjacima sjevernog Čilea. Dawson et al. (2007), detaljno opisuju sve procese i uvjete nastanka tsunamija te njegovog djelovanja tijekom 4 glavne faze – postanka, napredovanja, plavljenja i povlačenja. Također iznosi potrebne uvjete da bi tsunami ostavio trag u sedimentu, odnosno uvjete nastanka tsunamita. Morton et al. (2007) i Engel & Brückner (2011), referirajući se na ranija istraživanja iz tog područja, napravili su detaljan pregled karakteristika tsunamita i tempestita te po čemu se razlikuju. Massari et al. (2009) istražuju pliocensku kompozitnu plitkomorsku karbonatnu sukcesiju interpretiranu kao tsunamit na temelju obilne i raznovrsne faune školjkaša, koja upućuje na iznenadno uzburkavanje okoliša.

2.1. NASTANAK TSUNAMIJA I TSUNAMITA

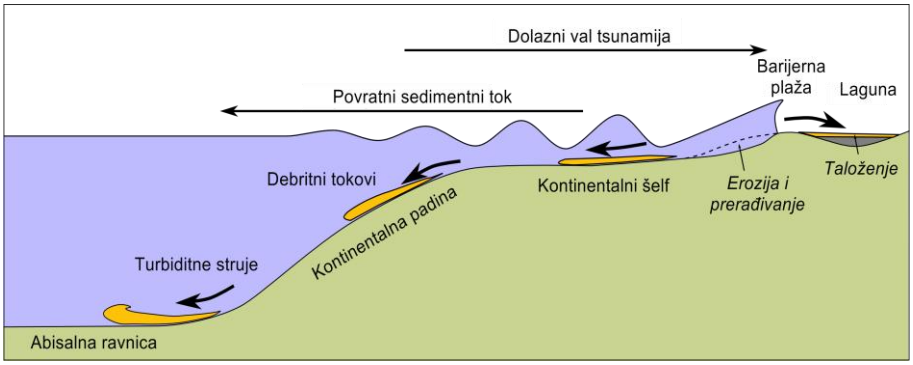
Tsunami je dugoperiodički val velikih valnih duljina i brzina, tj. intenzivno i kratkoročno gibanje stupca vode, nastalo uzburkavanjem velike mase vode djelovanjem snažne sile i procesa koji uzrokuje vertikalan pomak površine vode (mora, oceana, jezera) iz njenog ravnotežnog položaja (Orlić 1984; Brookfield et al., 2005; Paulatto et al., 2007; Wang et al., 2015;). Fizika rada tsunamija obuhvaća 4 preklapajuća i karakteristična procesa: a) vertikalni pomak vodene mase, što podrazumijeva vertikalne pomake morskog dna, ili vertikalne udare na površinu morske vode (slika 2.1.1.), a radi se o iznenadnim tektonskim pomacima dna, podmorskim i obalnim odronima te klizištima, vulkanskim erupcijama eksplozivnog tipa, piroklastičnim tokovima, kolapsu bočnih dijelova vulkana, atmosferskim visokofrekventnim poremećajima ili trošenju rubnih dijelova ledenjaka te impaktima (Dawson et al., 2007; Engel & Brückner, 2011), b) propagaciju vala koji ulaskom u obalne vode uzrokuje c) poplavljivanje kopnenih područja, nakon čega slijedi d) povlačenje vala natrag prema otvorenom moru, proces koji je najčešće potpuno zanemaren. Od navedenih uzročnih mehanizama, iznenadan impuls na stupac vode direktno induciran podizanjem ploča duž subdukcijske zone, odnosno



Slika 2.1.1. Mehanizmi glavnih uzroka tsunamija: veliki potresi vertikalnog pomaka dna, padinski procesi (često prate vulkanizam) te impakti (Dawson et al., 2007)

podmorski potresi, posebno potresi nastali uslijed vertikalnog pomakom duž rasjeda, najčešći su uzroci tsunamija (Engel & Brückner, 2011; Wang et al., 2015). Ovisno o jačini samog poremećaja, varira i veličina posljedičnog tsunamija, čija visina približavanjem obali i plićinama poprima velike razmjere – brzina vala rapidno se smanjuje, a amplituda se povećava i do nekoliko desetaka metara, razlog zbog kojeg su toliko razorni ako pogode naseljena obalna područja (Dawson et al., 2007; Wang et al., 2015).

Od 4 faze djelovanja tsunamija, bitno je spomenuti da sve, osim faze nastanka mogu ostaviti karakteristični trag u sedimentima (Dawson et al., 2007).



Slika 2.1.2. Depozicijski model tsunamija s označenim mjestima taloženja sedimenta nošenog valom tsunamija (označeno žutom bojom) u smjeru nailaska vala i poplavljivanja obale/kopna, ili u smjeru povratnog vala nazad prema moru [2]

Sedimenti nastali tsunamijem, tsunamiti (slika 2.1.2.), dobro su dokumentirani tek od nedavno, jer tsunamiji obično pogađaju područja s izraženom erozijom, koja su izložena povremenom ili stalnom djelovanju morskih struja i valova, poput poplavnih područja/ravnica, plitkovodnih i obalnih područja te podmorskih kanjona, a u kojima je mala mogućnost sačuvanja momentnih sedimenata. Drugi razlog je što sedimentni zapis nastao djelovanjem tsunamija može biti istovjetan s geološkim karakteristikama drugih iznenadnih, visoko-energetskih, marinskih i obalnih procesa (Dawson et al., 2007).

Kod potresnih tsunamija, da bi nastao prepoznatljiv tsunamit, potrebna je M>8, međutim, ne ostavljaju svi veliki potresi trag u sedimentu jer većina podmorskih potresa ima horizontalni pomak kojim ne utječu na stupac vode, dok tzv. tsunami potresi uzrokuju daleko veće tsunamije nego što se očekuje od njihovih seizmičkih valova, zbog velikog raskoraka i pomaka na dnu uslijed dugotrajnog i sporog rasjedanja (slika 2.1.1.) (Pickering et al., 1991; Dawson et al., 2007). Tsunamiji generirani klizećim masama obično su neznatni na većim udaljenostima jer inicijalni valovi u izvoru stvaraju vodeni zid kojem visina približno odgovara debljini klizeće mase, no samo se mali dio gravitacijske energije (<1% do 15%) prenosi na valove u vodi, tako da oslabe brže od seizmogenih. Osim debljine klizne mase bitna je i njena brzina; jako brza klizanja generirati će visoki tsunami (visina = debljini mase), dok jako sporo klizanje uopće ne mora stvoriti tsunami, a doseg ovih tsunamija i dalje je

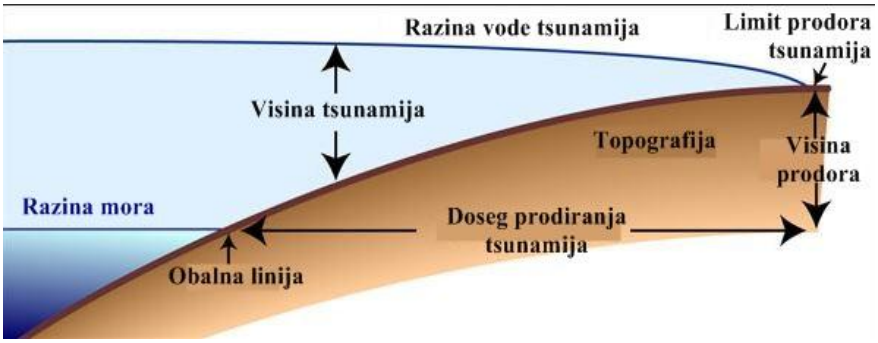
nepoznat. Slično slučaju s klizištima, tsunamiji generirani impaktima brzo slabe s udaljenošću, međutim, npr. impaktom bolida promjera 100 m i nakon 1000 km pređene udaljenosti tsunamiji će biti visoki desetak metara, a takvi impakti pogađaju Zemlju svakih 3000-5000 godina. U zadnjih 3.5 milijardi godina od preko nastalih 8000 kratera, 160 je otkriveno na površini Zemlje, 7 na dnu oceana, a 20 koji se nalaze na kopnu nastali su pri marinskim impaktima, tako da su marinski impakti potencijalno važni tsunamigeni proces. Najčešći scenarij nastanka tsunamija impaktom uključuje udare bolida srednjih veličina, do 500 m promjera, što se dogodi svakih 1000 do 100 000 godina i takvi tsunamiji dovoljno su veliki da ostave geološki trag (Dawson et al., 2007).

U otvorenom moru, širenje prolaznog tsunamija odvija se kružnim kretanjem čestica s konstantnom horizontalnom te vertikalnom komponentom najvećom na površini, a najmanjom pri dnu oceana. Upitno je ostavlja li takav način putanje trag u sedimentu morskog dna s obzirom da su brzine pri dnu, na dubinama većim od krajnje točke šelfa, nedovoljne da uvuku i transportiraju sediment grublji od čestica silta pa je mala vjerojatnost da će tsunamiji generirani potresima ostaviti trag u dubokomorskom sedimentu, u odnosu na mehanizme koji generiraju valove jako velikih amplituda. Npr. pri erupciji vulkana Thera (Santorini) u kasnom bakrenom dobu, valovi su bili visoki 7-17 m, a pridnena brzina strujanja bila je 0.2-0.5 m/s, na temelju čega je dobiveno da muljeviti sediment ne može biti uvučen u suspenziju pri brzinama strujanja ispod 0.15 m/s. Abisalni sediment može biti uvučen u suspenziju, no stres smicanja koji djeluje samo u gornjem stupcu vode, pri samoj površini, onemogućuje izdizanje većih količina sedimenta (Dawson et al., 2007).

Približavanjem tsunamija obali, sediment morskog dna biva suspendiran, a količina sedimenta dostupnog za mobilizaciju važan je čimbenik rezultantnog traga tsunamija, s obzirom da obalne zone oskudijevaju sedimentom pa je moguće da tsunami pogodi obalu ne ostavljajući pritom nikakav trag. Prilikom oplićavanja, tok tsunamija postaje turbulentan i uspori se na ~10-20 m/s, a čak i pri smanjenim brzinama može transportirati sediment od finih glinenih čestica do velikih gromada. Tsunami zatim u vidu gustog turbiditnog toka prodire u unutrašnjost kopna (slika 2.1.3.) te erodira, transportira i taloži sediment na obalu/kopno. Brzina toka se pritom smanjuje do <5 m/s, ovisno o morfologiji obale, a opada i erozivnost pa taloženje grubog sedimenta raste. Jednom kada nadiranje vala dosegne maksimum, tok svugdje doseže točku s brzinom toka 0 m/s i detritus krupniji od silta se taloži iz stupca vode, a sitnozrnatije čestice ostaju u suspenziji. Tada se smjer toka mijenja i kreće povratni val, što

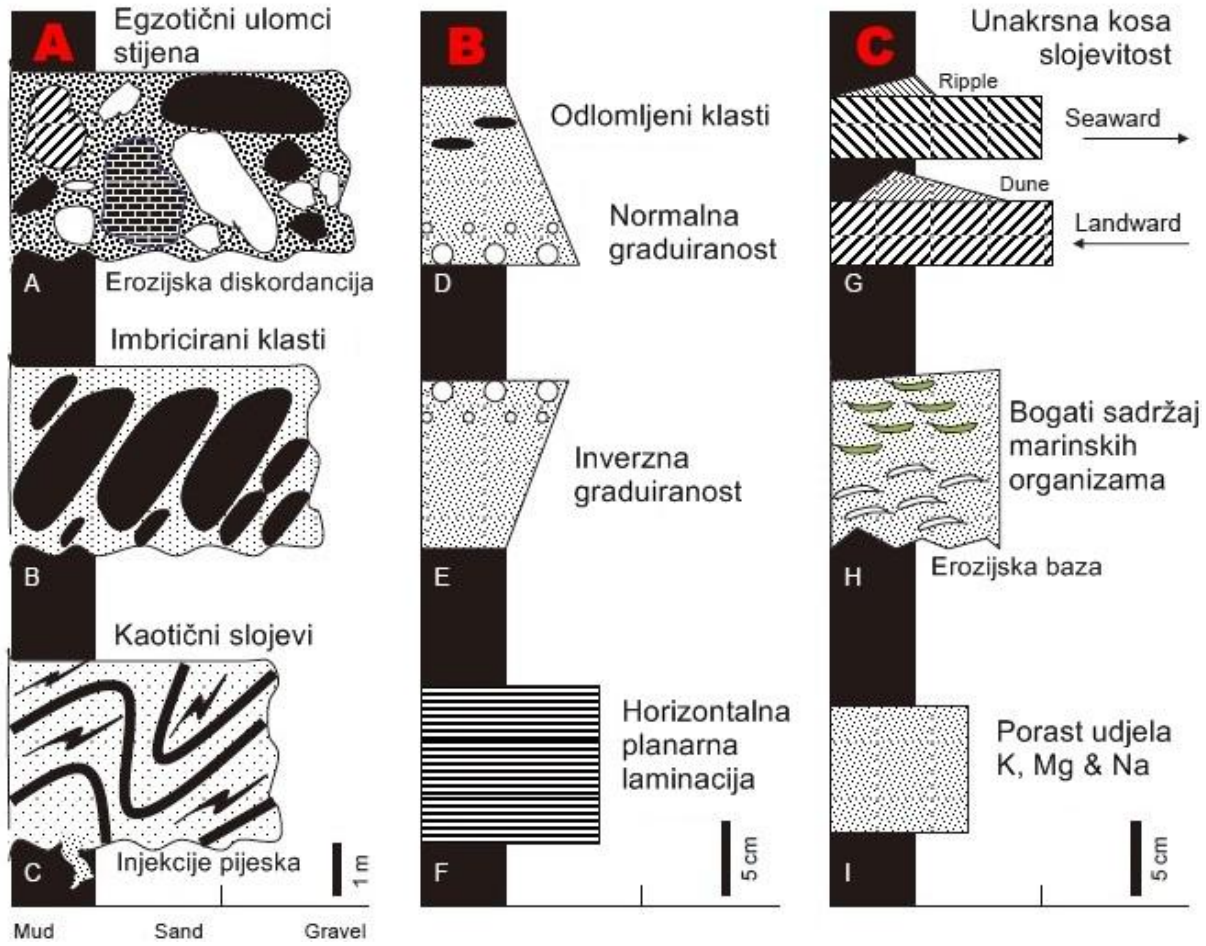
stvara novu eroziju i transport sedimenta prema moru (Dawson et al., 2007; Morton et al., 2007).

Povratni tok jedinstvena je osobina tsunamija koja ostavlja karakterističan trag u sedimentu, a o čijem mehanizmu nastanka postoji jako malo informacija. Kapacitet nosivosti tokova opterećenih sedimentom je nepoznat, no očito se radi o erozivnim tokovima koji mogu preraditi obalne sedimente istaložene tijekom nadiranja vode te inicirati eroziju i kavitaciju podine. Topografija obale i različita dubina usmje-rava povratni val u kanale, čineći povratni tok potencijalno eroziv-nijim i snažnijim od poplavnog vala, posebno tamo gdje su brzine toka povećane odbijanjem od kopnenih, obalnih klifova. Povratni tok postupno gubi energiju te se taloži loše sortirani sediment relativno blizu obale. Takav sediment karakterizira: a) normalno graduiranje s klastima veličine šljunka do odlomaka stijena u bazi, b) kaotičan sediment s odlomcima stijena u sitnozrnatom matriksu, c) slojevi nefosilifernog, nekalcitnog, loše sortiranog sedimenta u izmjeni s kalcitnim fosilnim slojevima, d) slojevi s obilnim biljnim trunjem i proslojcima sitnozrnatog, grubog sedimenta, e) promjene tečenja i prisutnost nesumnjivo plitkomorskih indikatora poput pukotina u mulju, f) unakrsna laminacija pijeska (slika 2.1.4.) te g) obilje erozijskih kanala (Dawson et al., 2007).



Slika 2.1.3. Prodiranje tsunamija u unutrašnjosti obale/kopna; doseg ovisi o topografiji i jačini tsunamija. Označene su fizičke veličine tsunamija u odnosu na razinu mora poput limita polavljivanja, visine tsunamija, te dosega poplavljivanja u visinu i daljinu [3]

Veliki tsunamiji imaju više valova pa drugi poplavni val, može preko sedimenta prvoga istaložiti novi materijal, ili erodirati i preraditi stariji sediment. Također, prolaskom takvih valova, epizode visokoenergetskog transporta sedimenta mogu biti u izmjeni s periodima mirovanja, u kojima se iz suspenzije taloži sitnozrnatiji sediment. Nakon inicijalne turbulencije, pijesak (brzina taloženja 0.25 cm/s) bi se istaložio iz 100 m vode tijekom 12 sati, dok bi za silt i glinu trebalo nekoliko dana, ovisno o turbulenciji. Prema tome, većina uzburkanog sedimenta ostala bi u suspenziji između valova tsunamija, no dio pomiješanog sedimenta istaložio bi se tijekom mirnog perioda, što se očituje tankim niskoenergetskim slojem (slika 2.2.3.) (Dawson et al., 2007).



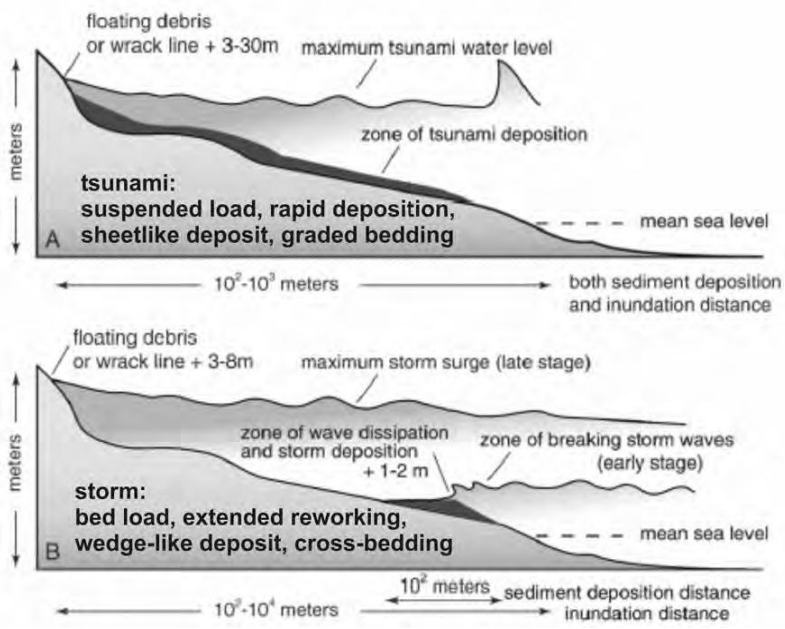
Slika 2.1.4. Generalne karakteristike koje se najčešće javljaju u tsunamitima: A) a. egzotični klasti, b. imbrikacija, c. kaotični slojevi; B) d. ulomci razlomljenih klasta te normalna i rijeđe e. inverzna gradacija; C) g. unakrsna laminacija i h. bogati fosilni sadržaj. Navedena obilježja, prema nekim autorima, moguća su i kod tempestita, a posebno: B) f. horizontalna laminacija; C) i. povećana koncentracija minerala K, Mg, Na (Shanmugam, 2015).

Ne iznenađuje činjenica da tsunamit može biti izrazito kompleksan i masivan sediment, no analizom veličine zrna moguće je pripisati sloj sedimenta zasebnoj epizodi nadiranja ili povlačenja tsunamija. Promjenom smjera tečenja između epizoda naleta i povlačenja vala, obično nastaje masivni depozit od pijeska, silta i sitnog šljunka s izoliranim fragmentima stijena. Udarni tokovi u pravilu talože marinski pijesak i zaobljeni šljunak, a povratni loše sortiranu mješavinu tla, nemarinskog pijeska i šljunka s fragmentima bilja. Tsunamiti mogu sadržavati riblje ostatke, krhotine ljuštura školjaka, dijelove koralja do veličine šljunka te šljunak s marinskim mekušcima ugrađenima u šupljine na stijenama, koje svjedoče o transportu iz dubokomorskih predjela. Mikrofauna uključuje velik broj fragmenata dijatomeja i foraminifera, od kojih su neke dubokomorske i ukazuju da je tsunami pokupio foraminifere s morskog dna (Dawson et al., 2007; De Martini et al., 2010).

2.2. ZNAČAJKE I RAZLIKOVANJE TSUNAMITA I TEMPESTITA

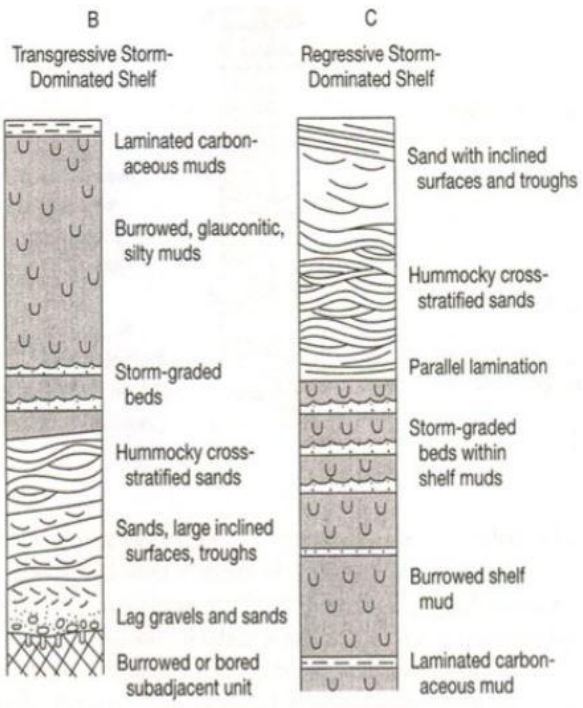
U otvorenom oceanu, tsunamiji za razliku od olujnih valova mogu 'osjećati' dubinu morskog dna zbog valnih duljina minimalno tri puta većih od dubine oceana pa prolazak tsunamija uključuje cijeli stupac vode. No, u valovitom plitkomorskom okolišu teško je razlikovati sedimente tsunamija od olujnih zbog mnogih sličnosti, a nadolazeće oluje mogu izmijeniti, ili erodirati tsunamite (Pickering et al., 1991). Nekoliko novijih studija usporedile su tempestite i tsunamite, a kao glavni faktor raspoznavanja navodi se, uglavnom kod tsunamita, karakterističan način sedimentacije jer je dalji transport i prema kopnu i prema moru te veliki razlomljeni klasti nasumično raspoređeni, ili izolirani, ili u sklopu anomalnog sloja (slika 2.1.4. i 2.2.1.) (Cantalamessa & Di Celma, 2005).

Oluje mogu proizvesti valove kojima su duljina i amplituda slične onima kod tsunamija, ali imaju manju brzinu i energiju, postižu manje i slabe amplitude i imaju slabiji erozijski potencijal približavanjem plićinama što rezultira velikim brojem poplavljivanja i prodora u unutrašnjost u pulsevima koji otpuštaju malo energije. Kod većine obilježja koja služe za raspoznavanje visokoenergetskih naslaga u cjelokupnom sedimentnom zapisu nekog područja, potrebna su detaljna istraživanja šireg područja u svrhu utvrđivanja nastanka naslaga djelovanjem tsunamija ili oluje, uragana. Karakteristike koje se javljaju kod jednih i kod drugih su: oštar donji kontakt i trend stanjivanja naslaga u distalnim dijelovima unutrašnjosti kopna (slika 2.2.2.) (Engel & Brückner, 2011).



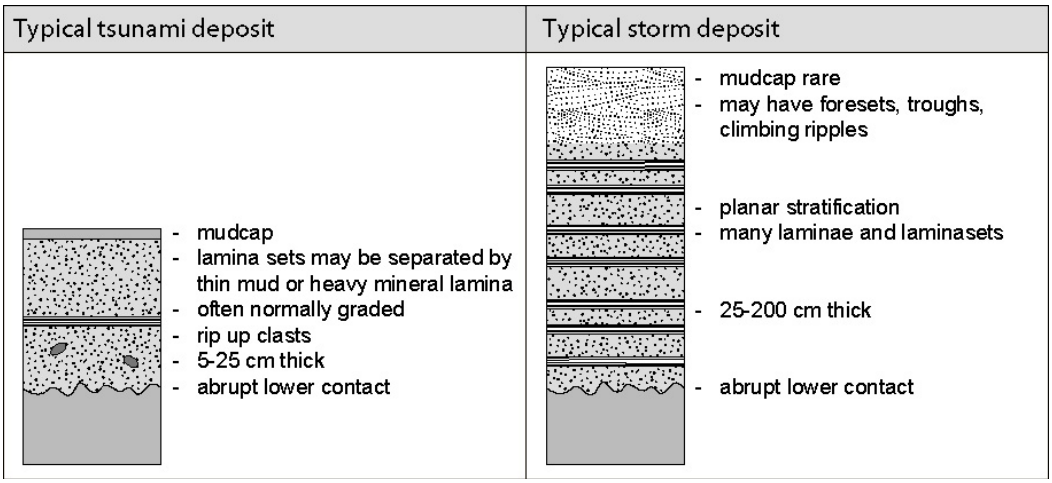
Slika 2.2.1. Razlike u dubini toka, dosegu prodora u unutrašnjost i transportu i taloženju sedimenta za pijesak djelovanjem: A) tsunamija i B) oluje (Bourgeois, 2009; Morton et al., 2007).

Tsunamiti su obično manje debljine u odnosu na tempestite, no imaju zasebne slojeve veće debljine, koji su obično masivni, normalno graduirani, lošije sortirani i bez ikakvih internih struktura (slike 2.1.4., 2.2.3.) te rasprostranjeni dublje u unutrašnjost kopna, u odnosu na tempestite ograničenog dosega, 200-250 m od obale (Dawson et al., 2007; De Martini et al., 2010). Karakteristike koje ukazuju na tsunamigeno porijeklo su i tragovi utiskivanja, tragovi zapljuskivanja i razlomljeni klasti podinskih stijena, što je rijetko u tempestitima. Karakteristike tipične za tsunamite nerijetko uočene kod tempestita su normalna, rjeđe inverzna graduiranost, prodor u unutrašnjost kopna (znatno veći kod tsunamita) (slika 2.2.1.), unakrsna stratifikacija tipična za tokove tsunamija prema kopnu i povratni tok prema moru, što je kod tempestita rijetko, ali se može nalaziti u bazalnom dijelu kojeg karakterizira bimodalna distribucija veličine zrna i sadržaj mikrofaune, koja je kod tsunamita obično oštećena i s puno fragmenata brakičnih i slatkovodnih vrsta pomiješanih s morskim, što je bilo zapaženo i kod nekih tempestita (slika 2.2.1.). Također, nalazi školjaka češće su artikulirani i s većim stupnjem razlomljenosti kod tsunamita, nego kod tempestita, a kaotične nakupine bentičkih dijatomeja sastavljenih od raznih marinskih fragmenata i ulomaka školjaka, indikativnije su za tsunamite, iako su pronađene i u tempestitima.



Slika 2.2.2. Primjer stupa tempestita: B) kod transgresije i C) kod regresije [4]

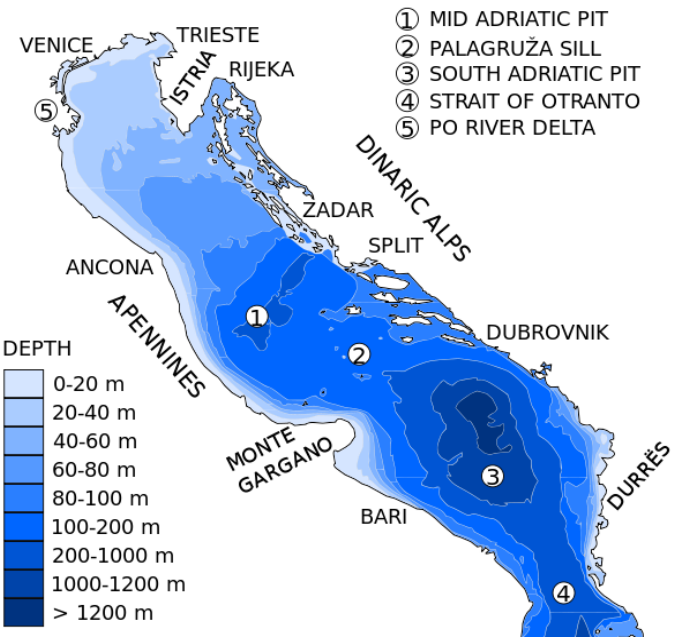
Obilježja koja ukazuju na tempestite su povećana koncentracija teških minerala, poput turmalina ili cirkona, što ovisi o mjestu taloženja i dostupnosti teških minerala (slika 2.1.3), dok kod tsunamita situacija varira pa je ponekad koncentracija teških minerala povećana, a ponekad manja u odnosu na okolne naslage. Rezultati geokemijskih analiza češće samo dokazuju viskoenergetsko poplavljivanje i ne služe kao kriterij raspoznavanja tsunamita i tempestita. Tempestite, obično sastavljene od srednje-sortiranog marinskog pijeska, koji mogu sadržavati međusobno uslojene i laminirane (slika 2.2.3.), s riplovima te unakrsno uslojene slojeve, koji se ne moraju bitno razlikovati od graduiranih tsunamita, ali generalno, laminirani slojevi te humčasta unakrsna slojevitost (slika 2.2.2) učestaliji su kod tempestita.



Slika 2.2.3. Generalna usporedba tsunamita i tempestita. Lijevo je shema tsunamita, a desno tempestita prema Morton et al. (2007).

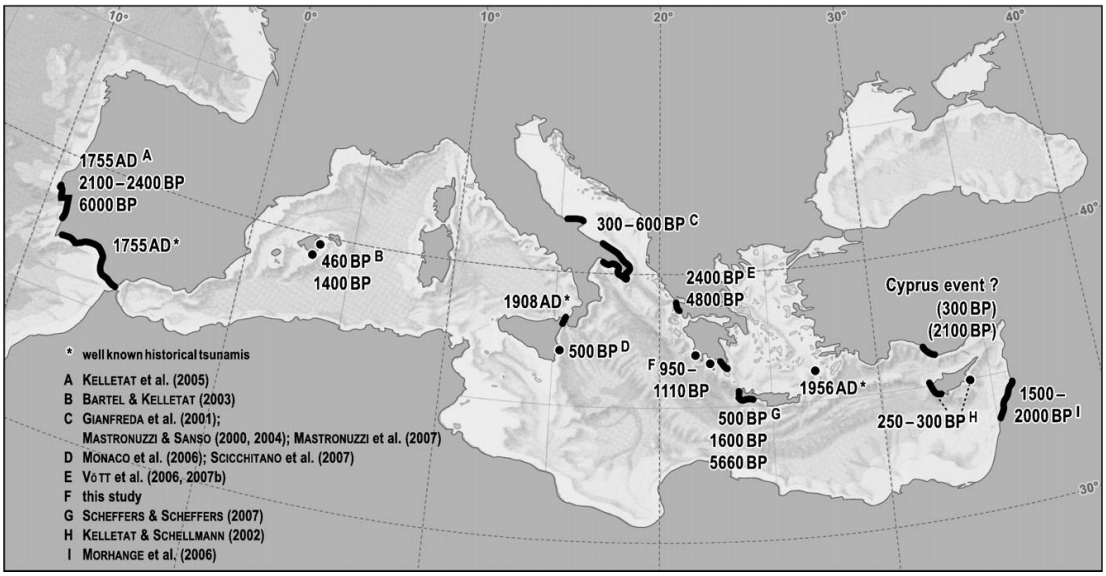
2.3. POJAVE TSUNAMIJA NA JADRANU

Na području Jadranskog mora relativno slabe seizmičnosti, s potresima u unutrašnjosti ploča, uglavnom umjerenih magnituda M<7 (slika 2.3.3.) te male debljine stupca vode (tipično ispod 400 m) (slika 2.3.1.), u zadnjih 2000 godina zabilježeno je oko 60 pojava tsunamija, od kojih su neki na talijanskoj obali bili izrazito razarajući. Iz provedenih analiza, simulacija i literature, znamo da se mogu očekivati tsunamiji amplitude od nekoliko metara, iako su češći slučajevi potresa dubljeg epicentra, manje magnitude i malih tsunamija. Ipak, provođenje simulacija bilo je važno jer se radi o gusto naseljenim područjima i malo vremena za alarmiranje stanovništva. Unatoč slabijoj seizmičnosti, s obzirom na plitke obale i visoke plime (duplo više nego u Mediteranu), umjereni tsunami od nekoliko metara, u kombinaciji s visokom plimom, može uzrokovati znatne štete pa identifikacija tsunamigenih zona (slika 2.3.2.) igra bitnu ulogu u realnoj procjeni rizika tsunamija (Maramai et al., 2007; Paulatto et al., 2007).



Slika 2.3.1. Batimetrijska karta Jadranskog mora s označenim srednjejadranskim jarkom (1), pragom Palagruže (2), južnojadranskim jarkom (3), tjesnacem Otranto (4) i deltom rijeke Po (5) [5]

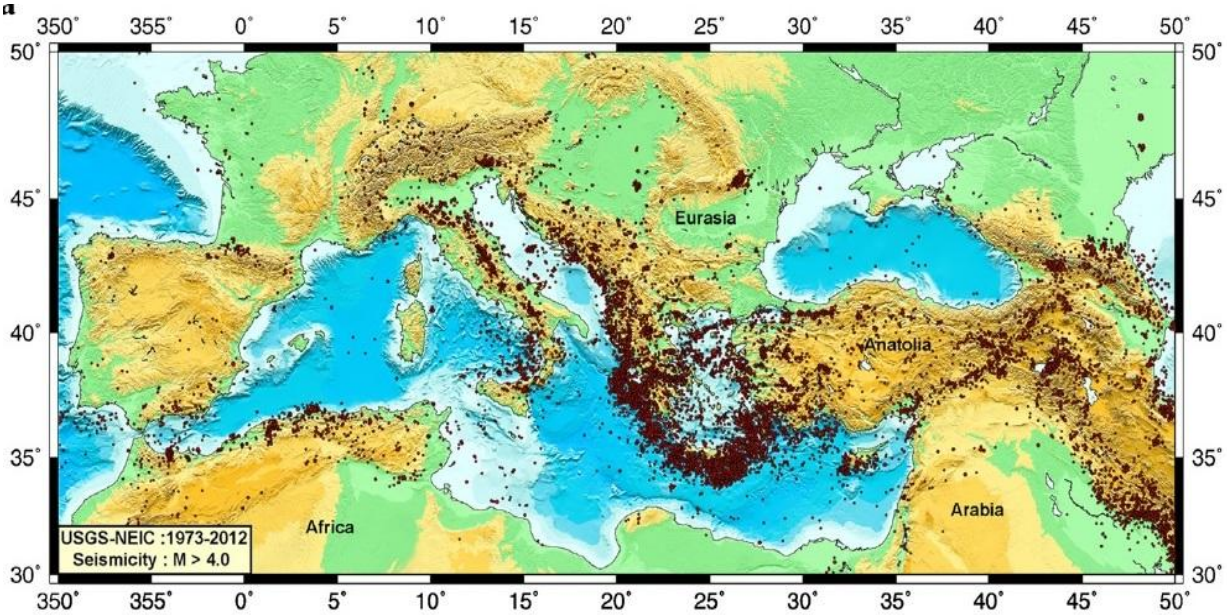
Modeliranje scenarija hazarda provodi se kako bi se, u trenutku opasnosti, što učinkovitije, spriječile i ublažile posljedice katastrofe po ljude i okoliš izloženog područja. U slučaju pojave tsunamija u Jadranskom moru, izračunava se maksimalna amplituda vertikalnog pomaka vodenih čestica na površini vode, vrijeme dolaska tsunamija do najbližih naseljenih područja i maksimalna amplituda tsunamija u obalnim dijelovima. U obzir se uzima i horizontalan pomak, često veći od vertikalnog i za cijelu magnitudu, a koji je bitan faktor dosega tsunamija u unutrašnjost (slika 2.1.3.). U sklopu modeliranja scenarija hazarda, bitno je bilo definirati tsunamigena područja (slika 2.3.2.) unutar Jadranskog mora te razinu opasnosti, za što se važnim pokazalo izučavanje literature, povijesnih zapisa i seizmograma, čiji je produkt bila izrada kataloga povijesnih potresa i posljedičnih tsunamija (DODATAK I) (Maramai et al., 2007.; Paulatto et al., 2007.).



Slika 2.3.2. Lokacije tragova tsunamija u holocenu na čitavom Mediteranu, zajedno s rezultatima datiranja tsunamita (Scheffers et al., 2008)

Kod modeliranja, uzeto je u obzir da što je veća magnituda potresa, veća će biti i maksimalna amplituda tsunamija. Potresi s magnitudama M=6.0 (blizu maksimalne magnitude mnogih regija Jadrana) generiraju tsunamije od nekoliko cm, koji u kombinaciji s lokalnim morfološkim obilježjima te plimom ili olujom, mogu znatno porasti. Zatim, što je žarište potresa na većoj dubini, maksimalna amplituda tsunamija biti će manja, odnosno plitkim potresima prije će se generirati jači, i tsunami općenito, u odnosu na duboke potrese. I konačno, udaljavanjem od žarišta tsunamija njegova amplituda raste, a debljina stupca vode utječe na amplitudu na dva načina: a) gdje je stupac vode deblji, valovi tsunamija brže putuju i geometrijsko širenje je intenzivnije – putanja valova od žarišta tsunamija, koji prelaze npr. južnojadranski jarak (ispod Palagruže; slika 2.3.1.), gdje debljina stupca vode doseže 1200 m, biti će kraća i s valovima većih amplituda (u usporedbi s putanjama iste udaljenosti od

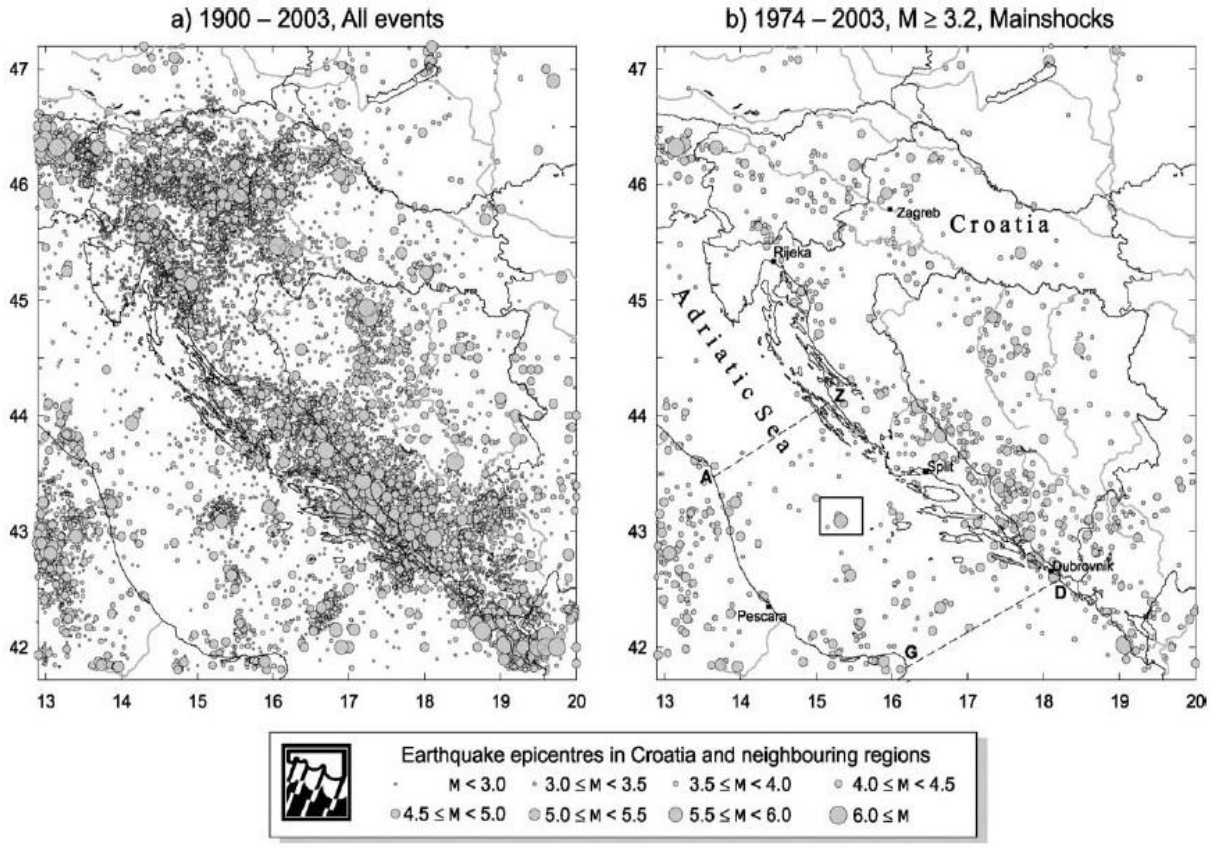
epicentra na manjim dubinama); b) kod potresa s epicentrom ispod tanjeg stupca vode, manja je mogućnost generiranja tsunamija. Debljina stupca vode može uzrokovati i različitu refrakciju i time promjenu putanje valova (Paulatto et al., 2007).



Slika 2.3.3. Seizmičnost na području Mediterana i Jadrana s epicentrima potresa M>4.0 u razdoblju od 1973.-2012. (Yolsal-Çevikbilen & Taymaz, 2012).

Svi navedeni fenomeni koji utječu na vrijeme i brzinu širenja vala te amplitudu, zajednički se nazivaju amplifikacija i odgovorni su za konačnu visinu tsunamija te jačinu i doseg prodiranja u unutrašnjost. Glavni faktor je povećanje amplitude približavanjem vala obali, koja prati progresivno stanjivanje stupca vode jer se prema principu očuvanja energije, energija vala ulaskom u pličine pohranjuje u manjem volumenu vode, zbog čega se povećava amplituda. Linearna teorija za faktor amplifikacije, Greenov zakon, tipično rangira od 1 (nema porasta) do nekoliko jedinica (porast amplitude), ovisno o razmatranoj domeni, a u specifičnom slučaju kao što je Jadransko more, gdje debljina stupca vode iznad žarišta potresa i tsunamija varira od nekoliko desetaka pa do 1000 m, Greenov zakon daje za faktor amplifikacije vrijednosti od 1.0–2.1. Povećanje amplitude vala traje sve dok amplituda ne dosegne manje od polovice debljine stupca vode, nakon čega nelinearni faktori uzrokuju razbijanje valova i s vremenom njihovo povlačenje u suprotnom smjeru. Drugi fenomen koji doprinosi povećanju amplitude vala jest preklapanje signala, zbog činjenice da valovi putuju mnogo sporije u plitkim nego dubokim vodama, tako da brijeg vala koji prvi dosegne pliće dijelove, može biti preklopljen dolom tj. zadnjim dijelom signala, što često rezultira porastom amplitude (Paulatto et al., 2007).

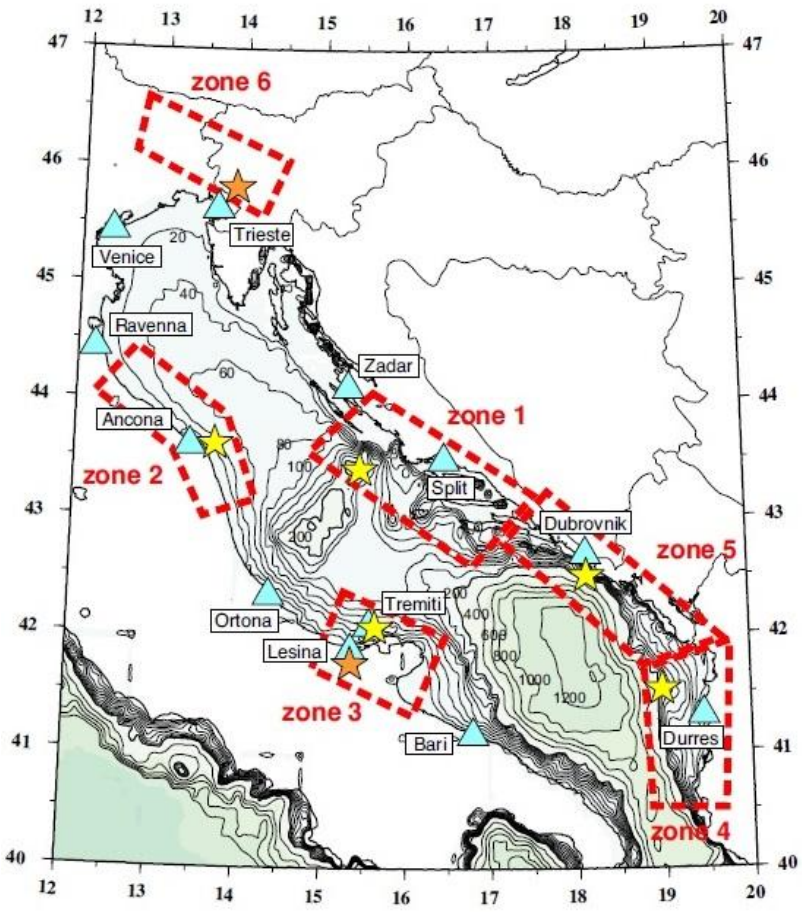
U sjevernom Jadranu, osim u slučajevima ekstremnih magnituda (M>7.0), nema ozbiljnijeg rizika od jačih potresa i razornih tsunamija, a čak i u slučaju tsunamija u ostalim regijama, zbog male debljine stupca vode i vremena potrebnog da tsunami dosegne sjeverne obale (od 2 do 4h), amplituda bi bila neznatna. U centralnom Jadranu, oko Ancone i Splita, potresi ne predstavljaju problem na malo većoj udaljenosti od epicentra, a prema historijskim podacima, seizmičnost u okolici Lesine i otočja Tremiti uzrokovala je velike potrese i štete, s valovima amplitude i do nekoliko metara. Područja na kojimu potresi češći i većeg intenziteta najizloženija su generiranju tsunamija, a smještena su na istočnoj obali bazena, gdje se Jadranska ploča podvlači pod Dinaride i Albanide, tj. na jugu Jadrana i obalama južne Hrvatske, Bosne i Hercegovine, Crne Gore i Albanije, s velikom vjerojatnošću jakog potresa (M>7) (slika 2.3.4.) i maksimalnom amplitudom tsunamija od nekoliko metara, koja bi na zapadnoj obala Jadrana bila jedva 1 m. Od ostalih regija, poluotok Gargano, istočna obala centralne Italije te sjeverna obala Italije također su izložene nastanku i udaru tsunamija (Maramai et al., 2007.; Paulatto et al., 2007). Potencijalno najopasniji izvori tsunamija smješteni su ipak na talijanskom kopnu, gledajući vrijeme udara tsunamija nekoliko minuta nakon potresa, što ne ostavlja dovoljno vremena za evakuaciju i spašavanja stanovništva.



Slika 2.3.4. Seizmičnost hrvatske obale. A) epicentri potresa svih magnituda u razdoblju 1900-2003. B) epicentri potresa M≥3.2 između 1974-2003 (Herak et al., 2005)

2.3.1. Podjela Jadrana na tsunamigene regije

Paulatto et al. (2007), služeći se tradicionalnim pristupom modeliranja nastanka tsunamija, koji se bazira na rješavanju hidrodinamičkih jednadžbi, zajedno s uvjetima na granicama ploča oceanskog dna, koji odgovaraju statičkom poremećaju koji je nastao potresom, iznose 2 metode, u potpunosti sukladne s uvjetima na granici ploča. Prva metoda obuhvaća grupu podmorskih potresa i ograničena je isključivo na potrese i posljedične tsunamije sa žarištem na dnu mora/oceana, daleko od obale. Stupac vode smatra se homogenim i nekompresivnim pa je model primjenjiv kod različitih debljina stupca vode i nikakva vertikalna stratifikacija vode nije uzimana u obzir. Druga metoda, s obzirom na indikacije da izvori potresa blizu obale i na kopnu mogu uzrokovati jake valove tsunamija, obuhvaća tzv. kopnene ili obalne potrese. Ovaj slučaj proširen je dodatkom obalne linije, uzimajući u obzir golemi stupac vode konstantne debljine. Kod podmorskih potresa veća je vjerojatnost nastanka tsunamija u odnosu na kopnene/obalne potrese, a maksimalna amplituda tsunamija ovisi o magnitudi potresa.



Slika 2.3.1.1. Podjela Jadrana na tsunamigene zone prema Paulatto et al. (2007)

Osim definiranja epicentara i podjele potresa na podmorske i kopnene/obalne, na temelju literature i kataloga potresa, ovisno o lokaciji i udaljenosti od obale, Paulatto et al. (2007), definirali su 6 tsunamigenih zona: zona 1 – istočni dio centralnog Jadranskog mora i obala Hrvatske; zona 2 – istočna obala Italije; zona 3 – poluotok Gargano (zona 3a s izvorom tsunamija daleko od obale te zona 3b s izvorom tsunamija na kopnu); zona 4 – sjeverne obale Albanije; zona 5 – obale južne Hrvatske, Bosne i Hercegovine te Crne Gore; zona 6 - Julia i

Friuli (slika 2.3.1.1.). Od navedenih zona, sa žarištem potresa i tsunamija na dnu mora su 1, 2, 3a, 4 i 5, dok su zone 3b i 6 s izvorima potresa i tsunamija na obali, ili kopnu. Za svaku zonu određena je fiksna točka epicentra na temelju povijesnih potresa zabilježenih u katalogu potresa, što u ovom slučaju predstavlja lokalni seizmicitet. Pobliže smo opisali zone koje uključuju obale Hrvatske, odnosno zonu 1 i 5, a zbog važnosti spomenuli smo i zone 3 i 4.

Zona 1: istočni dio centralnog Jadrana i obala Hrvatske, uključuje područje JI od otoka Jabuke te hrvatsku obalu od Zadra do Hvara. Seizmičnost obalnog dijela proizlazi iz subdukcije Jadranske ploče pod Dinaride, a kod centralnog dijela koncentrirana je u unutrašnjosti ploča. Maksimalna zabilježena M=6.1. Važnost ove zone leži u centralnoj poziciji na Jadranu te iako je epicentar bliže hrvatskoj obali, tsunamiji dulje putuju i slabijeg su intenziteta na hrvatskoj nego talijanskoj obali, zbog manje dubine na hrvatskoj strani. Osim toga, hrvatska obala nejednolika je i zaklonjena mnoštvom otoka, otočića i hridi, tako da efekti tsunamija ovise o morfologiji i lokalno mogu biti uvećani, ili umanjeni. Vrijeme širenja vala je približno 3 sata i više, dovoljno je da se alarmira stanovništvo i vlasti, uz razvijen sustav alarmiranja u slučaju hazarda. Regija najviše izložena naletu tsunamija iz ove zone je talijanska obala od Ancone do poluotoka Gargano (slika 2.3.1.1.).

Zona 3: poluotok Gargano. Potres iz 1627., s epicentrom blizu Capitanata (slika 2.3.2.1.), uzrokovao je najrazorniji tsunami ikad zabilježen na Jadranu, koji je pogodio obale Gargana. Mjesto nastanka potresa i tsunamija i dalje je diskutabilno pa je zona podijeljena na: 3a - žarište potresa i tsunamija u podmorju s odabranom M=6, 6.5 i 7, epicentrom blizu otočja Tremiti koji se podudara s epicentrom potresa iz 1908., M=4.4; 3b - žarište potresa i tsunamija na kopnu/obali, s dva epicentra, od kojih je jedan 20 km u unutrašnjosti blizu grada San Severo i odgovara epicentru potresa iz 1627., a drugi je 10 km u unutrašnjosti. Magnitude odabrane za simulacije bile su 6.5 i 7.

Zona 4: sjeverna obala Albanije, uključujući kopneni dio regije. Seizmičnost ovog područja određena je subdukcijom Jadranske ploče pod Albanide, a maksimalna zabilježena magnituda iznosi M=7.3, najjača u jadranskoj regiji. Vrijednosti magnituda za simulaciju bile su 6.5, 7.0 i 7.5, a epicentar se podudarao s epicentrom potresa iz 346. godine, M=7.3. Zbog visokih magnituda i seizmičnosti, unatoč epicentrima u unutrašnjosti kopna tsunamigenost ove zone je dosta velika. Prema simulacijama, istočna obala Jadrana izloženija je udaru potresa i tsunamija (posebno kod $M \geq 7$), dok je talijanska obala djelomično zaštićena južno-jadranskim jarkom (slika 2.3.1.)

Zona 5: južna Hrvatsku, Bosna i Hercegovina i Crna Gora, točnije obalni dio Hrvatske od Hvara do granice s Bosnom i Hercegovinom te obalni dio BiH i Crne Gore. Seizmičnost ovog dijela određena je subdukcijom Jadranske ploče pod Dinaride, a maksimalna zabilježena M=7.2. Vrijednosti magnituda odabranih za simulaciju bile su 6.5, 7.0 i 7.5, a epicentar je bio sukladan s epicentrom potresa iz 1520., M=6.5, nedaleko od Dubrovnika. Izračunata amplituda tsunamija za područje oko Dubrovnika doseže i do 5 m, a u slučaju M>7, visine valova oko žarišta tsunamija dosežu 1 m. Za zone 4 i 5 vrijede isti uvjeti.

2.3.2. Tsunamiji u centralnom dijelu Jadrana – naglasak na talijanski dio obale

Maramai et al. (2007), koncentrirali su se na centralni dio Jadrana (zone 1, 2 i 3 prema Paulatto et al., 2007) i pomoću kataloga tsunamija prema Tinti et al. (2004), opisali su potrese i tsunamije koji su pogodili ovu zonu u posljednjih 100 godina (što je pogrešno s obzirom da su u obzir uzeli događaje iz 17. i 19. stoljeća). Prema katalogu, sveukupno 8 tsunamija, od kojih je većina bila slabijeg intenziteta (slika 2.3.2.1.), pogodilo je centralni Jadran i jedan se istaknuo jačinom, a radi se o potresu i tsunamiju iz 1627. Prema katalogu, centralni Jadran je podijeljen na 4 subregije: sjeverni centralni Jadran s 1 tsunamijem, centralni Jadran s 3 zabilježena tsunamija, od kojih su 2 seizmički generirana, a za 3. se pretpostavlja da je nastao podmorskim odronom te Gargano i Apulia, oboje pogođeni s 2 tsunamija, od kojih su svi osim jednog seizmičkog nastanka. Uz spomenuta 3 tsunamija centralnog Jadrana talijanske obale, na koja su se primarno osvrnuli, izučavanjem potresa magnitude M>5 u posljednjih 100 godina, kojih je bilo 13, došli su do zapisa o još dvije pojave tsunamija.



Slika 2.3.2.1. Distribucija tsunamija centralnog Jadrana, prema ITC po Tinti et al., (2004). Zvijezde na karti predstavljaju izvore tsunamija te je označen izvor tsunamija iz 1627. (Maramai et al., 2007).

Prvi od bitnijih događaja koje ćemo spomenuti, odnosi se na hrvatsku obalu i tsunami koji je koincidirao s velikim potresom u Dubrovniku 1667. Prema zapisima, voda u dubrovačkoj luci povukla se u tri navrata, tako da su brodovi u luci pali i udarili dno i svaki

put se vratila tolikom silom da je izgledalo kao da će se brodovi prevrnuti, prema izvještajima iz sjevernijih dalmatinskih mjesta, nema nikakvog spomena pojave izuzetnih valova (Orlić, 1988.).



Slika 2.3.2.2. Područje zahvaćeno udarom potresa i tsunamija 1672. i 1875. Zvijezde na karti su izvori tsunamija (Maramai et al., 2007).

Prvi tsunami koji je pogodio centralnu Italiju (zonu 3 prema Paulatti et al., 2007), nastao je nakon potresa, 14. travnja 1672., koji je uzrokovao veliku štetu i ljudske žrtve. Potres M=5.7 i I=VIII (MCS) nastao je u unutrašnjosti, nekoliko km od Riminija (slika 2.3.2.2.), gdje se more nakon potresa povuklo za 15 m i ribari koji su bili blizu obale mogli su vidjeti jaku uzburkanost površine mora. Intenzitet tsunamija u katalogu je 2.

17. ožujka 1875., nakon jakog potresa u centralnoj i dijelu sjeverne Italije, drugi tsunami je pogodio obale centralne Italije, isto u okolici Riminija (slika 2.3.2.2.), gdje su ribari osjetili snažan horizontalan šok i primijetili velike valove. U luci je bila visoka plima i more se iznenada povuklo, vraćajući se u prvobitno stanje nakon 2 minute. Intenzitet tsunamija u ITC je 3 (prilično jak).

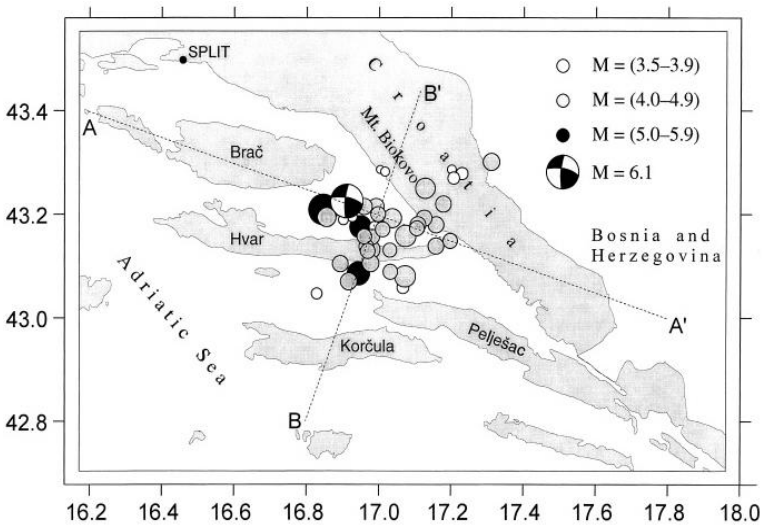
Iduća 2 tsunamija nisu bila navedena u ITC katalogu tsunamija, već su dodatnim istraživanjima autori došli do podataka. Prvi seizmički događaj započeo je 17. svibnja i trajao sve do prosinca 1916., a uzrokovao je katastrofalne štete u Riminiju i susjednim naseljima (slika 2.3.2.3.). Glavni udar dogodio se 17. svibnja, no daleko je poznatiji potres 16. kolovoza (M=5.9, I=VIII (MCS)), koji je značajno pogoršao postojeće stanje. Izrazito snažan je bio u Riminiju i Riccionu te lokalitetima duž obale i nakon ovog udara, prema člancima iz tadašnjih novina, uočeni su manji valovi tsunamija, intenziteta 2 prema Ambraseys-Sieberg skali. Drugi tsunami pogodio je grad Senigallia 30. listopada 1930. (slika 2.3.2.3.), nakon potresa poznatog kao „Senigallia potres“, M=5.9 i I=VIII–IX (MCS), s epicentrom na obali. Maksimalni efekti očitovali su se u gradu, gdje je potres uzrokovao veliku štetu, potpunu destrukciju mnogih građevina te



Slika 2.3.2.3. Izvori potresa i tsunamija 1916. i 1930. te pogođena područja (Maramai et al., 2007).

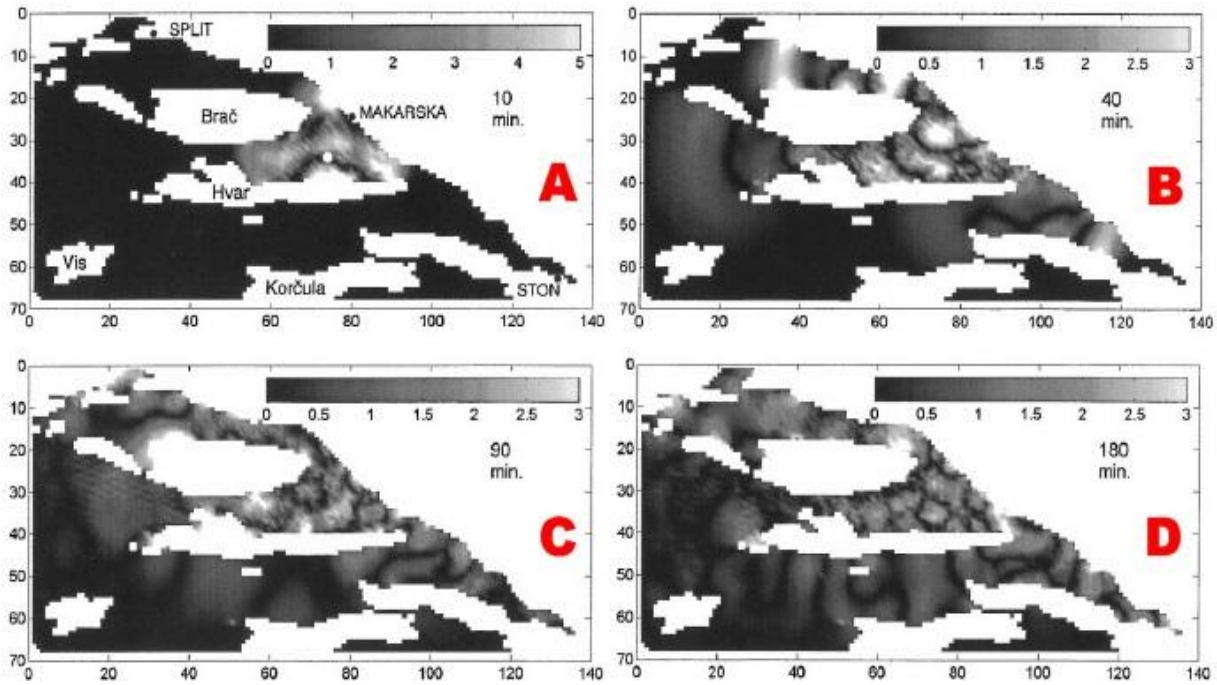
nekolicinu ljudskih žrtava. Jaki tsunami u luci Ancone, prema zapisima u novinama, došao je u vidu visoke plime prilikom čega se more jako pjenilo i uzburkalo, a američkom parobrodu „Molo della Sanit`a", koji je bio usidren u luci, pod naletom jakih valova puknulo je uže pa se nasukao na obalu. Pristaništa u luci bila su jako oštećena, s brojnim pukotinama i ogradama iščupanima iz tla. Intenzitet tsunamija, prema Ambraseys-Sieberg skali iznosi 4.

Hrvatsku obalu centralnog Jadrana, osim tsunamija u Makarskoj koji ćemo kasnije opisati, pogodio je i tsunami nakon serije potresa koja je započela 7. siječnja 1962. s manjim udarom M=5.9, nakon kojeg je slijedio glavni potres, 11. siječnja oko 5 ujutro M=6.1 i I=VIII (MCS). Obalno područje Makarske i okolice, u periodu od samo tjedan dana, pogodilo je preko stotinu potresa, koji su generirali prvotno zanemaren tsunami, koji se proširio hrvatskom obalom centralnog Jadrana, tako da ovog tsunamija nema u ITC. Prema Herak et al. (2001), bilješke seizmičkih postaja u Zagrebu i Crnoj Gori ukazuju da se većina jakih potresa dogodila se na dnu kanala između otoka Brača i Hvara te kopna, a nekolicina je bila i na kopnu ispod Biokova, ili dublje u unutrašnjosti. Epicentralno područje prostire se površinom duljine 50 km, okomito na obalnu liniju i širine 30 km, a dubine hipocentra su između 5 i 20 km, tipično za ovu regiju (slika 2.3.2.4.). Tektonski režim karakterizira okretanje Jadranske karbonatne platforme oko pola u sjevernoj Italiji, obrnuto od kazaljke na satu te kolizija s Dinaridima duž jadranske obale, za koju se pretpostavlja da je prouzročila deformaciju morskog dna reversnim rasjedanjem i dovela do potresa (Herak et al., 2001). Kod rasjedanja, vertikalna komponenta bila je manja od horizontalne, što ne dovodi do generiranja tsunamija, a izvor tsunamija bio je smješten 5 km od epicentra jakih potresa što odgovara području nastanka naknadnih potresa. Napredovanje vala tsunamija u arhipelagu centralnog Jadrana modelirali su Herak et al. (2001), simulacijom širenja valova malih amplituda u plitkom, homogenom stupcu vode. Kratki valovi (visoko-frekventni valovi kratkih perioda), bili su zadržani u području epicentra između kopna i otoka i u nemogućnosti da rezonantno



Slika 2.3.2.4. Epicentri serije potresa u okolici Makarske iz 1962. Gavni potres imao je M=6.1 (Herak et al., 2001).

pobude okolna obalna područja, dok su se dugi valovi (nisko-frekventni valovi dugih perioda), proširili izvan Bračkog kanala te su za 40 minuta dosegnuli Split (55 km udaljen od epicentra), brzinom od 80 km/h s lokalno zamjetnom amplifikacijom zbog varijabilne morfologije obale. U Makarskoj, najbliže epicentru, prevladavali su valovi perioda 10 min, dok su u Splitu i Stonu učestaliji bili valovi perioda preko 20 min. Razlika u širenju kratkih i dugačkih valova poprima obrise gledajući promjene na površini vode s vremenom (slika 2.3.2.5.), koje su simulirane za tri lokaliteta pogođenog područja, a navedeni efekt ne može biti uslijed različite difrakcije valova tsunamija prolaskom kroz Brački kanal jer bi se u tom slučaju i kratki valovi proširili van zaljeva, tako da se zadržavanje valova kratkih perioda objašnjava različitim ponašanjem valova različitih perioda u kontaktu s nepravilnom i varijabilnom obalnom linijom i morfologijom. Ono što je i dalje upitno i ostaje predmetom za buduća istraživanja jest je li navedeni scenarij lokalnog karaktera, ili je mogući i kod drugih tsunamigenih potresa centralnog Jadrana.



Slika 2.3.2.5. Simulacija napredovanja tsunamija iz 1962. kod Makarske. Širenje tsunamija nakon: A) 10 min, B) 40 min, C) 90 min, D) 180 min (Herak et al., 2001).

Treći tsunami koji je pogodio centralnu Italiju 21. lipnja 1978., manifestirao se u obliku anomalne obalne oscilacije mora u trajanju 10-15 minuta, zabilježene duž 300 km obalne linije, između Giulianove i Barija. U Giulianovi more se povuklo za oko 50 m i nakon 6 minuta vratilo se natrag, premašujući prethodnu razinu mora za oko 60 cm. Na drugim mjestima duž obale more se povuklo za 2-3 m, nakon čega je poplavilo plaže i obale do 200 m u unutrašnjost, maksimalne visine 50 cm. Anomalne promjene površine vode primijećene su i na istočnoj strani jadranske obale, u Baru (30 cm), Dubrovniku (30 cm) i Splitu (40 cm) (slika 2.3.2.6.). Taj dan nije bio zabilježen nikakav potres pa se u obzir uzima podmorski odron, dok se u katalogu pripisuje nepoznati uzrok (Maramai et al., 2007). Nedavna istraživanja pokazala su kako istraživano područje nije sklono velikim podmorskim odronima, a jasni dokazi o masovnim odronima postoje uz JZ granicu Jadrana, više od 100 km od obale, južno od poluotoka Gargano, gdje strme padine povezuju plitku Jadransku karbonatnu platformu s dubokim Jonskim morem.



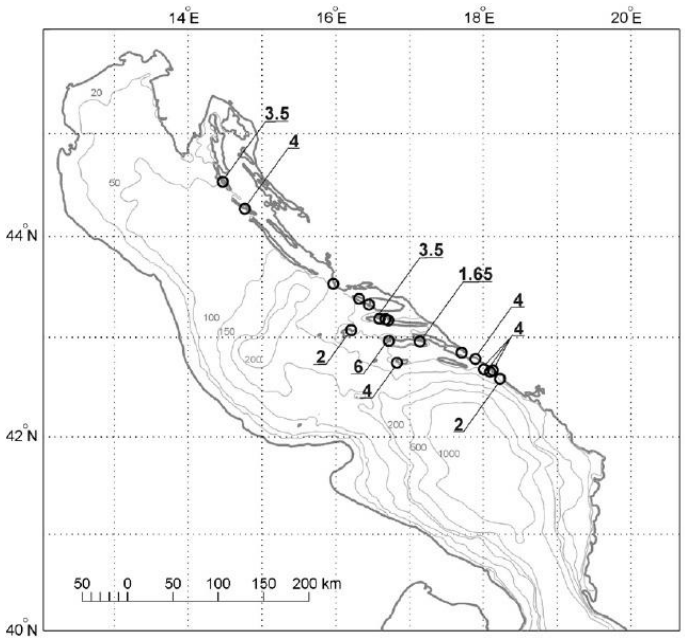
Slika 2.3.2.6. Lokaliteti sa zabilježenim efektima tsunamija iz 1978. Zvjezdica je izvor tsunamija (Maramai et al., 2007)



Slika 2.3.2.7. Fotografije tsunamija u Vela Luci 21.6. 1978. (Orlić, 2015).

Spomenuti tsunami na hrvatskoj obali Jadrana prvo je opisala Zore-Armanda (1988), gdje se na mnogim mjestima duž obale, razina vode naglo izdignula. Najrazornije djelovanje očitovalo se u Vela Luci na Korčuli, gdje su valovi su dosezali i do 8 m visine, poplavljujući cijelu obalu i do 650 m u unutrašnjost (slika 2.3.2.7.), a cijela pojava trajala je oko 12 sati. U Crnoj Gori, Dubrovniku i Visu anomalni valovi također su zabilježeni, u Starigradu na Hvaru uočena je veća „plima“ kraćeg trajanja, slično kao i na Mljetu i u Trogiru. Pojava je zabilježena na mareogramima u Baru, Dubrovniku i Splitu, a analiza mareograma pokazala je da se val

Jadranom proširio u roku 7-8 sati iz smjera juga. Opisanoj pojavi, kako navodi Zore-Armanda, vjerojatno je prethodio potres u Grčkoj na obali jezera Volvi jer su i tamošnji mareogrami zabilježili izdizanje mora nakon potresa, a moguće je da se val iz Egejskog mora i preko Jonskog mora proširio Jadranom, za što mu je trebalo oko 10 sati pa je dobivena brzina širenja vala od 150 km/h, što odgovara prosječnoj dubini od 170 m. Upitno je zašto je pojava bila razornija na hrvatskoj obali, daleko od izvora, a odgovor vjerojatno leži u rezonanciji, odnosno pojavi da zaljevi i kanali s periodom vlastite oscilacije, koji je blizak periodu translatornog vala, jače reagiraju i da specifična topografija bazena i dubina mogu pojačati pojavu rezonancije i usmjeriti val samo u određenim pravcima. Također, jedan sat nakon potresa na mareogramima Bara, Dubrovnika i Splita očitovala pojava nepoznatog karaktera, pa se pretpostavlja da se radilo o oscilacijama mora putem atmosfere (tzv. „meteotsunami“, koje je na Jadranu istraživao Orlić, 2015), tako da je u kombinaciji sa spomenutom pojavom moglo doći do povećanja tsunamija na hrvatskoj obali. Orlić (2015), osim što iznosi katalog tsunamija meteorološkog postanka u Hrvatskoj, pomoću literature detaljno opisuje svaki od događaja, kojih je zabilježeno 21, između ostalog i navedeni tsunami u Makarskoj (slika 2.3.2.8.), za koji navodi postojeće 4 hipoteze o nastanku. Dvije hipoteze uzrok povezuju s potresom, prema Zore-Armanda u Egejskom moru i klizištem na obalama Italije centralnog Jadrana, dok druge dvije hipoteze događaj pripisuju atmosferi, odnosno impulzivnoj generaciji slobodnih valova u Jadranu uslijed ciklona, dok Orlićeva hipoteza uzrokom smatra prisilne valove rezonantno pobuđene atmosferskim gravitacijskim valom, ujedno i jedinom hipotezom potvrđenom oceanografskim modeliranjem.



Slika 2.3.2.8. Distribucija lokacija udara meteo-tsunamija duž hrvatske obale te maksimalna amplituda (Orlić, 2015)

Orlićev katalog s pojavama meteotsunamija, prve događaje bilježi nakon 1930-e jer prethodni događaji nisu zabilježeni s datumom. Katalog započinje pojavama 21.7.1931. i 28.-29.5.1935., o kojima nema mnogo zapisa, a slijedeće dvije iz 1937. i 1951. koincidiraju s

olujom u Bakru. Meteotsunamiji zabilježeni su na 18 lokacija u hrvatskim obalnim vodama, a najčešće u Vela Luci na Korčuli i Starom Gradu na Hvaru (slika 2.3.2.8.). Pokazalo se da pojava ovisi o batimetrijskim karakteristikama te da Vela Luka dominira katalogom sve do 1980., kada se pojava bilježi i u sjevernijim dijelovima hrvatske obale. Govorimo o valovima koji pripadaju istom polju frekvencije tsunamija, čiji nastanak leži u atmosferi, a obično predstavljaju mješavinu prisilnih i slobodnih valova pa se razlikuju od „normalnih“ slobodnih valova. Uzrok njihova nastanka su atmosferski fenomeni, kao gravitacijski valovi i konvekcijska strujanja, a generacija valova na moru ovisi o rezonantnom prijenosu energije iz atmosfere prema moru. Dva su tipa rezonancije, koji obično koegzistiraju i time doprinose izrazito lokalnoj pojavi ovakvih valova, koje je teško dokumentirati pomoću standardnih mjernih uređaja plime pa su opservacije očevidaca važan izvor informacija.

Katalog je baziran na člancima iz novina s pojavama valova nalik tsunamijima i prva stavka je bila usporedba datuma članka s katalogom potresa, čime su eliminirani svi valovi koji koincidiraju s potresima, odnosno tsunamiji. Druga stavka bila je usporedba sa zabilježenom plimom na temelju mjerne stanice u Bakru kako bi eliminrali vezu valova s olujom na Jadranu, tako da su svi valovi kod kojih je plima bila veća od prosječne razine mora za 50 cm, naznačeni radi potrebe utvrđivanja uzroka njihova nastanka u daljnjim istraživanjima. Od zabilježenih događaja, ističu se pojave jakih valova i poplava u Vela Luci od 19-20. rujna 1977. i već spomenuti događaj 21. lipnja 1978., zatim, 27. lipnja 2003. u Starom Gradu na Hvaru i Malom Stonu gdje su uzrokovale veliku štetu. Na temelju pojave 2003. izrađen je oceanografski model s rezultatima konzistentnima s podacima mjernih uređaja plime, a meteo-rološko istraživanja ukazalo je na preturbacije tlaka zraka povezanima s konvekcijskim strujanjima pokrenutima na Alpama, koja su napredovala prema JI i koja su vjerojatno uzrok pojave. Nadalje, 22. kolovoza 2007. na otoku Istu i susjednom Molatu, nakon povlačenja



Slika 2.3.2.9. Poplavljena područja pogođena meteotsunamijima na hrvatskoj obali (Orlić, 2015)

mora plimni val je pogodio obalu, a istraživanja su pokazala širenje manjih perturbacija tlaka zraka od nekoliko milibara iznad pogođenog područja, brzinom od 21-24 m/s, što je značajno s obzirom da je identična brzina zabilježena u kod perturbacija tlaka u Vela Luci 1978. i u Starom Gradu 2003. Naposljetku, val amplitude veće nego što je zabilježeno na mjernim uređajima pogodio je Mali Lošinj 15. kolovoza 2008., a 19. veljače 2010. u Starom Gradu (jedan od rijetkih događaja tijekom zime), veliki plimni valovi visine barem 55 cm, uzrokovali su veliku štetu te iako događaj koincidira s olujom u Bakru, ponovno su zabilježene manje preturbacije tlaka zraka u smjeru SI, brzinom od 22-23 m/s (slika 2.3.2.9.).

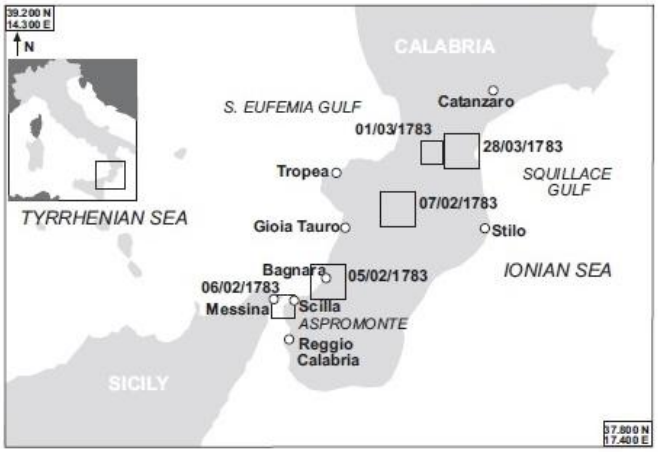
2.3.3. Tsunamiji u južnoj Italiji i na području Sicilije

U odnosu na centralni dio Jadrana, južni dio Italije i Sicilije znatno je izloženiji udarima potresa i tsunamija. Prema ITC, južna Calabria, Messinski tjesnac i istočna Sicilija spadaju u seizmički najaktivnije zone s velikim tsunamigenim potencijalom. Većina tsunamija iz ITC, uključujući najjače, dogodili su se upravo u ovom području, a uglavnom kao posljedica podmorskih i kopnenih/obalnih potresa, iako su neki bili i posljedica vulkanske aktivnosti te podmorskih odrona i klizišta (Graziani et al., 2006). Prema podacima, luka Calabrije ima trend snažnog izdizanja od 1.5–2 mm/god., a jedna od glavnih tektonskih značajki je pojas normalnih rasjeda odgovoran za većinu potresa, koji se prostire 350 km duž Apeninskog lanca od Calabrie do Sicilije i od kojih neki blizu obale, ili u potpunosti van obale, imaju veliki potencijal za generiranje tsunamija. Najveća zabilježena magnituda potresa je M=7 i skoro svi evidentirani potresi bili su praćeni tsunamijem, no jačinom na Calabriji i Siciliji se ističu; iz 1693. u istočnoj Siciliji i u prosincu 1908. u Messinskom tjesnacu te seizmička kriza 1783.-1785. i događaj iz 1905 (Graziani et al, 2006; Porfido et al., 2007).

Povijesni tsunamiji koji su pogodili JI Siciliju zabilježeni su od 365. godine i potresom na Kreti i tsunamijem koji je pogodio obale cijelog istočnog i centralnog Mediterana. Zatim, 4. veljače 1169. lokalni potres M=6.5, praćen tsunamijem, pogodio je Messinu i uzrokovao 25 000 žrtava, a 10. prosinca 1542. nakon potresa M=6.6. tsunami je poplavio grad Augustu. Iz navedenog, očigledan je nedostatak podataka prije 1000. godine, zbog nestabilnih socijalnih i ekonomskih previranja tijekom srednjeg vijeka, kao što je navedeno u ITC (De Martini et al., 2010).

11. siječnja 1693., istočnu Siciliju pogodio je potres magnitude M=7.4 (De Martini et al., 2010) i prouzročio velike štete na području od 14 000 km^2 te uzrokovao 54 000 ljudskih žrtava. Tsunami koji je tada nastao, pogodio je čitavu obalu istočne Sicilije i najviše štete je prouzročio u Augusti i Cataniji, gdje se more prvo povuklo, a nadolazeći udarni valovi, koji su u Augusti dosezali 15 m visine, nanijeli su veliku štetu i dodatne ljudske žrtve (Graziani et al., 2006).

Iduća seizmička kriza, slabijeg intenziteta i dugotrajnija, započela je 1783., trajala je 3 godine tijekom koje je bilo 5 velikih potresa, a s obzirom na njihovu jačinu i dugotrajnost cijele seizmičke aktivnosti, prateći tsunamiji gotovo nisu bili uzeti u obzir jer ih se smatralo sekundarnim i minornim događajima, osim onog 6. veljače, koji je uzrokovao više štete nego generirajući potres. U periodu od veljače 1783. i siječnja 1784., došlo je do sveukupno 10 tsunamija, od kojih su 3 po prvi puta spomenuta u okviru studije Graziani et al. (2007), a većinom su bili malih intenziteta, s 2 jaka i jednim katastrofalnim. Tijekom 1783. dogodilo se 5 velikih potresa I=IX (MCS), duž zone dugačke 100 km, s prvotnim udarom 5. veljače kojeg su pratili veliki potresi 6. i 7. veljače te 1. i 28. ožujka iste godine (slika 2.3.3.1.). Svi potresi su bili praćeni stotinama manjih, uzrokovali su tsunamije različitih intenziteta, a epicentri su migrirali prema sjeveru. Seizmička kriza spada u jedan od najkatastrofalnijih potresa zapadne Europe, a kumulativni efekti svih potresa i tsunamija doveli su velikih promjena okoliša i morfologije (slika 2.3.3.2.) (Graziani et al, 2006; Porfido et al., 2007).

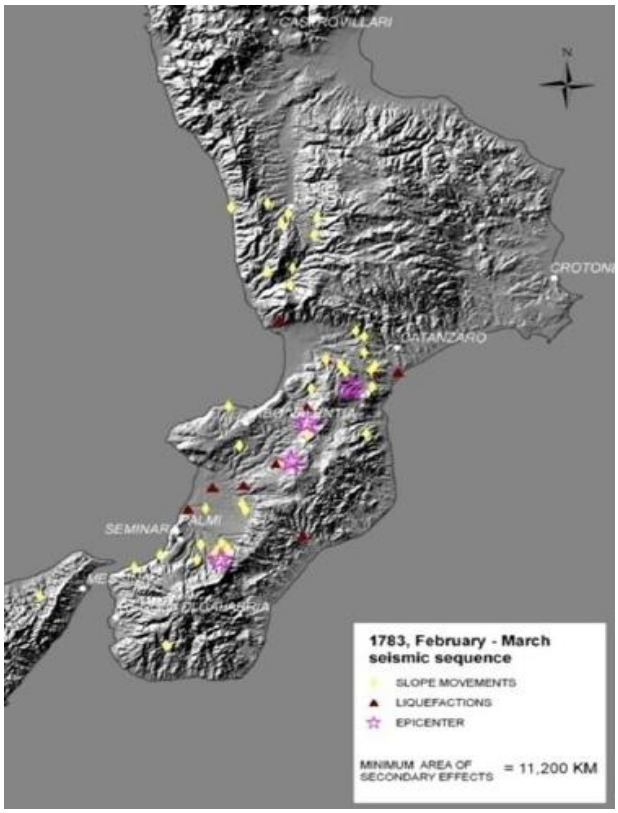


Slika 2.3.3.1. Epicentri 5 najjačih potresa (kvadrati su proporcionalni jačini potresa) koji su pogodili jug Italije tijekom seizmičke krize 1873.-1784. (Graziani et al., 2006).

Prvi destruktivni potres cijele krize, 5. veljače, manifestirao se prvim manjim potresom, oko 8 ujutro u Calabriji i tsunamijem, jednim od 3 novootkrivena, koji se naglo izdignuo na jonskoj strani Calabrije, intenziteta 3 po Sieberg-Ambraseys skali te drugim katastrofalnim potresom, oko podneva, koji je prouzročio preko 30 000 ljudskih žrtava, a od 380 pogođenih naselja, 200 je bilo u potpunosti uništeno. Potres magnitude M=6.9 i I=XI (MCS) osjetio se na širem području, uključujući čitavu Siciliju i velik dio južnog talijanskog poluotoka te je proizveo spektakularne primarne i sekundarne efekte, poput tektonskih deformacija, fraktura u tlu,

likvefakcije, hidroloških promjena, velikih difuznih klizišta koja su u većini slučajeva zagradila rijeke stvarajući preko 200 privremenih jezera i konačno tsunamija. Tsunami nastao nakon potresa, isprva podcijenjen, poplavio je obalu nakon povlačenja mora u minimalno 3 navrata u intervalu od 10-15 minuta, bez značajnije štete, a more je ostalo uzburkano još nekoliko dana nakon udara (Graziani et al, 2006; Porfido et al., 2007).

Nakon prvog udara, obalno područje između Scille i Palme 6. veljače pogodio je potres slabiji od prethodnog, M=6.3 i I=VIII-IX, koji je uzrokovao veću štetu u Messini i Scilli. Potres nije bio od naročitog značaja, no doveo je do velikog odrona i kamene lavine na zapadnom klifu planine Campallìa u Scilli, koja je padom u more generirala razarajući tsunami. Do potresa je došlo oko 00:20 h, a s obzirom da je dio stanovništva u strahu od novog potresa izašao na čistinu prema obali i plaži, neočekivani valovi tsunamija iznenadili su ih tako da je prethodan broj žrtava porastao za više od 1500, a more je u barem 3 navrata žestoko poplavilo obale Marine Grande, dosežući krovove kuća i zgrada. Intenzitet tsunamija prema Sieberg-Ambraseys skali iznosi 6 te 4 ITC (maksimalna vrijednost kod oboje). Idućeg dana, 7. veljače, još jedan veliki potres pogodio je južnu Calabriju, M=6.6 i I=X-XI (MCS) i uzrokovao dodatnu veliku štetu i slab tsunami u Stilu duž jonske obale Calabrije, intenziteta 2 po Sieberg-Ambraseys skali (Graziani et al, 2006.; Porfido et al., 2007).

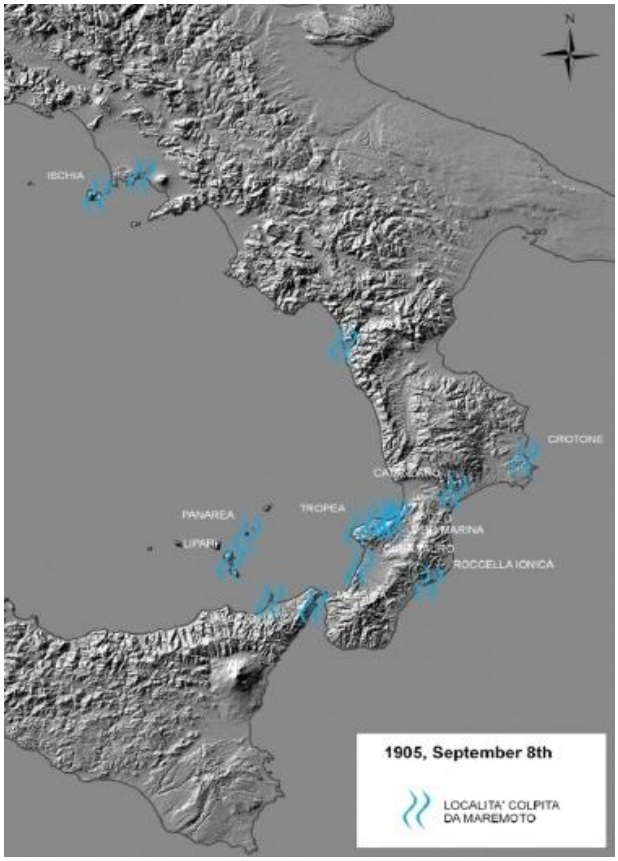


Slika 2.3.3.2. Područja pogođena sekundarnim efektima nakon seizmičke sekvence 1783.-1784. Epicentri – rozo, padinski procesi – žuto, likvefakcija – crveno (Porfido, 2007).

Seizmička aktivnost u ožujku rezultirala je s dva potresa i tsunamija, jednim 1. ožujka u 01:40 h, 100 km od Tirenske obale, a 20 km sjeverno od prethodnog potresa, M=5.9 i I=IX-X (MCS), nakon kojeg je tsunami, intenziteta 2 prema Sieberg-Ambraseys skali poplavio obalu. Krajem ožujka, prije najjačeg udara cijele krize, do kojeg je došlo 28. ožujka 1783., magnitude M=6.9., u literaturi se spominje tsunami intenziteta 3, koji je pogodio obalu 24. ožujka (godina je u literaturi različita, no radi se vjerojatno o 1783.), vjerojatno nastao

odronom s obzirom da taj dan nije bio zabilježen nikakav potres. Veća šteta bila je samo na brodicama na pučini i poginula je jedna osoba. Posljednji i najjači potres uzrokovao je veliku štetu u naseljima na jonskoj i tirenskoj strani obale. Do potresa je došlo predvečer oko 18:55 h, M=6.9 i I=X (MCS), a tsunami intenziteta 2 poplavio je obalu odmah nakon udara (Graziani et al, 2006; Porfido et al., 2007).

Kriza se nakon glavnih udara nastavila i tijekom 1784. godine, u kojoj je došlo do još 3 slabija tsunamija lokalnog efekta, od kojih su 7. i 9. siječnja 1784. novootkriveni i generirani slabim potresom, a 19. siječnja 1784., blizu Messine zabilježena je neobična uzburkanost mora koje je poplavilo polja, uzrokovalo neznantu štetu i prevrnulo mnogo drveća (Graziani et al, 2006.).



Slika 2.3.3.3. Područja pogođena tsunamijem nakon potresa 1905. označena su plavom bojom (Porfido, 2007).

Zatim, slijedeći veliki potres i tsunami zadesili su poluotok Capo Vaticano na Calabriji, 8. rujna 1905., M=7–7.9, I=XI (MCS). Epicentri se razmatraju i na kopnu i u moru, nedaleko od obale, a obalni sugeriraju kao uzrok lokalne normalne rasjede. Potres je razorio nekoliko naselja u sjevernom dijelu poluotoka u kojem je intenzitet bio I=IX (MCS) te je poginulo 557 osoba i pokrenuo je mnoge pojave u okolišu na području od 15 000 km^2, poput velikih klizišta praćenih pukotinama i frakturama, zatim likvefakcije, hidroloških varijacija poput promjene toka i temperature izvora i rijeka te konačno, tsunamija, koji je poplavio cijelu sjevernu obalu poluotoka od Viba do Tropeje, s valovima visine od 1-2 m, a čije su anomalne pojave uočene i u drugim gradovima, poput Napulja i Messine s naletima vala od nekoliko cm (slika 2.3.3.3.) (Porfido et al., 2007).

Posljednji u nizu razornih potresa i tsunamija, ujedno i jedan od najjačih potresa u Italiji u 20. stoljeću, s epicentrom u moru kod Messinskog tjesnaca, poznat je kao Messinski potres koji je pogodio Italiju 12. prosinca 1908, M=6.7-7.2. u trajanju potresa od 30 s, gradovi

Messina i Reggio Calabria, zajedno s okolnim naseljima, bili su u potpunosti uništeni, dok je djelomično razaranje uključivalo veći dio Calabrije i Sicilije površine 6000 km^2, kada je poginulo preko 60 000 ljudi (Graziani et al., 2006.), a smatra se da brojke dosežu i 80 000 (Porfido et al., 2007), odnosno 120 000 (RMS Special Report, 2008) te se prema broju žrtava smatra najkatastrofalnijim u Europi (slika 2.3.3.4.). Na temelju prikupljenih seizmograma bilo je očigledno da je uoči glavnog udara seizmičnost u području neprestano rasla, a prethodili su mu manji potresi u periodu od 1. studenog do 27. prosinca 1908, s najjačim potresom 10. prosinca, M=4 koji je oštetio neke zgrade u gradovima u okolici Messine. Seizmička aktivnost je migrirala od Montalbano Elicona prema Messini, nakupljajući se tijekom studenog na jugu Messine, blizu istočne obale Sicilije, a za uzrok se smatra lokalno normalno rasjedanje. Nakon potresa u razdoblju do 31. ožujka 1909. zabilježeno je još 293 udara neznatne jačine, a podrhtavanje tla glavnim udarom osjetilo se sve do Albanije, Crne Gore i Jonskog otočja u zapadnoj Grčkoj. Nekoliko minuta nakon potresa, snažan tsunami poplavio je obje strane tjesnaca Messine, s maksimalnim naletom vala od 13 m (Porfido et al., 2007) na obali Calabrije kod Pellara, koji je dosegnuo i do 600-700 m u unutrašnjost kopna te uzrokovao veliku štetu (snaga vode nosila je kuće i željeznički most) i pogibiju još 2000 ljudi. More se prije nadolazećeg tsunamija povuklo na nekoliko minuta ispod prosječne razine mora, da bi u barem 3 velika naleta vala (od kojih je prvi bio najslabiji) poplavilo pogođena područja, s oscilacijama morske razine koje su nakon tsunamija trajale još nekoliko sati. Slično kao i kod nekih prethodnih slučajeva, potres je potaknuo stotinu sekundarnih okolišnih efekata kao što je promjena visine kopna s obje strane tjesnaca, djelomično zbog slijeganja rastresitog sedimenta (do 70 cm), a djelomično zbog klizanja, zatim likvefakcija, nestanak dijelova obale uslijed erozivnog djelovanja tsunamija, pukotine na tlu, klizišta, odroni te hidrološke anomalije poput promjene razine vode i smjera toka izvora te temperature vode i emisije plinova (Graziani et al., 2006; Porfido et al., 2007; RMS Special Report, 2008).



Slika 2.3.3.4. Epicentar potresa i izvor tsunamija 1908. (Graziani et al., 2006).

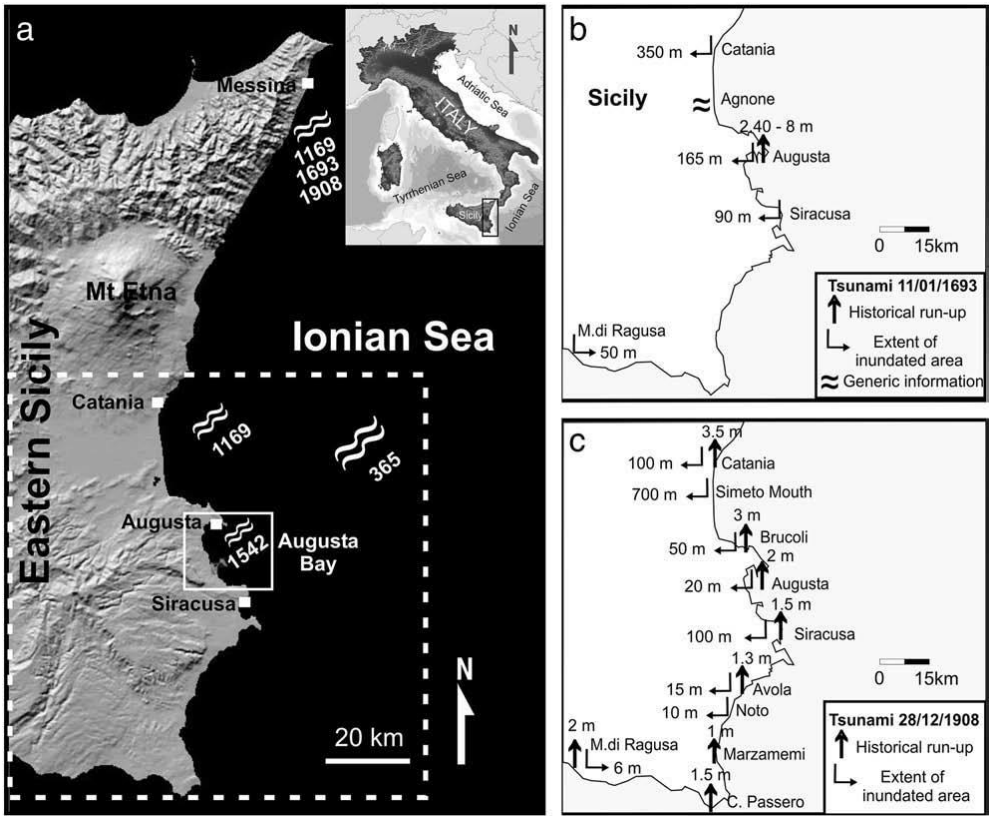
2.4. TSUNAMITI NA JADRANU

2.4.1. Tsunamiti na talijanskoj obali

S obzirom da su Sicilija i Gargano pogođeni brojnim razornim potresima praćenim tsunamijima, upravo su tamo istraživani geološki dokazi paleo-tsunamija i historijskih tsunamija. De Martini et al. (2010), u svome radu iznose istraživanje tsunamita, vjerojatno nastalog 1627., na 2 lokaliteta duž obale Gargana, oba smještena unutar močvarnih/lagunalnih uvjeta, na udaljenosti do 10 km duž obale zaljeva Augusta (slika 2.4.1.1.). Spomenuti morfološki smještaj predstavlja svojevrsnu zamku koja je išla u prilog sedimentaciji i očuvanju tsunamita, a čitavo područje istraživanja nalazi se na aluvijalnom terenu (1-5 m iznad razine mora), koji blago tone prema JZ i velikoj slanoj močvari koja graniči s morem. Sekvenca tsunamita od dna prema vrhu sastoji se od: a) debelog, tamno-smeđeg do sivog silta-glinovitog silta pri 4.3-1.0 m dubine, s raspršenim i rijetkim česticama šljunka (jako istrošenima u najdonjih 2 m), bogatom ostacima vegetacije i fragmentima školjaka između 1 i 2 m dubine, prekinutim na dubini od 2 m s jednim tankim izražajnim bioklastičnim slojem debljine 8 cm i na 1.5 m s jednim tankim slojem šljunka debljine 10 cm; b) smeđeg do boje lješnjaka sloja siltne gline ili glinovitog silta pri 1.0-0.3 m dubine, s raspršenim klastima kalkarenita (samo lokalno raspoređenima u male leće debljine 1-3 cm), malim fragmentima mikrofosila i ostataka vegetacije; c) debelim tamno-smeđim agrokulturnim, pooranim slojem s korijenjem te raspršenim i malim fragmentima šljunka i cigle pri samoj površini do 0.3 m dubine.

Visokoenergetske naslage marinskog porijekla otkrivene u niskoenergetskom močvarno-lagunskom okolišu pružaju nepobitan dokaz o 6 do 7 naleta morske vode uslijed tsunamija ili oluje, u posljednjih 4000 godina, a detektirane su na lokalitetima bolnice Augusta i rezervata Priolo. Kod bolnice Augusta, pronađeni su dokazi o 3 poplave koje odgovaraju pojavama tsunamija, a dva sloja identificirana su kao relativno tanke (oko 10 cm), pojedine masivne naslage bez strukture i s isprekidanim erozijskim donjim kontaktom. Zajedno, navedena obilježja idu u prilog fizičkim atributima postanka djelovanjem tsunamija. Treći sloj karakterizira nagla promjena taložnog okoliša, iz aluvijalnog u marinski, a izgrađen je od glinovitog sitnozrnatog pijeska debljine 20 cm, s obiljem fragmenata školjaka i biljnog trunja, no bez jasne diferencijacije veličine zrna (od glinovitog silta do glinovitog sitnozrnatog pijeska). Posljednji sloj je interpretiran kao rezultat djelovanja tsunamija, no ne može se

zanemariti hipoteza da je lokalni potres generirao značajnu koseizmičku modifikaciju obalne linije te poremetio morfološku barijeru koja je mogla zaštititi područje.



Slika 2.4.1.1. a) Područje istraživanja i podaci prijašnjih udara tsunamija; b) i c) podaci prodiranja i poplavljivanja tsunamija 1693. i 1908. (De Martini et al., 2010).

U rezervatu Priolo pronađen je dokaz 4 naleta morske vode i poplavljivanja obale te fizički atributi koji upućuju da se radilo o udaru tsunamija. Oba bioklastična sloja sastoje se od relativno tankih (10 cm) pojedinačnih masivnih i kaotičnih naslaga, s povećanim udjelom raznovrsnih bentičkih foraminifera te isprekidanim donjim erozijskim kontaktom. Također, u navedenim slučajevima, fizički atributi upućuju na nastanak tsunamijem. Treći anomalni sediment debljine oko 3 cm je masivan i sadrži nakupine fragmenata kosti makrosisavaca, ostrakoda i puževa te loše očuvane bentičke i planktonske foraminifere koje potječu iz plitkog i otvorenog mora. Detritični sloj kao taložina povratnog vala tsunamija, vjerojatno je mogao transportirati i istaložiti tako heterogeni sloj. Konačno, četvrti depozit sastavljen je od tankog (3 cm) pojedinačnog masivnog sloja pijeska, očigledno krupnijeg i s jako varijabilnim paleontološkim obilježjima te naglaskom na jako sitnozrnate naslage iznad i ispod njega.

2.4.2. Tsunamiti na hrvatskoj obali

Na hrvatskoj obali, otocima Hvaru i Brusniku, otkriveni su sedimenti čiji se postanak tumači djelovanjem tsunamija (Babić et al., 2012; Korbar et al, 2015). Otok Brusnik smješten je u centralnom dijelu Jadranskog mora, u području razdvajanja suprotno usmjerenih orogena Apenina i Dinarida sa sedimentnom sukcesijom permsko – donjotrijaskih crvenih naslaga s evaporitima, trijeskom riftnom sukcesijom s evaporitima, mnoštvom facijesa taloženih u grabenima i horstovima te debele gornjotrijaske-donjoeocenske plitkomorske karbonate sukcesije s evaporitima. U velikoj mjeri otok se sastoji od magmatskih stijena srodnih onima na otocima Visu i Jabuci, nastale za riftovanja u trijasu, preko kojih se kao male krpe javljaju, ujedno i najrasprostranjenije stijene, neobični konglomerati s marinskim fosilima.

Konglomerati su uglavnom masivni, klast-potporni i sastoje se od matriksa sastavljenog od magmatskih klasta obično veličine šljunka, lokalno promjera 0.5 m, a ponegdje su uočeni uglati klasti bioklastičnog vapnenca promjera i do 4 m s rijetkim magmatskim ulomcima. Uzorak s Brusnika u vidu ranijih radova interpretiran je kao potpuno recentnog podrijetla, a izopahe, igličaste kalcitne rese unutar vapnenačkog matriksa indikatori su freatičnog i marinskog okoliša, ali mogu biti i precipitirane iz meteorskih voda, što je ovdje isključeno jer bi slatka voda uzrokovala otapanje aragonitnog skeleta puževa, što nije slučaj. Kalcitni cement, u odnosu na aragonitni, učestaliji je u hladnijim vodama s obzirom da niske temperature pogoduju kalcitnoj precipitaciji, a o tome svjedoče i nalazi puževa, školjki, mahovnjaka i algi. Podrijetlo konglomerata povezano je sa šljunkom inicijalno formiranim unutar visokoenergetskog, valovima dominirajućeg okoliša, nakon čega su mnogi izmiješani s karbonatnim bioklastičnim materijalom na plaži i u gornjem shorefaceu. Pošto plitkomorski organizmi koji proizvode skeletni materijal, tj. karbonatni sediment, dominiraju obližnjim pučinskim područjima, male promjene relativne razine mora i/ili lokalnog djelovanja valova mogle su uzrokovati promjene položaja obalne linije, što je rezultiralo aliteracijom konglomerata i vapnenaca. Često prisutan izopahni cement, sugerira taloženje ispod razine mora. Neki od



Slika 2.4.2.1. Loše sortirani konlgomerati, s klastima u dijametru do 40 cm (Babić et al., 2012).

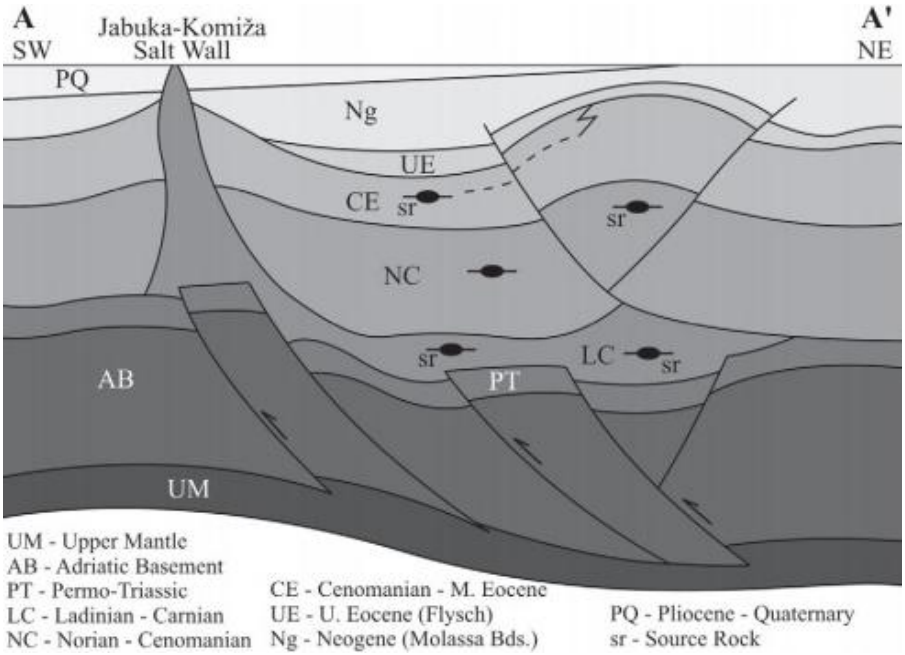
magmatskih klasta mogli su biti doneseni u zonu shorefacea, u kojoj dominira biogena produkcija, procesima srodnima olujama te su tako postali podređena komponenta vapnenca. Konglomerati koji sadrže velike, uglate klaste magmatskih stijena mogli su biti istaloženi blizu stjenovite, obale izgrađene od magmata (slika 2.4.2.1.).

Nadalje, po cijelom otoku raširen su izdanci vapnenaca, bioklastičnih grainstona i rudstona s nepravilno raspoređenim, učestalim do rijetkim ulomcima magmatskih stijena, koji su primarno istraživani u sjevernom dijelu otoka. Biogena komponenta uključuje puževe, školjkaše, mahovnjake, alge, ježince te male bentičke foraminifere, a pokoje jedinke puževa kao i iglice ježinaca, imale su očuvanu prirodnu boju i aragonitnu mineralogiju. Vapnenci osim što se javljaju kao mali izdanci, vjerojatno ostaci erozije, ispunjavaju i pukotine u magmatskim stijenama te postoje indikacije o bliskoj stratigrafskoj vezi s konglomeratima, s obzirom da vapnenački matriks u konglomeratima pokazuje iste karakteristike kao većina vapnenaca. K tome, postoje prijelazni oblici koji idu od magmatskih klasta u konglomeratima bez vapnenačkog matriksa do vapnenaca s rijetkim magmatskim klastima. Dodatno, uočen je mali izdanak koji prikazuje interkalaciju vapnenca (vjerojatno erozijski ostatak) u konglomeratima. Spomenuti mekušci u vapnencima i konglomeratima poznati su po nastanjivanju plitkomorskih područja Jadranskog mora, a dominantne teksture grainstona i rudstona sugeriraju perturbaciju skeletnog materijala u uzburkanim vodama te taloženje unutar plitkomorskog okoliša, iznad valne baze lijepog vremena. Pojava uglatih magmatskih klasta u vapnencima može biti povezana s blizinom obale sastavljene od magmata.

Konačno, posljednju skupinu stijena čine neptunski dajkovi, odnosno sedimentna ispuna pukotina u vapnencima s gastropodima i drugim biogenim česticama, ili s različitim proporcijama biogenih čestica i magmatskih klasta.

Radiometrijskim datiranjem, dobivena je starost od 125 146 ± 1568 godine p.n.e., koja se poklapa s toplim intervalom MIS 5e, od kojih je najtopliji trajao 12 000 godina s razinom mora za nekoliko metara višom od današnje. Prema MIS 5e, konglomerati su izdignuti za 4-7 m u zadnjih 125 000 godina, što odgovara prosječnoj brzini izdizanja od 0,032 – 0,056 mm/god. Pojava facijesa iznad 25 m nadmorske visine sugerira da viši dijelovi otoka pokazuju starije pleistocenske naslage, vjerojatno istaložene u toplijim periodima tijekom MIS 7, MIS 9, MIS 11, iz čega slijedi da se najstariji naslage javljaju na najvišim dijelovima otoka te da se taloženje postupno odvijalo u sve niže s opadanjem razine mora, tako da je sukcesija cjelokupno tonuća. Prema tome, cjelokupan iznos pleistocenskog

izdizanja korespondira s najvišom pozicijom pleistocenskih sedimenata, + 25 m. Krpe pleistocenskih sedimenata vjerojatno predstavljaju erozijske relikte.



Slika 2.4.2.2. Presjek geološke građe u okolici Brusnika i shema tonuće strukture – starije naslage izviru na površini (Babić et al., 2012).

Dokumentirani podaci pleistocenskih sedimenata samo su lokalno određeni, a nepravilnost u distribuciji konglomerata, magmata i vapnenaca upućuje na taloženje naglom energetskom resedimentacijom, kojom su plitkomorske, karbonatne čestice te šljunak sa shorefacea, uz zajedničko miješanje, iz prvotnog premješteni u novi pučinski taložni okoliš, obalni ili oboje. Takav proces generalno je mogući jedino jakim olujnim valovima, no one su isključeni jer je mala vjerojatnost da su mogli zahvatiti nasumična područja na površini otoka prekrivena konglomeratima.

Poznato je da tsunamiji mogu erodirati i transportirati sediment iz različitih okoliša, premještajući velike blokove stijena i taložeći detritus ispod i iznad razine mora. Taloženje velikih klasta i miješanje magmatskih klasta i skeletnih čestica ukazuju vjerojatno na tsunami. Uostalom, sama pojava ovakvih sedimenata čini ih anomalnima, što je karakteristika tsunamita u odnosu na normalne sedimente. Upitno je li tsunami odgovarajućeg intenziteta mogao nastati u Jadranu u to vrijeme (srednji – kasni pleistocen), s obzirom da je današnji Jadran malen, poluzatvoren bazen, a čak i u vrijeme visokih razina mora u pleistocenu nije bio znatno veći i dublji, u usporedbi s oceanima. Mogućnost pojave tsunamija svakako leži u aktivnoj tektonskoj granici kod Brusnika, a tsunamigeni potencijal, imaju podmorski odroni i klizanja. Iako tsunami na temelju ove studije ne može biti isključen, za neke dijelove otoka vjerojatnost pojave je mala jer bi bio potreban intenzivan tsunami i velikog dosega u

unutrašnjost, koji bi mogao transportirati velike klaste na visinama od 20 m, a čiji bi tragovi bili, no nisu, vidljivi i na susjednim otocima.

Dalje, Korbar et al. (2015), opisuju naslage unutar Jadranske karbonatne platforme, profil Majerovica, na otoku Hvaru oko granice K-Pg, gdje se nalaze anomalne masivne intraformacijske naslage središnjeg dijela stupa, u kojima je zabilježena zadnja pojava velikog broja krednih fosila. Spomenute naslage povezuje se s impaktom Chicxulub u Meksičkom zaljevu, koji je pokrenuo globalno masovno izumiranje i karakteristične preturbacije u sedimentima prije 66 milijuna godina, na granici K-Pg, koju u kontinuiranim dubokomorskim naslagama označava i tanki horizont s anomalnim koncentracijama platinske grupe elemenata, "šokiranim" mineralnim zrnima te sferulama nastalima padom materijala odbačenog impaktom u vis.



Slika 2.4.2.3. Izdanak profila Majerovica s izdvojenim slojevima (Korbar et al., 2015).

Najizražajnije netipično sedimentološko obilježje središnjeg dijela Majerovice je 5 m debela, masivna, poligenetska, nesortirana, matriks-potporna, litoklastična karbonatna breča, koja ispunjava kanale i u erozijskom je kontaktu s podinskim naslagama pa sadrži litoklaste podinskih vapnenca dugačke 1-3 cm, zajedno s bioklastičnim floatstonom s rudistima. Generalne karakteristike tsunamita u breči su prisutnost pelagičkih intraklasta mudstona koji sadrže gornjokredne planktonske foraminifere i sugeriraju da se tsunami probio i poplavio zapadni rub karbonatne platforme, tada u blizini današnjeg otoka Visa, 40 km zapadno od Hvara. Tsunami je morao biti značajne amplitude ako je mobilizirao pelagičke sedimente s padine na rubu platforme, izmiješao ga s površinskim muljevitim sedimentima platforme, otkinuo velike blokove iz unutrašnjeg dijela platforme te istaložio kaotični sediment na zaravnjenom unutrašnjem dijelu platforme. Neka obalna morfološka obilježja**,** poput zaljeva otoka Visa, mogla su povećati amplitudu i prodor tsunamija (sa zapada). Anomalne naslage Majerovice u izmjeni su unutar tipične unutarnjo-platformske sukcesije, u kojoj nema zapisa tsunamija, niti velike oluje, vjerojatno zbog položaja nekoliko desetaka km od ruba platforme, no ipak, neravna površina breče sugerira naglo taloženje kaotične mješavine iz jako viskoznih sedimentnih tokova. S pretpostavkom dubine 5 – 10 m, takav tok u plitkovodnoj platformi

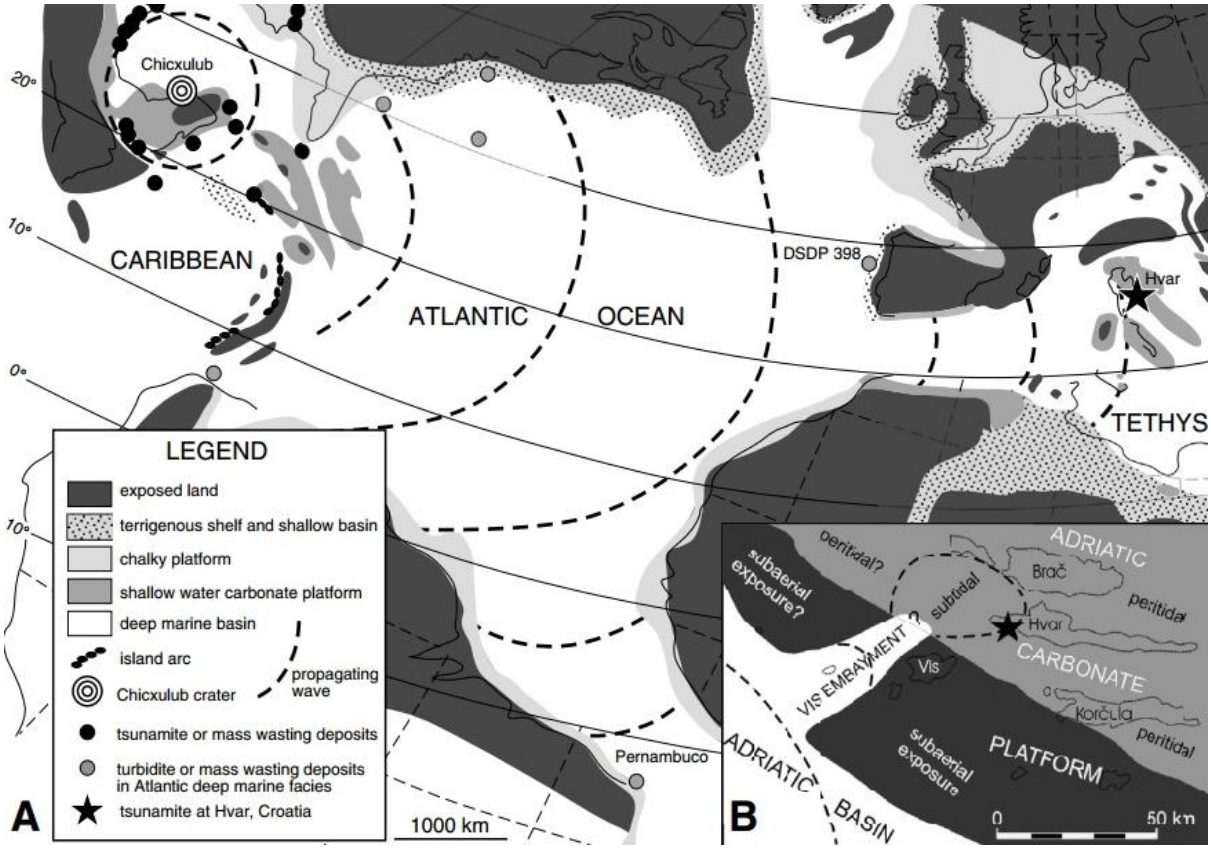
mogao je biti generiran samo velikim tsunamijem (tok dubine obično preko 10 m) jer tokovi modernih oluja dosegnu manje od 3 m dubine (kod najjačih ciklona oko 3.7 m), a muljeviti sediment prostire se relativno blizu obale pa do svega nekoliko stotina metara dalje od obale.

U intervalu 15.50 – 20.32 m (slika 2.4.2.3.) rijetke planktonske foraminifere i naliježeći muljeviti vapnenac neobična su pojava za intrakarbonatno-platformni okoliš te su biostratigrafski korisni (kasna kreda - mastriht), a njihova pojava upućuje na prerađivanje unutar momentnih naslaga. Krovinski 2 m debeli crveni mrljasti horizont izgrađen od mikrobioklastičnog i intraklastičnog wackestona s mastrihtskim planktonskim foraminiferama sadrži nekoliko krednih te neke jako rijetke vrste foraminifera. Spomenuti sloj interpretiran je kao sastavni dio naslaga nastalih tsunamijem, vjerojatno kao rezultat taloženja najsitnijih čestica iz suspenzije, zajedno s organskom tvari koja je dijagenetski zamijenjena sparitom unutar valovitih lamina. K tome, muljeviti vapnenci sadrže tropsku unutrašnje-platformsku biotu, zajedno s nekim planktonskim foraminiferama koje upućuje na prodor tsunamija i pritok iz otvorenog mora.

Ukoliko je na profilu Majerovica tsunamit nastao impaktom na Yucatanu, moguća su dva scenarija: 1) tsunami generiran padom šelfa/platforme zapadnog Tethysa, zbog potresa aktiviranih seizmičkim valovima uslijed impakta; 2) tsunami nastao na istočnoj strani karbonatne platforme Kube/Karipskog otočja, koji je šireći se Atlantskim oceanom došao do zapadnog Tethysa i pogodio zapadne granice Jadranske karbonatne platforme. U oba scenarija tsunami bi dosegnuo platformu u puno kraćem vremenu nego što je potrebno za taloženje sitnozrnatih, balističkih impaktnih čestica u tako udaljenoj regiji, sukladno s time da s impaktne balističke čestice bogate elementima platinske grupe bile pronađene u sedimentima iznad tsunamita. S druge strane, krupnozrnati materijal izbačen impaktom koji bi dosegnuo Jadransku regiju, balistički bi pao prije nailaska tsunamija te bi nasumično i rijetko bio raspoređen unutar tsunamita.

Prvi scenarij zahtijeva da je seizmički val dosegnuo zapadne dijelove Tethysa te potaknuo velike potrese, uzrokujući masovno trošenje rubova/granica platforme i obalne linije, a tsunamiji su mogli biti uzrokovani i na JI dijelovima još pričvršćenima za južne rubove Europe. No, nema dokaza o potresu ili udaru tsunamija u vanjsko-neritskom profilu Tunisa, niti ostalim marinskim područjima regije, od kojih mnogi predstavljaju dubokovodne naslage. S druge strane, neobično grub i krupan nanos iznad erozijske površine na granici K-Pg, upućuje na postojanje dokaza o tsunamitu unutar plitkomorske sukcesije, a i scenarij

tsunamija nastalog na granicama zapadnog Atlantika, kao direktna posljedica impakta, čini se vjerojatnijom. Tsunami je kroz prolaz između afričkog i europskog kopna mogao ući u zapadni Tethys, udarajući u zapadne rubove Jadranske karbonatne platforme, dok su male karbonatne platforme, sjeverno do dubokog zaljeva Visa, koji je na predviđenoj putanji kretanja tsunamija mogao povećati njegovu visinu, bile potpuno potopljene (slika 2.4.2.4.).



Slika 2.4.2.4. Pojednostavljena paleogeografska karta. A) Lokacije s dokazima tsunamita, turbidita, seizmita i padinskih procesa u Meksičkom zaljevu i Karipskom otočju te otoku Hvaru, kao posljedica Chicxulub impakta, s hipotetskim tragovima progradirajućeg tsunamija nastalog impaktom, prema istoku. B) Centralno-jadranski unutrašnji šelf s konturama današnjeg izgleda obalne linije (točkasto) i označenom lokacijom stupa Majerovica (Korbar et al., 2015).

3. ZNAČAJKE PODRUČJA ISTRAŽIVANJA

3.1. GEOGRAFSKI SMJEŠTAJ

Dinarskog pružanja (SZ-JI) i s najvišim vrhom Sv. Vid (349 m.n.m.), otok Pag ima jako razvedenu obalu (slika 3.1.1.) i duljinom morske obale od 302,47 km najistaknutiji je hrvatski otok (ispred Hvara, Cresa, Krka i Korčule) (Brenko, 2015). Površina otoka iznosi 284,18 km^2, a s pripadajućim otocima i otočićima doseže 296,26 km^2 i površinom je peti među hrvatskim otocima, iza Cresa, Krka, Brača i Hvara (Duplančić Leder et al. 2004.).

Otok Pag (slika 3.1.1.) sastavni je dio zone Ravnih Kotara od koje je odvojen recentnim geološkim procesima. Iako se geografski nalazi između Kvarnera, Like i Dalmacije, pripada Kvarnerskim otocima (Brenko, 2015).



Slika 3.1.1. Geografski smještaj otoka Paga (Magaš, 2011)

3.2. GEOLOŠKA GRAĐA

Područje otoka Paga, prikazano je na listovima Osnovne geološke karte SFRJ 1:100.000 Silba i Molat (Mamužić et al., 1970.) te Rab, Gospić i Zadar.

Najstarije naslage na otoku Pagu su cenomansko-turonski vapnenca i dolomiti ($K_2^{1,2}$), u jezgrama antiklinala, a sedimentacija se odvijala u promjenjivim uvjetima, dijelom u plitkoj, mirnoj sredini, a dijelom u blizini grebena u području jačeg djelovanja valova i strujanja vode (Mamužić et al., 1970; Mamužić & Sokač, 1973).

Kontinuirano na te naslage slijede svijetlosivi do smeđi, dobro uslojeni turonski vapnenci (K_2^3), ujedno i najrasprostranjenije naslage na otoku (slika 3.2.1), koje se javljaju u krilima Paške antiklinale, na boranom području JI dijela, uz SI rub otoka te u krajnjem dijelu rta Košljun. Ovim naslagama završava se kontinuitet taloženja ovog područja (Mamužić et al., 1970; Mamužić & Sokač, 1973).

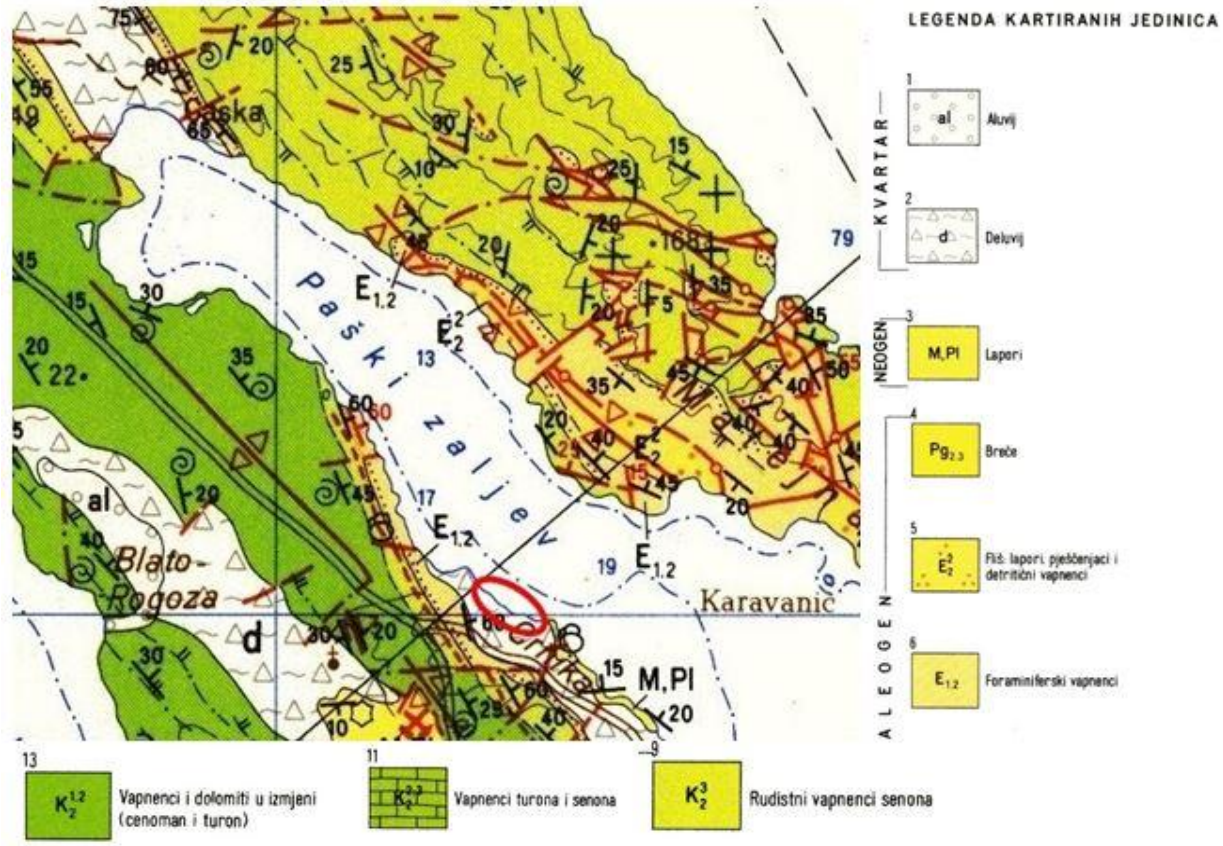
Transgresivno na krednim naslagama leže donje do srednje eocenski foraminiferski vapnenci ($E_{1,2}$), koji se nalaze u krilima sinklinala (slika 3.2.1). Rasprostranjeni su u užem pojasu otoka, a karakteriziraju ih velike foraminifere – alveoline i numuliti, a od mikrofosila ježinac *Conoclypeus conoideus*. Litološki to su mikrokristalasti vapnenci tipa kalcilutita i biokalkarenita, te su nastali u litoralno-neritskom arealu toplog mora, bez jačeg strujanja vode (Mamužić et al., 1970; Mamužić & Sokač, 1973).

Iznad foraminiferskih vapnenaca kontinuirano slijede srednje i gornje eocenske naslage ($E_{2,3}$), koje karakterizira izmjena lapora, pješčenjaka i detritičnih vapnenaca. Ove naslage izgrađuju jezgre sinklinala (Mamužić et al., 1970; Mamužić & Sokač, 1973).

Neogenske naslage otkrivene su samo na Pagu i to u krovini gornjokrednih vapnenaca kod Kolana i na eocenskim naslagama kod Crnike, gdje su tijekom miocena (M) i pliocena (Pl) bili taloženi glinoviti, rjeđe pješčani lapori, ponekad s vapnenim konkrecijama i ugljenom (slika 3.2.1). Litološki su to većinom glinoviti, rjeđe pješčani lapori, mjestimično s vapnenim konkrecijama, taloženi u plitkoj i nestabilnoj sredini lagunarnog tipa. Asocijacija teških minerala ukazuje na porijeklo iz starijih klastičnih sedimenata flišolikog tipa (Mamužić et al., 1970; Mamužić & Sokač, 1973).

Kvartarne i najmlađe tvorevine na Pagu, prekrivaju kredne, paleogenske i neogenske sedimente, a sastoje se od pjeskovitog šljunka i pijeska uz nešto aluvijalnog nanosa. Nalazimo

ih u području Paške sinklinale, a lokalno su zahvaćene mladom kvartarnom tektonikom. Tijekom pleistocena dolazi do taloženja deluvijalnih naslaga (d), a najmlađe naslage koje izgrađuju otok Pag su holocenski organogeno-barski sedimenti, utvrđeni u morfološki najnižim dijelovima polja Malo blato, koje je periodički duže vremena pod vodom te aluvijum (al) u morfološki najnižim dijelovima terena uz povremene tokove (slika 3.2.1.) (Mamužić et al., 1970; Mamužić & Sokač, 1973).



Slika 3.2.1. Geološka karta istraživanog područja označenog crvenom elipsom (Mamužić et al., 1970)

3.3. GENEZA ISTRAŽIVANOG TERENA

Sedimenti koji izgrađuju područje otoka Paga uglavnom su nastajali u plitkom morskom bazenu u kojem su se uvjeti sedimentacije povremeno mijenjali. Pojava vapnenih breča i brečolikih vapnenaca dokaz su pojačanog strujanja, pri čemu se transportirao grubi priobalni materijal u dublje dijelove bazena, odnosno dokaz su regresije ili snažnog oplićavanja bazena.

Sedimentacija se u gornjoj kredi vrši u promjenjivim uvjetima, dijelom u plitkoj, ali mirnoj sredini, dijelom u blizini grebena u području jačeg mlata valova i jačeg strujanja vode.

Manje oscilacije u jačini turbulentnih struja su vjerojatno postojale, s obzirom na postojanje različitih tipova vapnenaca jedne te iste alohtone vapnene serije. Koncem senona dolazi do izdizanja i kratkotrajne kopnene faze, označene stvaranjem boksita.

Početkom paleogena dolazi ponovno do transgresije, koja se početno očituje u formiranju manjih, slatkovodnih jezera u koja povremeno ingredira more. Prava transgresija počinje u donjem eocenu, taloženjem foraminiferskih vapnenaca i fliških naslaga. Sedimentacija se početno odvija u plitkom moru (foraminiferski vapnenci). Lapori se talože u dubljem, mirnijem moru/pješčenjaci u plitkom moru nedaleko od obale. To je vrijeme dužeg, jačeg i neujednačenog gibanja u kojem vjerojatno dolazi i do kraćih emerzija, na što upućuje taloženje paleogenskih vapnenih breča na mezozojsku podlogu na otocima i kopnu.

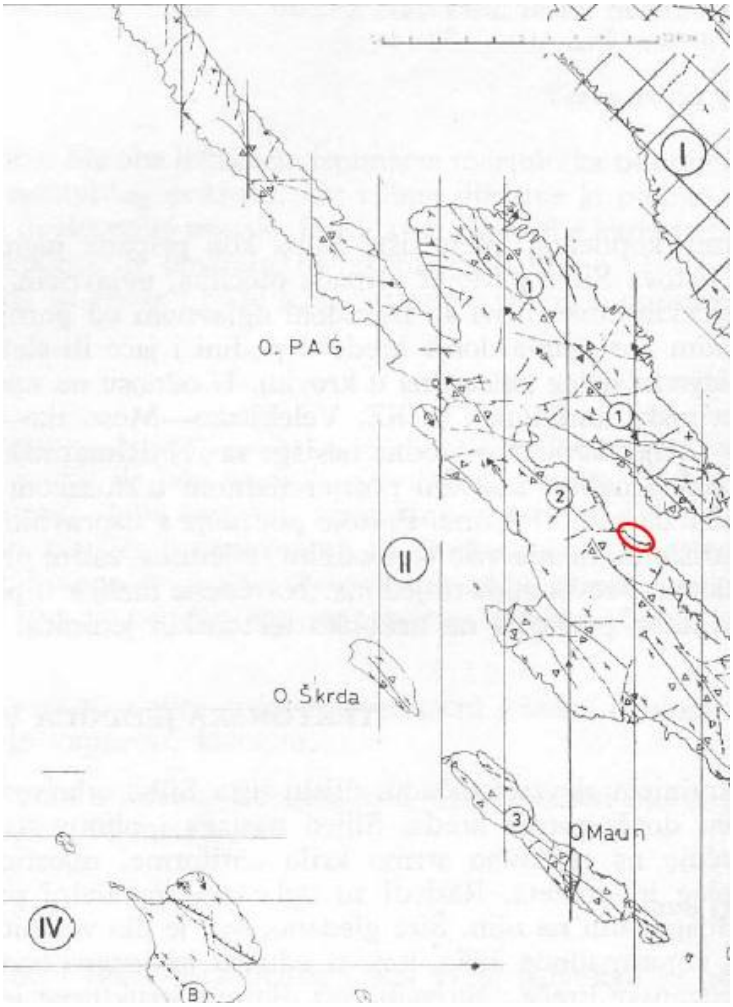
Koncem eocena dolazi do tektonskih pokreta uvjetovanih pirinejskom orogenetskom fazom. U to vrijeme se vrši glavno formiranje struktura na otocima i kopnu. Formiraju se uspravne do malo nagnute bore na većem dijelu otoka. Stvaraju se uže depresijske doline u koje se kasnije talože mlađe neogenske naslage (otok Pag).

Za vrijeme kvartara vrši s intenzivna denudacija i transport materijala što potvrđuju dosta debeli nanosi pijeska na Pagu (Mamužić & Sokač, 1973).

3.4. TEKTONIKA

Područje terena obuhvaćenog listom Molat-Silba je prema stratigrafsko-strukturnim karakteristikama podijeljeno na 4 tektonske jedinice. Otok Pag sa susjednim školjevima, kao direktni nastavak Ravnih Kotara, pripada jedinici Ravni Kotari (II) (slika 3.4.1.), koja se odlikuje blagim do srednje strmim, uspravnim do malo nagnutim i asimetričnim borama dinaridskog pružanja (SZ-JI) sa sekundarno boranim krilima te strmim do malo nagnutim rasjedima (paralelni pružanju slojeva, manjeg intenziteta, uspravni do reversni) pretežno u krilima bora. Navedeni rasjedi i bore zajedno s tonjenjem osi bora i lagano sekundarnim boranjem, glavna su strukturna odlika ove tektonske jedinice, koja je izgrađena od turonskih vapnenaca te eocenskih vapnenaca i klastita.

Strukturno, otok Pag sastoji se od dvije antiklinale: Caska (1) i Novalja (2) (slika 3.4.1.) i šire potonule Paške sinklinale (Pag-Novalja) između njih. Antiklinala Caska izgrađena je od senonskih rudistnih vapnenaca, a karakterizira ju sekundarno borano tjeme te uspravna os koja tone prema jugoistoku pod foraminiferske vapnence i klastične paleogenske naslage. U predjelu razvoja klastičnih paleogenskih naslaga (JI Caske) formira se uska i uspravna paleogenska sinklinala, ogranak spomenute Paške sinklinale, a čiji je najmarkantniji strukturni oblik antiklinala Novalja, izgrađena od cenomansko-turonskih vapnenaca. Toj uspravnoj antiklinali, također sa sekundarno boranim tjemenom, os tone prema sjeverozapadu i ispresijecana je uzdužnim, poprečnim i dijagonalnim rasjedima, dok su joj krila različito ustrmljena. Sjeveroistočno krilo joj je srednje strmo do strmo, a jugozapadno krilo je blago borano (Mamužić & Sokač, 1973).

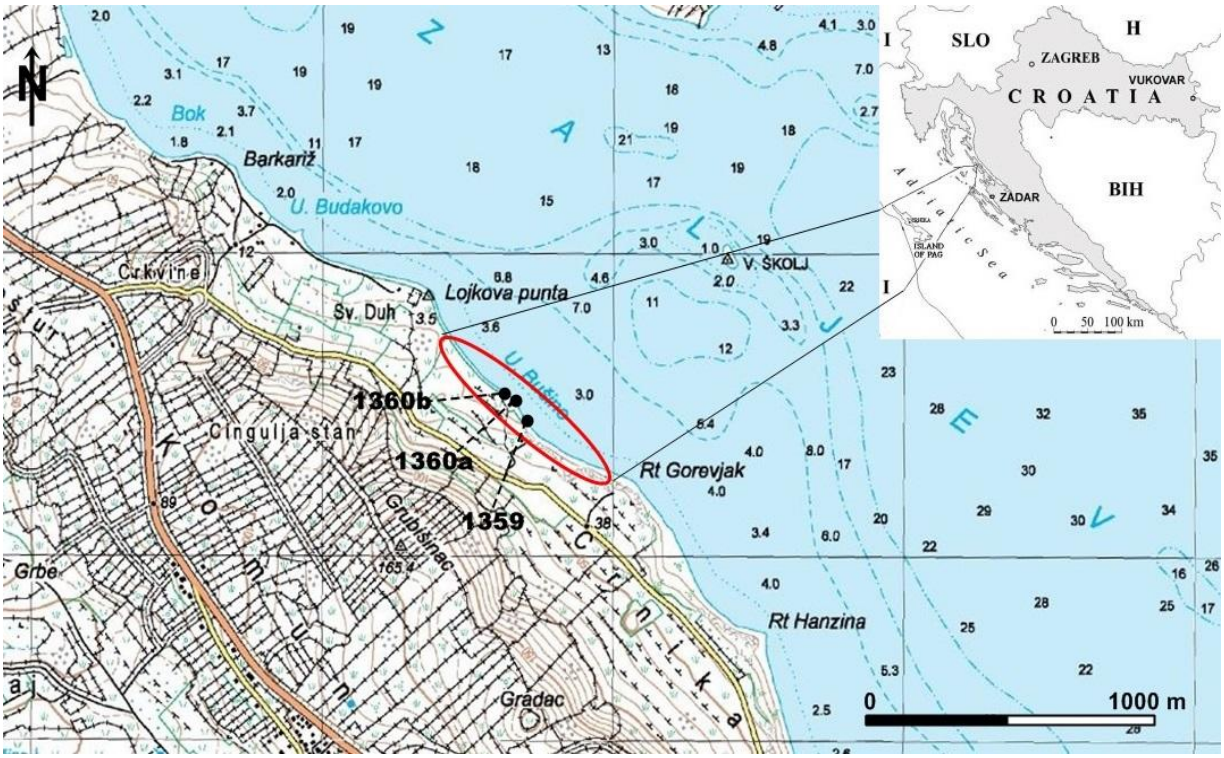


Slika 3.4.1. Tektonska karta sjeverozapadnog dijela otoka Paga i istraživanog terena (crvena elipsa) (Mamužić & Sokač, 1973)

4. METODE ISTRAŽIVANJA

4.1. TERENSKE METODE

Istraživano područje nalazi se uz JZ obalu Paškog zaljeva, u središnjem dijelu otoka Paga, između kampa/plaže Sv. Duh na sjeveru i Crnike na jugu (slika 4.1.). Terenskim istraživanjem i proučavanjem literature odredili smo: " *a radi se o kvartarnim naslagama s izmjenama pijeska, gline i šljunka*", prema geološkoj građi istraživanog područja opisanoj u OGK list Silba i Molat (Mamužić et al., 1970.) te u tumaču za istoimeni list (Mamužić & Sokač, 1973).



Slika 4.1.1. Područje istraživanog terena (crvena elipsa), s označenim mjestima izrade stupova i uzorkovanja (crne točke) [6], označeno na karti Hrvatske (u desnom kutu) preuzete prema Jurišić & Polšak, 2009.

Na najreprezentativnijem mjestu, gdje površina izdanka istraživanog terena nije bila djelomično litificirana i gdje su slojevi bili najbolje izraženi, izradili smo sedimentološki stup, služeći se geološkim čekićem i špahtlom kako bi sastrugali površinski dio svakog sedimentnog sloja, izloženog površinskim uvjetima, da bi dobili što realniju sliku. Terenskim uzorkovanjem, uzeli smo za daljnju laboratorijsku analizu 10 uzoraka. Izradili smo 2 stupa: 1. naziva 1359, s kojeg smo prikupili 6 uzoraka i 2. stup 1360, koji smo morali raditi na dva mjesta međusobno udaljena 15 m jedno od drugog, jer su na prvoj lokaciji gornji slojevi bili

litificirani (slika 4.1.1.). Na mjestu stupa 1360a uzeli smo 4 uzorka, uključujući još uzorak s najvišeg (1360/gore) i najnižeg (1360/dolje) dijela profila, gdje smo prikupili samo površinski sloj sedimenta, zajedno s makrofosilima koji su virili iz sedimenta, radi analize faune. Na mjestu stupa 1360b nismo uzimali uzorke, jer se ponavljaju isti slojevi kao i kod 1360a. Osim uzoraka prikupljenih iz oba geološka stupa, obilazeći plažu unutar promatranog dijela terena, prikupili smo makrofaunu, kao i razne fragmente keramike, stakla i čavla, koji su virili na površini iz sedimenta.

Također, prilikom izrade geološkog stupa zabili smo čavle na mjestima s kojih smo uzeli uzorke i fotografirali mjesto izrade stupa te oba stupa ručno skicirali na milimetarskom papiru. Zabilježili smo karakteristike svakog sloja, kao i vrstu klasta, u kojem sloju ih nalazimo te njihovu veličinu, ali i orijentaciju - flomasterom smo bili iscrtali dulju os kod nekih većih klasta kako bi dobili dojam usmjerenja, ukoliko ga ima (smjer toka).

S područja u blizini istraživanog terena, postojali su uzorci stari više godina i laboratorijskom analizom cilj je bio proučiti i usporediti stare i nove uzorke.

S obzirom na velik broj recentnih vrsta, moramo spomenuti kako je bitan čimbenik istraživanog područja antropogeni utjecaj i to ne samo jer se radi o plaži u blizini turistički posjećenijih mjesta na Pagu, na kojoj se ljudi svake godine kupaju, već i zbog blizine naselja koja datiraju iz rimskog doba i samim time dugotrajne ljudske djelatnosti. Zbog svega navedenog, morali smo biti na oprezu po pitanju nalaza makrofaune, iz razloga jer je postojala opasnost pogrešnog tumačenja fosilnog nalaza, njegove pripadnosti slojevima i samim time starosti pa smo morali paziti da je sav nalaz makrofaune doista bio dio sedimenta, a ne antropogeni nanos. Način na koji smo to mogli ustanoviti jest položaj makrofosila duž izdanka, odnosno ukoliko su makrofosili bili ispunjeni sedimentom ili ukopani u sediment i kao takvi „virili“ iz sedimenta na dijelovima izdanka, to je bio jasan pokazatelj da su u danom trenutku bili istaloženi i zatrpani sedimentom te da se ne radi o recentnom i antropogenom već fosilnom nanosu. U slučaju antropogene konzumacije puževa i školjaka, na pojedinim mjestima duž izdanka naišli bi na veću nakupinu ljuštura ili kućica, s obzirom da su ljudi konzumirali veći broj jedinki odjednom. S druge strane, makrofosilne nalaze koji su bili položeni na površini izdanka i k tome nisu bili ispunjeni sedimentom, nismo mogli uzeti u obzir ne samo zbog mogućnosti antropogenog utjecaja, već i zbog toga što nismo mogli znati gdje, kada i kako su bili istaloženi.

4.2. LABORATORIJSKE METODE

Nakon terenskog djela, uzorke koje smo prikupili obrađivali smo sijanjem. Prvo smo uzorke stavili u otopinu vode i vodikovog peroksida (33% H_2O_2), koji kao jaki oksidans ulazi u pore, širi se te otapa stijenu, ili čestice slijepljenje prisustvom organske tvari, ili kohezije. U takvoj otopini, svaki uzorak odstajao je barem 24 sata, nakon čega smo ih prosijali metodom mokrog sijanja kroz set sita. Koristili smo sita propusnosti od najveće prema najmanjoj: 1000 μm, 500 μm, 90 μm i 63 μm, kako bi eliminirali muljevitu komponentu, a nakon toga svaka frakcija je osušena u grijanjem u mikrovalnoj pećnici. Suhe frakcije detritusa su promatrane pod stereoskopskom lupom u reflektiranoj svjetlosti, a mikrofosili su ručno izvađeni i pohranjeni u Frankove ćelije.

Kada smo obradili sve uzorke i izvadili uočene mikrofosile, fosilni sadržaj je snimljen kamerom spojenom na mikroskop u reflektiranom svjetlu. Na temelju fotografija, određeni su fosili prema dostupnoj literaturi za foraminifere (Papp & Schmid, 1985; Cimerman & Langer, 1991; Abdulsamad, 2013) i internetskim izvorima (http://www.foraminifera.eu/) te literaturi za puževe (Garms & Borm, 1981; Zavodnik & Kovačić, 2000; Sasaki, 2008; Glöer & Pešić, 2012; Limondin-Lozouet et al., 2012; Neubauer et al., 2013; Beran, 2014; Hwang, 2014; Vermeulen et al., 2015) i mnogim internetskim izvorima navedenima u poglavlju LITERATURA.

5. REZULTATI

5.1. KVARTARNE NASLAGE ISTRAŽIVANOG PODRUČJA

Istraživani teren obuhvaća obalni dio Paškog zaljeva, točnije uz plažu na udaljenosti oko 3 metra od obale cijelim terenom prostire se kontinuirani izdanak kvartarnih sedimenata (slike 5.1.1. te 5.1.2., 5.1.3., 5.1.4.). Obala je pješčanog tipa, čini ju homogeni pijesak i iznad nje se prostiru slojevi s klastima, koji su vjerojatno bili transportirani bujicom s kopna.

Pjeskovitu plažu i dio obale uz plažu prekriva šljunak s klastima raznih veličina te različitih vrsta stijena i oblika – uglati i zaobljeni klasti. Zapazili smo fragmente vapnenca s alveolinama i numulitima, a prema geološkoj karti foraminiferskog vapnenca nema u neposrednoj blizini terena, nego su fragmenti transportirani iz unutrašnjosti, zapadno od terena, gdje izdanjuju naslage foraminiferskog vapnenca eocenske starosti, ili sa sjevera - sjeverozapada. Istraživani izdanak je visok oko 4-5 m, žućkasto-smeđe boje te vidno laminiran – izmjenjuju se trošniji s rezistentnijim slojevima, koji su ostali „ispupčeni“ i vire u odnosu na trošne slojeve iz izdanka (slika 5.1.1.). Također, slojevi se, prateći izdanak od juga prema sjeveru spuštaju, i kod kampa Sv. Duh na sjevernoj granici našeg terena, visina izdanka znatno je manja u odnosu na južni dio. Cijeli izdanak je površinski prekriven bijelim nanosom/koricom soli (slika 5.1.1.). Istraživani teren se, idući prema jugu, nastavlja na miocenske naslage Crnike, značajne po izdancima ugljenonosnih slojeva.

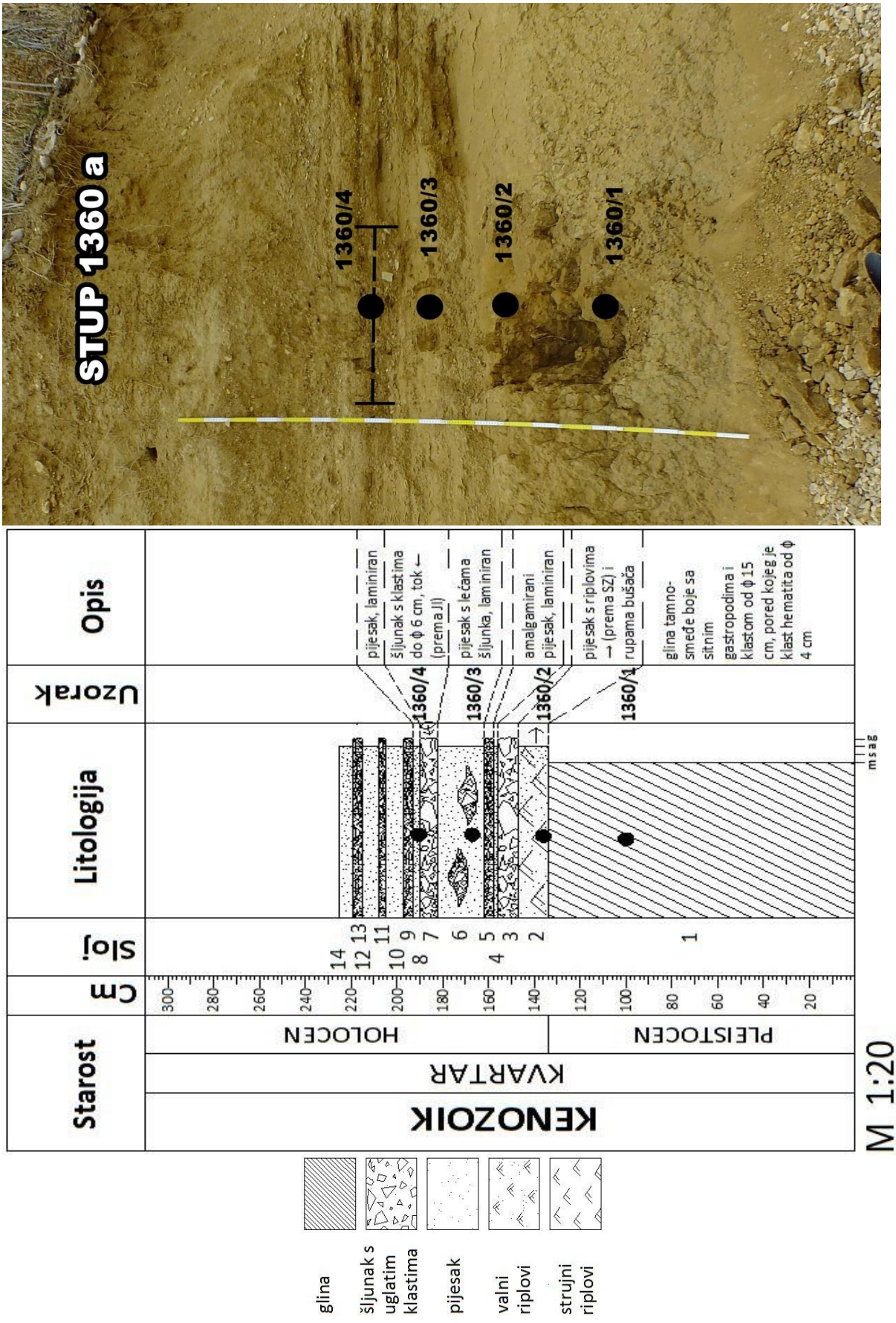


Slika 5.1.1. Izdanak na istraživanom području s jasno izraženom uslojenošću i vidljivom bijelom „koricom“ soli.

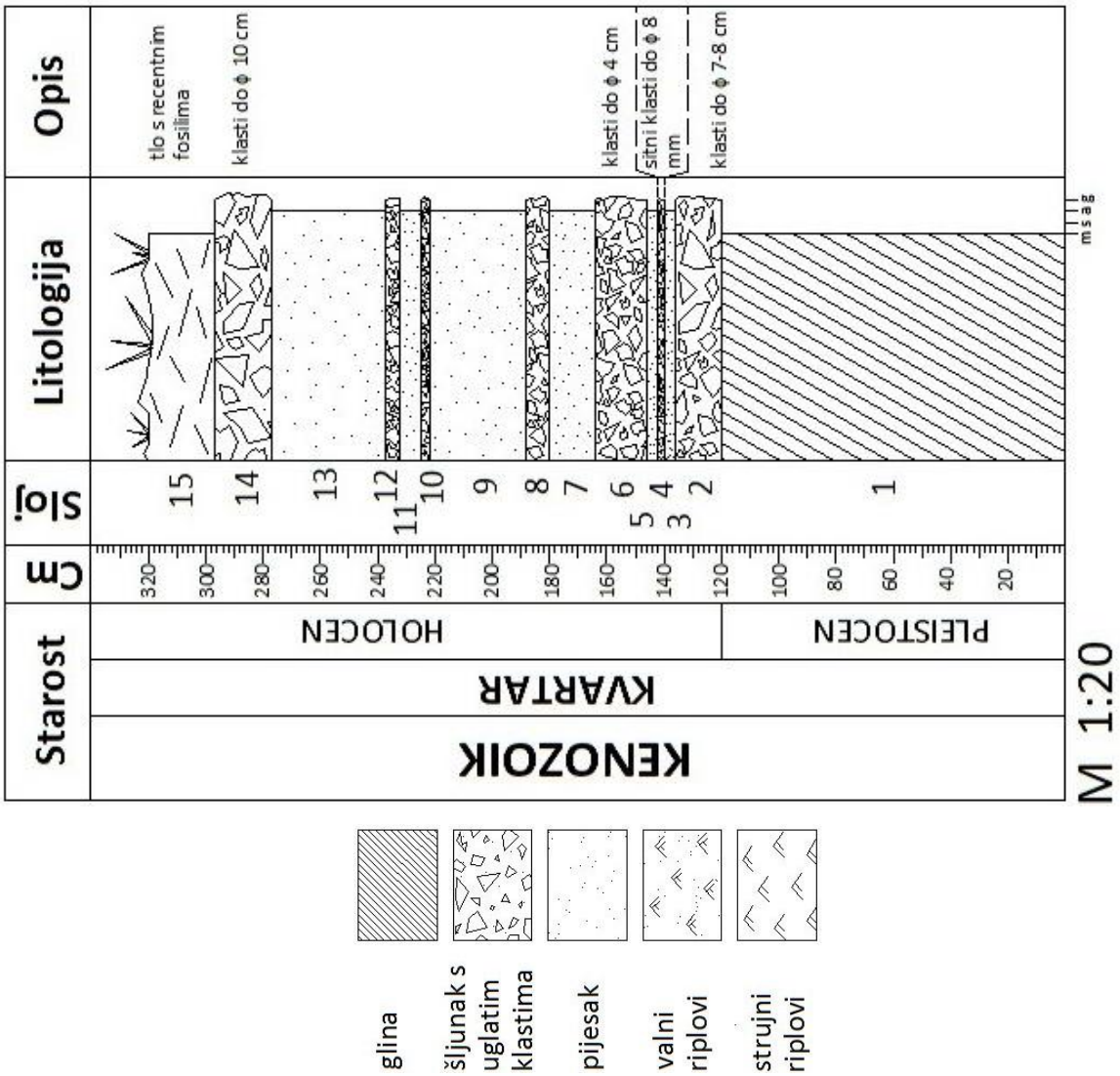
Kvartarne naslage sastoje se od pijeska, crvenice, pjeskovitog šljunka i aluvijalnog nanosa, a istraživano područje prekriveno je deluvijalnim naslagama (d) (slika 3.2.1.), koje su na Pagu razvijene u dolini Stara Novalja – Caska te uz sjeveroistočni rub obalnog poteza Pag – Novalja, gdje je smješten istraživani teren. Deluvij se, prema Mamužić et al. (1970), sastoji od slabije ili jače vezanih obronačnih nanosa, odnosno radi se o pretežito sitnozrnatom, pjeskovitom šljunku koji je slabo sortiran i s visokim postotkom $CaCO_3$, što uvjetuje blizina vapnenačkih klastičnih sedimenata. Od karakterističnih stijena, prema kojima se odražava sastav istog distributivnog područja, javljaju se ulomci kvarc-kalkarenita – kalcirudita 10-30 cm debljine, nepravilnog lećastog oblika i veličine ulomaka do 2,5 cm.

Najviši dio deluvija čvrsto je vezani, dobro uslojeni obronačni nanos od ulomaka krednih i eocenskih vapnenaca, a vezivo je kalcitno, vapneno. Debljina nanosa deluvija je različita, maksimalna otkrivena debljina je kod Crnike i iznosi oko 6 m, dok je u šljunčari kod Paga vidljiva debljina 14 m (Mamužić & Sokač, 1973).

Slika 5.1.2. Gore – izrada sedimentološkog stupa 1359 s označenim mjestima uzorkovanja. Dolje - sedimentološki stup s kronostratigrafijom i litostratigrafijom mjerila 1:20.



Slika 5.1.3. Gore – izrada sedimentološkog stupa 1360a s označenim mjestima uzorkovanja. Dolje - sedimentološki stup 1360 s kronostratigrafijom i litostratigrafijom mjerila 1:20



Slika 5.1.4. Sedimentološki stup 1360b s kronostratigrafijom i litostratigrafijom, mjerila 1:20.

5.1.1. Pleistocenske naslage

Idući od dna izdanka prema vrhu, na samom dnu, u kontaktu sa šljunčanom plažom duž cijelog izdanka prostire se kontinuirani sloj gline, tamno-smeđe boje, vidno tamnije od ostalih slojeva, unutar kojeg se isticala izražajna i vijugava feromanganska korica. Pretpostavljamo da se radi o sloju pleistocenske starosti, hladnodobnom paleotlu, s obzirom da u hladnijim razdobljima nastaju takvi tamni horizonti, s feromanganskom koricom koja je nastala na nekadašnjem vodnom licu. Tamnija boja upućuje i na to da je horizont bogat organskom tvari, što je vidljivo i golim okom jer se iz horizonta nazire mnoštvo sitnih puževa bijele boje. Horizont je homogen i prilikom uzorkovanja odlamao se u većim i jako čvrstim grumenima iz kojih je virilo mnoštvo sitnih korjenčića, a kod laboratorijske analize, ovaj uzorak trebali smo puno dulje ostaviti u otopini za dezintegraciju, u odnosu na ostale.

Prilikom uzorkovanja, naslage ovog horizonta označili smo s 1359/1 i 1360/1, a kod izrade sedimentoloških stupova, na dva za to predviđena mjesta, primijetili smo velike varijacije u visini – kod prvog stupa, 1359, koji je južnije (prema JI), horizont doseže 60 cm visine od razine mora, dok kod drugog stupa, 1360 (prema SZ), rađenog na dva mjesta međusobno udaljena oko 15 m, doseže duplo veću visinu čak 134 cm, uz nedostatak feromanganske korice na oba stupa 1360. Na stupu 1360, osim spomenutog baznog sloja gline, u izmjeni u ostalim slojeva, kvartarne starosti glina se više nije javljala osim u vidu površinskog tla, dok se na stupu 1359 glina, osim u bazi, pojavljuje još u 2 horizonta, od kojih u najvišem sadrži leće šljunka s klastima promjera oko 3 cm.



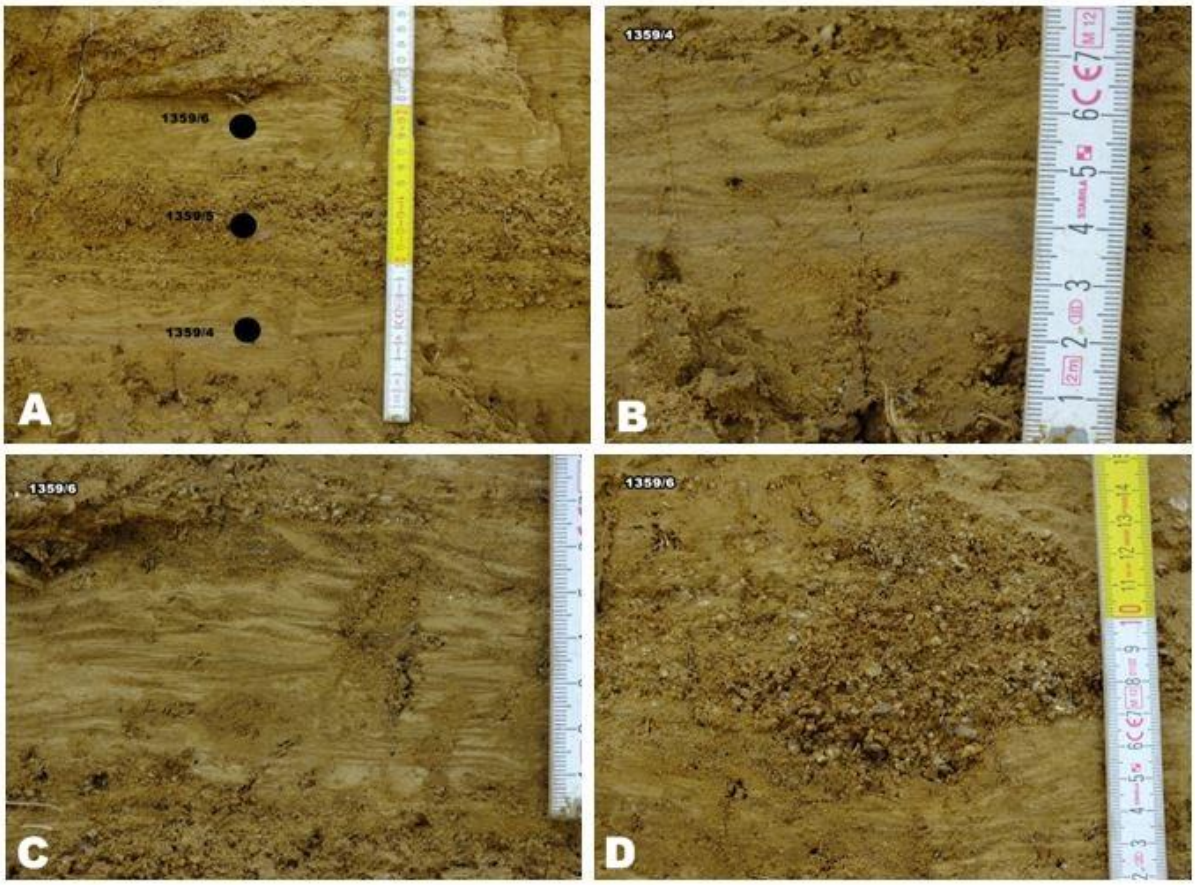
Slika 5.1.1.1. Feromanganska korica u pleistocenskoj hladnodobnoj glini (crna vijugava linija označena crvenom strelicom)

5.1.2. Holocenske naslage

Iznad podinske gline, koju smo interpretirali da je pleistocenske starosti, dalje smo odredili izmjenu slojeva gline, šljunka i pijeska, holocenske starosti, koja se prilično razlikuje kod sedimentoloških stupova, tako da ćemo opisati značajke svakog od slojeva u izmjeni, a koji se kod stupova ne razlikuju bitno po svojstvima.

Na priloženim sedimentološkim stupovima jasno su vidljive varijacije u raspodjeli i izmjenama slojeva, kao i njihova svojstva. Sloj šljunka, koji na stupu 1359 i 1360b slijedi odmah iznad podinske gline, sadržavao je uglate klaste veličine i do 8 cm, uglavnom kvarcne i vapnenačke. Prevladavajući uglati klasti ovog sloja upućuju na kratki transport, vjerojatno bujicom, koja je u unutrašnjosti otoka erodirala podlogu i transportirala detritus prema obali. Na stupu 1359 sloj šljunka označen je s 1359/2, a na stupu 1360a, sloj šljunka označili smo s 1360/4 i uzorke uzeli na većoj visini, iz dva sloja šljunka, donjeg i debljeg s klastima do 6 cm te gornjeg i tanjeg, između kojih je tanki sloj pijeska. Veličina klasta dosta varira u ostalim

slojevima šljunka, tako da imamo tanke i jako tanke slojeve s klastima promjera oko 4-5 mm u stupu 1359, a s druge strane imamo deblje slojeve šljunka s klastima promjera i do 10 cm.



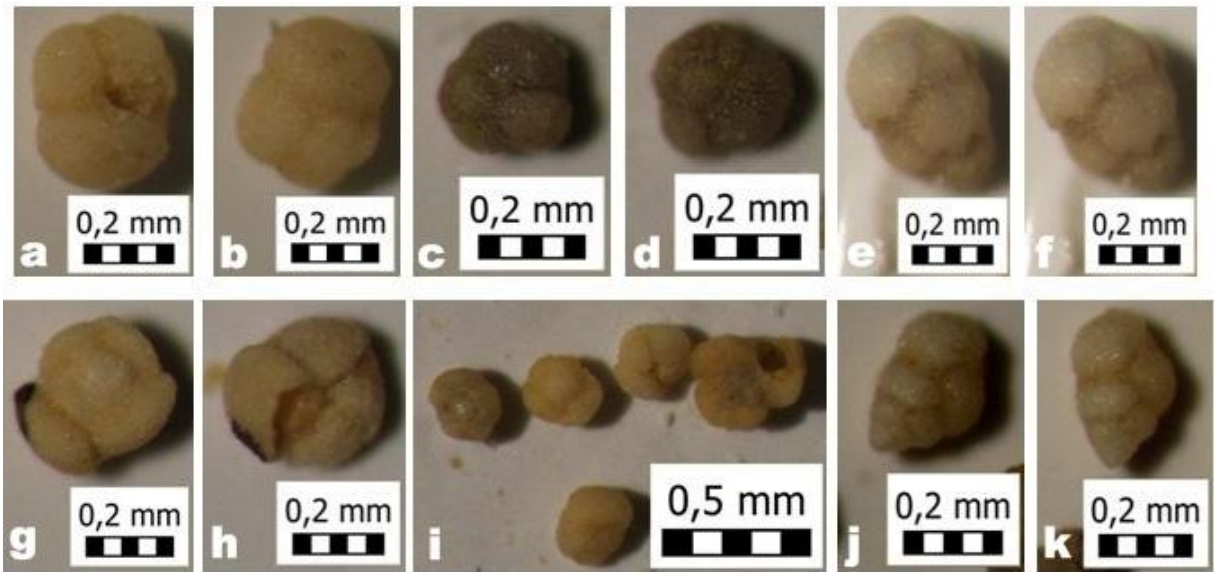
Slika 5.1.2.1. Stup 1359. A) slojevi pijeska s riplovima (1359/4, 1359/6) između kojih je sloj šljunka (1359/5), B) riplovi pješčanog sloja 1359/4, C) riplovi sloja 1359/6 i D) leće sitnog šljunka koje se pojavljuju u istom sloju.

Na stupu 1360a se u krovini nalazi sloj pijeska sa strujnim riplovima „u desno“ (prema SZ) te rupama bušača. Pješčani slojevi u izmjeni su sitnozrnati do srednjezrnati i većinom homogeni, poglavito kod stupa 1360b. Na stupu 1359, sveukupno su 4 sloja pijeska, od kojih je samo najgornji homogen, a kod ostalih su prisutna obilježja idući od najnižeg – riplovi s transportom „u lijevo“ i „u desno“, zatim isto riplovi s transportom iz oba smjera i lećama šljunka sa sitnim klastima promjera nekoliko mm te sloj pijeska s valnim i strujnim riplovima, koji je uz to i laminiran (slika 5.1.2.1. gore). Nadalje, na stupu 1360a, osim spomenutog najnižeg sloja pijeska s riplovima i rupama bušača, u drugim pješčanim slojevima vide se lamine u amalgamiranom sloju pijeska, zatim leće šljunka s klastima od nekoliko mm (slika 5.1.2.1.D), u sloju pijeska koji je u ovom slučaju i laminiran te na kraju, ponovno lamine u sloju pijeska. Ostali slojevi pijeska u stupu 1360a, koji su pri samom vrhu, prema svojstvima su isti svima spomenutima na stupu 1360b.

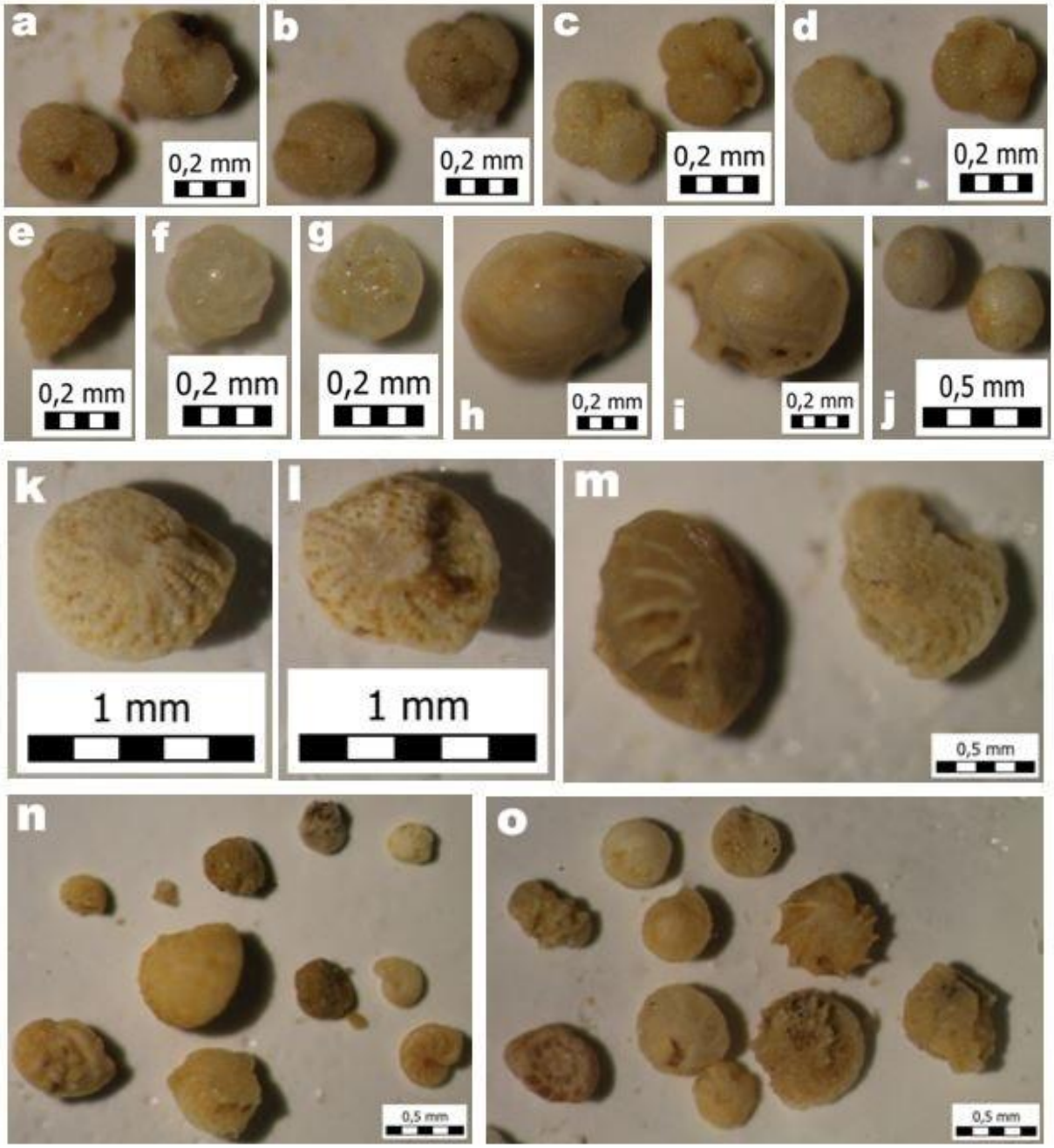
5.2. FOSILNI SADRŽAJ

5.2.1. Mikrofosili

Prikupljena mikrofauna prilično je obilna, a od uzorka do uzorka bitno se ne razlikuje. Najzastupljenije su planktonske foraminifere, iako ima i bentičkih vrsta. Foraminifere se moglo jasno razlikovati po obliku kućice i tipu stijenke, odnosno imaju li trohospiralnu, planispiralnu ili mono/bi/triserijalnu kućicu te stijenku sa spinama ili bez spina (tablica 1). Prevladavajuće planktonske foraminifere pretežito pripadaju rodu Globigerinidae, ali bez vidljivih spina pa možemo reći da na izdanku nije bilo živućih foraminifera nanesenih na obalu radom valova, već su sve bile otprije istaložene, vjerojatno i pretaložene (slike 5.2.1.1. i 5.2.1.2.). Mnoge jedinke bile su ispunjene sedimentom pa je identifikacija bila otežana s obzirom na nejasnu vidljivost ušća, što je jasan dokaz pretaloživanja. K tome, u sedimentnoj ispuni kod nekih jedinki došlo je do jasne promjene boje u crvenkasto-smeđu, ili sivkastu, što se prenijelo i na samu stijenku foraminifera. Osim planktonskih, uzorci su sadržavali manji broj bentičkih foraminifera glatkih stijenki, planispiralnih i većinom evolutnih kućica, iako su poneke bile involutnog tipa. U pojedinim uzorcima bile su izrazito trošne, nejasnih obrisa stijenke i ispunjene sedimentom, zbog čega za mnogo jedinki nismo uspjeli odrediti taksonomsku pripadnost.



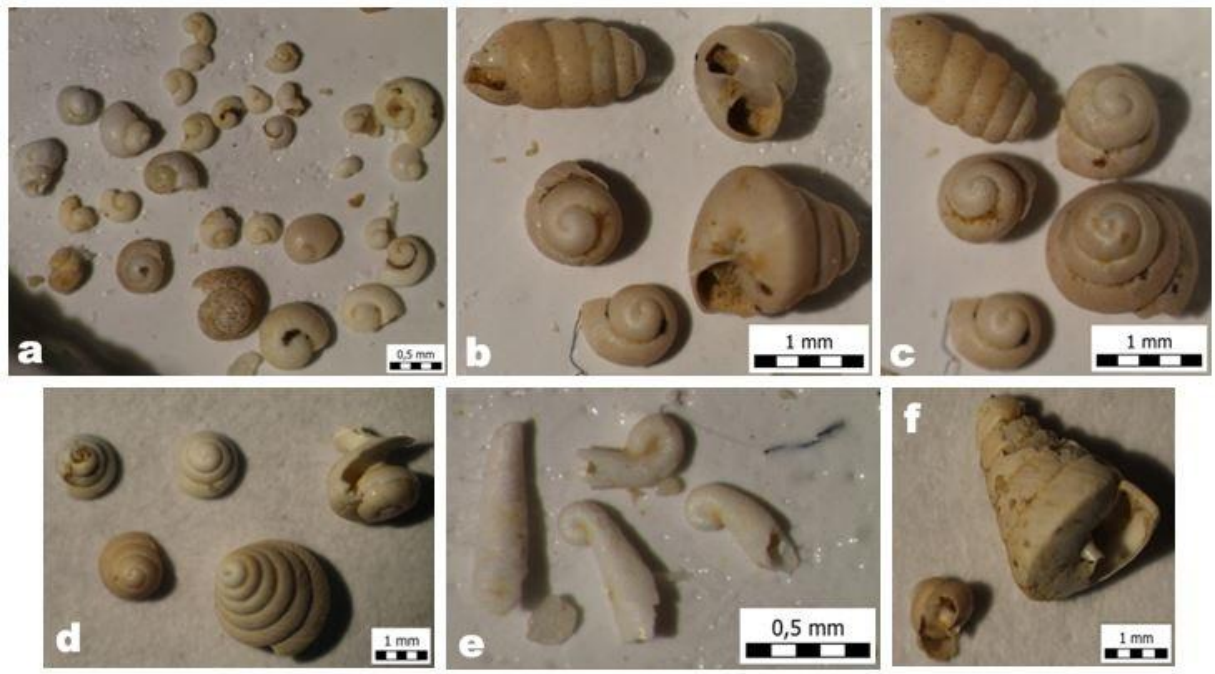
Slika 5.2.1.1. a, b) *Globigerina sp.*, c, d) *Candeina nitida, C. sp.* (?), e, f) *Bulimina sp.*, g, h) *Globorotalia inflata*, i) *Globorotalia crassaformis*, j, k) *Heterohelix* (?)



Slika 5.2.1.2. a, b) *Candeina nitida*; b, d) *Globigerina sp.*; e) *Uvigerina sp.*, f, g) *Ammonia sp.* (?), h, i) *Chiloguembelina sp.*, j) *Orbulina universa*; k, l) *Elphidium crispum*; m) nepoznata foraminifera i desno *Elphidium crispum*; n) u lijevom donjem kutu – *Planularia sp.*, u sredini dolje fragment *Elphidium crispum*, dolje desno *Annomalina sp.*, *Ammonia sp.* (?); o) dolje desno fragmenti *Elphidium crispum*.

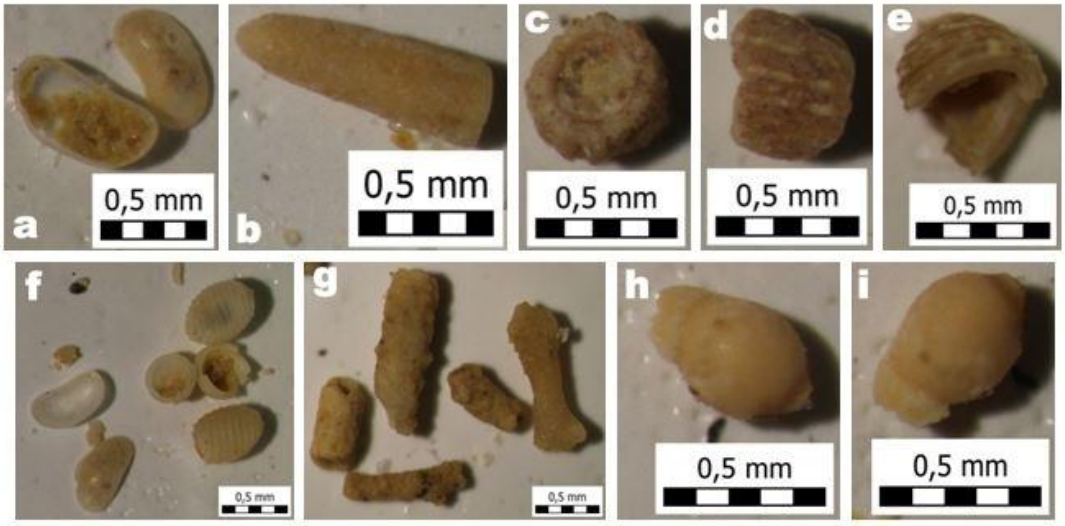
Sitne kućice puževa (slika 5.2.1.3.) relativno su loše očuvane, pa ih se većinom nije moglo identificirati jer je donji dio kućice s ušćem, koji nam je bitan za određivanje taksonomske pripadnosti, oštećen. Kućice su uglavnom glatke bez rebara, mliječno bijele boje i samo kod par jedinki je očuvana prirodna boja, a neke su bile i točkaste. Uglavnom su evolutnog tipa s 3-4 zavoja, a u manjem broju ima i puževa s involutnim kućicama, no s obzirom na oštećenost, nije se moglo sa sigurnošću odrediti radi li se možda samo o

fragmentarnom dijelu evolutnih kućica. Ima i nešto trohospiralnih kućica, uglavnom niskotornjastih s manjim brojem zavoja. Svi nalazi mikrofosilnih puževa upućuju na slatkovodan do bočat okoliš prema obliku i izgledu kućica, iako nismo odredili pripadnost većine jedinki (tablica 1).



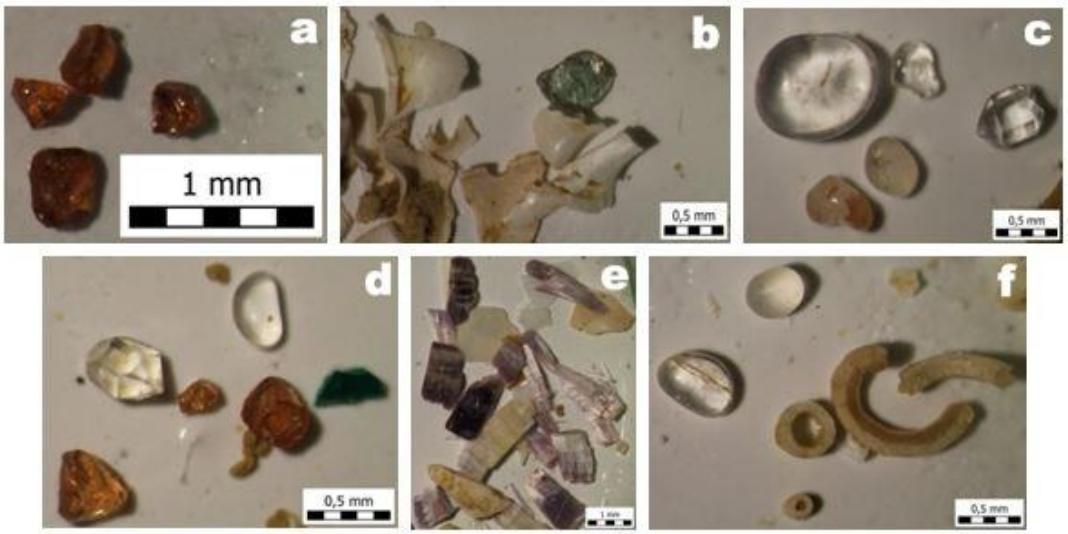
Slika 5.2.1.3. a) obilni nalazi mikrofosilnih puževa, većina razlomljena i ne znamo taksonomski odrediti, b, c) u gornjem lijevom kutu *Pupa muscorum*, a ostali *Rumina saharica, Angustopila subelevata* (?), d) rebrasti *Thysanota conula* (*Sitala sp.*) (?), ostali vjerojatno kao i sa slika b, c; e) *Orygoceras sp.*, f) veći, rebrasti i sa zaravnjenim dnom *Calliostoma* (?), manji vjerojatno jedan od puževa sa slika b, c, d.

Osim foraminifera i puževa, u nekoliko uzoraka pronađene su malobrojne ljušture ostrakoda (veličine obično 0,1-5 mm), glatkog tipa, odnosno neornamentirane ljušture, što upućuje na rod koji je obitavao u slatkovodnim do bočatim uvjetima, vjerojatno miocenskog jezera. Iako su ostrakodi većinom morski bentos, najčešće su jedinke iz slatkovodnog reda *Podocopida*, tako da pretpostavljamo da se u našem slučaju radi o rodu *Cypris*, karakterističnom za slatkovodni i bočati okoliš, koji je poznat od neogena. U manjem broju pronađeni su i girogoniti zelenih algi (veličine obično 0.5-1 mm) iz familije Characeae, koji se najčešće fosilno očuva i u našem slučaju je neornamentiran. Familija Characeae sadrži slatkovodne i bočate oblike, a pretpostavljamo da se radi o rodu *Chara*, koji potječe od eocena sve do danas, koji je također vjerojatno obitavao u miocenskom jezeru (slika 5.2.1.4.) (tablica 1).



Slika 5.2.1.4. a) ljušture ostrakoda, b) dio koponošca (Scaphopodae) (?), c, d) rebrasti fragment bodlje ježinca, koralja ili presjek koponošca (?), e) fragment girogonita zelenih algi, rod *Chara*, f) ljušture ostrakoda i cjeloviti i razlomljeni girogoniti, g) koštani dijelovi (?), h, i) (?).

Nađen je i jako veliki broj fragmenata ljuštura školjkaša, koje se zbog oštećenosti i samo na temelju sitnih dijelova nije moglo taksonomski odrediti, a fragmenti su bili s očuvanom prirodnom bojom nježno roze-bež boje i s izražajnim rebrima s vanjske strane te mliječno bijele boje s unutrašnje strane. Pronašli smo još rebraste kružne presjeke ljuštura ispunjene sedimentom za koje pretpostavljamo da mogu biti presjek dijela mahovnjaka (briozoji), bodlje koralja, ili ljušture koponošca (skafopodi). Također su pronađena prozirna mineralna zrna kalcita kao i elipsasta, zaobljena, staklasta prozirna mineralna zrna kvarca ili kalcita te prozirnih i staklastih fragmenata crvenkaste i roze boje, vjerojatno stakla (slika 5.2.1.5.).



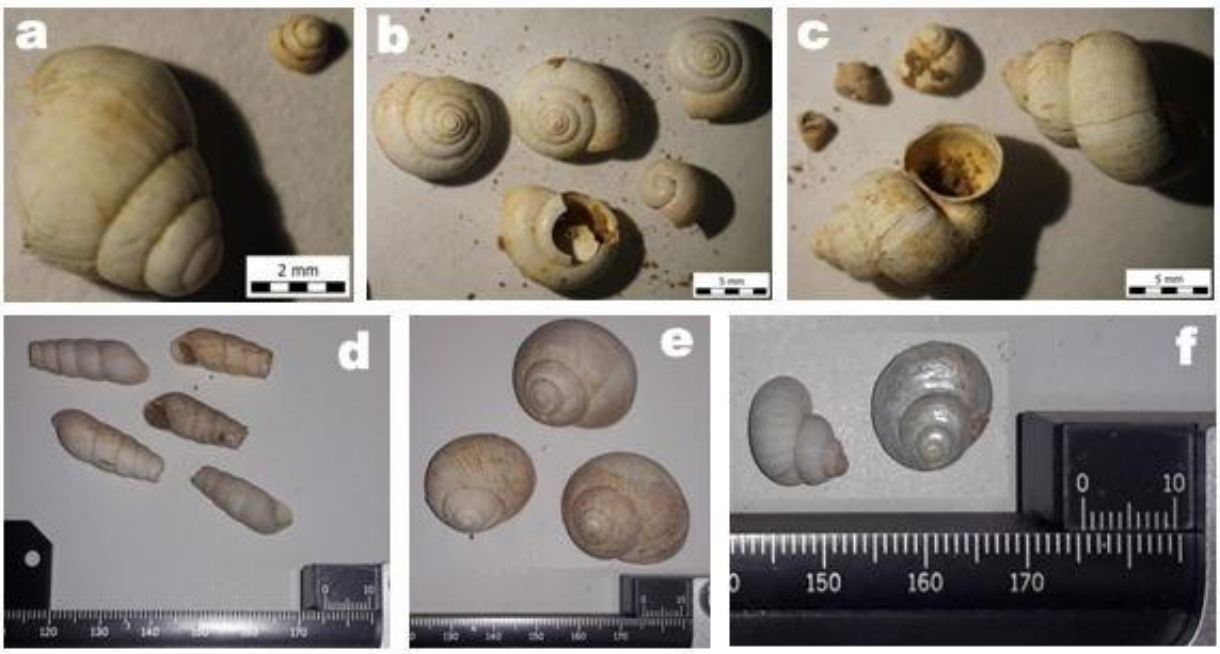
Slika 5.2.1.5. a) crveni fragmenti stakla, b) fragmenti školjaka, puževa i listićavog minerala, c) zaobljena bezbojna i roza mineralna zrna te kristal, d) crveni fragmenti stakla, zeleni te zaobljeni bezbojni i bezbojni kristal, e) ljubičasti škriljavi odlomci, vjerojatno minerala iz grupe azbesta; f) zaobljena bezbojna zrna te dijelovi girogonita.

Tablica 1. Mikrofosili

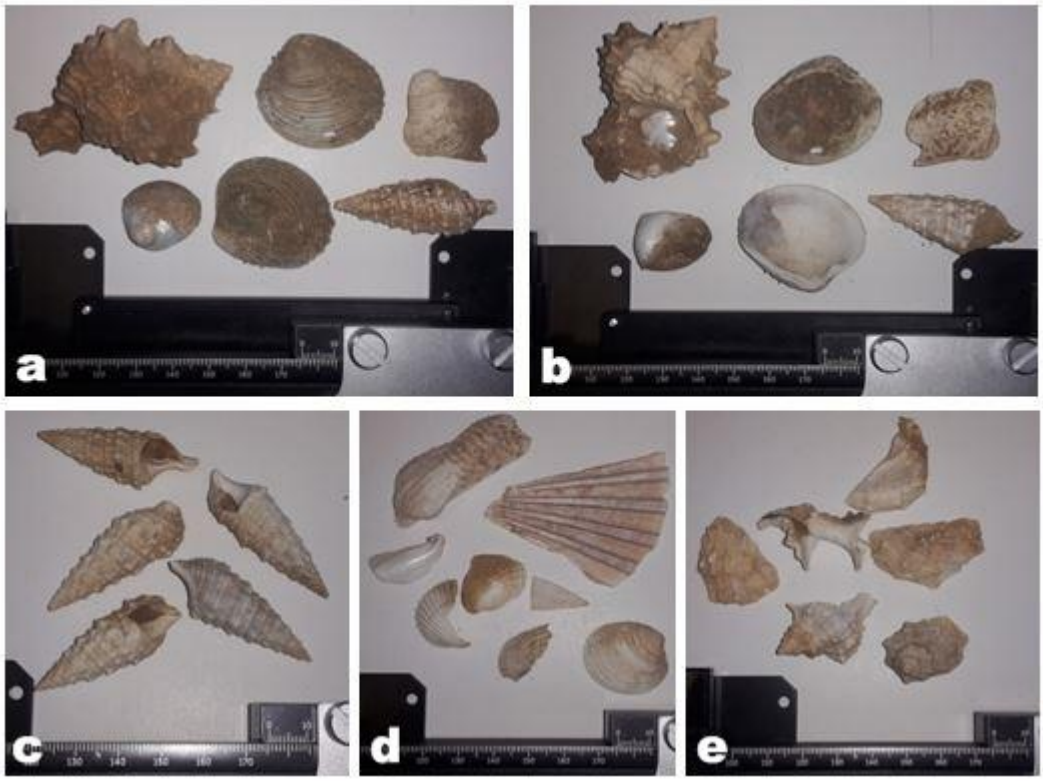
Tip fosilnog nalaza	Rod ili vrsta	Broj uzorka											
1. Mikrofauna		1359/1	1359/2	1359/3	1359/4	1359/5	1359/6	1360/1	1360/2	1360/3	1360/4	1360 gore	1360 dole
Planktonske foraminifere	*Candeina nitida*				+	+	+				+		
	f. Globigerinidae	+	+		+	+	+	+	+	+	+	+	+
	Globigerina bulloides	+				+		+	+	+		+	
	Globigerinoides					+.	+.				+.		
	Globorotalia	+			+	+					+		
	Globoquadrina					?	?				?		
	Heterohelix												?
	Orbulina	+	+		+		+	+	+	+	+	+	+
Bentičke foraminifere	*Ammonia sp.*											+	
	Anomalina											?	
	Bulimina sp.										+		
	Chiloguembelina sp.												+.
	Elphidium sp.		+		+								
	Hyalinea				+								
	Planularia				+	+						+	
	Robulina costata ?											+	
	Uvigerina sp.								+				
Kopneni gastropodi	*Angustopilla subelevata*	+	+		+	+				+			
	Calliostoma	?.											
	Moelleriopsis messanensis ?	+	+			+							
	Orygoceras	+			+	+				+			
	Pupa muscorum	+						+					
	Rumina saharica ?	+	+		+								
	Stenothyra												
	Thysanota	?.	+										
	Vertigo												
Ostrakodi		+			+								
Alge	f. Characeae	+	+										+
Skafopodi ?						+							+
Briozoji ?						+							
Koralji ?						+							
Kosti ?								+					
2. Čestice													
Mineralna zrna								+				+	
Staklo												+	

5.2.2. Makrofosili

Na terenu smo prikupili recentne školjkaše, čije su ljušture, što cjelovite, što razlomljene, virile iz sedimenta, kao i kopnene i marinske puževe raznih veličina. Najčešći su puževi trohospiralnih kućica s velikim brojem zavoja, a niskotornjasti su rijeđi. Kod svake određene vrste puževa, prisutan je bio barem jedan tip rebra, spiralan ili aksijalan, pomoću kojih smo mogli pobliže odrediti rod ili vrstu. Najmasivnije kućice bile one tipičnog obalnog recentnog morskog puža familije Muricidae (*Truncullariopsis* ili *Hexaplex trunculus*) i nešto manje roda *Gibbula*, a od kopnenih puževa tu se ubrajaju *Helix pomatia, Cepaea nemoralis* ili *Cepaea hortensis* te *Rumina decolata* (slika 5.2.2.1.). U manjem broju pronašli smo kućice tipičnog recentnog morskog puža roda *Cerithium* te ljušture morskih školjaka *Venus verrucosa* s izražajnim i bubuljičastim koncentričnim rebrima, fragmente ljuštura roda *Cardium* s očuvanom bojom i izražajnim radijalnim rebrima, zatim *Arca noae* i *Pecten jacobaeus*, čiji smo fragment donje ljušture pronašli s velikim radijalnim rebrima (slika 5.2.2.2.) (tablica 2).



Slika 5.2.2.1. a) morski puž *Odostomia sp.*, b) kopneni puževi *Cepaea* (*hortensis* ili *nemoralis*), c) *Tudorella sp.*, d) kopneni puževi *Rumina decolata*, d) tipični vrtni kopneni puževi *Helix pomatia*; f) sa sedefastim sjajem je morski puž *Gibbula sp.*, a bijeli i rebrasti je *Pomatius sp.*



Slika 5.2.2.2. a, b) puževi *Gibbula, Cerithium, Truncullariopsis* ili *Hexaplex trunculus* s Gibbulom ukopanom u ušću te školjka *Venus verrucosa*. c) tipični obalni puževi Cerithium, d) dijelovi školjaka *Pecten jacobaeus, Arca Noae, Venus verrucosa* i *Cardium*; e) dijelovi puža *Truncullariopsis* ili *Hexaplex trunculus* i vjerojatno drugih iz roda *Murex.*

Osim makrofaune, nailazili smo i na fragmente obojane keramike raznih motiva, zatim tankog prozirnog stakla te željeznih izduženih dijelova, nalik čavlima. Pretpostavljamo da navedeni nalazi pripadaju rimskim ostacima naselja tog doba, primarno tadašnje Cisse, današnje Caske koja je smještena na samom sjeveru Paškog zaljeva te je svojevremeno bila najveće naselje i luka na Pagu (slika 5.2.2.3.).



Slika 5.2.2.3. a) Fragmenti keramike pronađeni duž izdanka i velika opeka; b) željezni fragmenti.

Tablica 2. Makrofosili.

Tip fosilnog nalaza	Rod ili vrsta	Broj uzorka							
1. Makrofauna		1360/2	1360/3	1360/4	1360 gore	1360 dole	711	712	Duž izdanka
Morski gastropodi	*Cerithium*				+		+	+	+
	Gibbula				+				+
	Odostomia		+			+.			
	Truncullariopsis/ Hexaplex trunculus				+				+
Kopneni gastropodi	*Bayania sp.*	?.							
	Bulimulus					+			
	Cepaea hortensis/ C. nemoralis			+	+		+	+	
	Helix pomatia		+	+	+	+			
	Rumina decolata			+	+	+			
	Stenothyra globulus	?.							
	Tudorella/Pomatia elegans				+		+	+	
Morske bivalvia	*Arca noae*				+				
	Cardium sp.				+				
	Pecten jacobaeus				+				
	Venus verrucosa				+				+
2. Fragmenti									
Keramika									+
Željezo									+
Staklo									+

6. DISKUSIJA

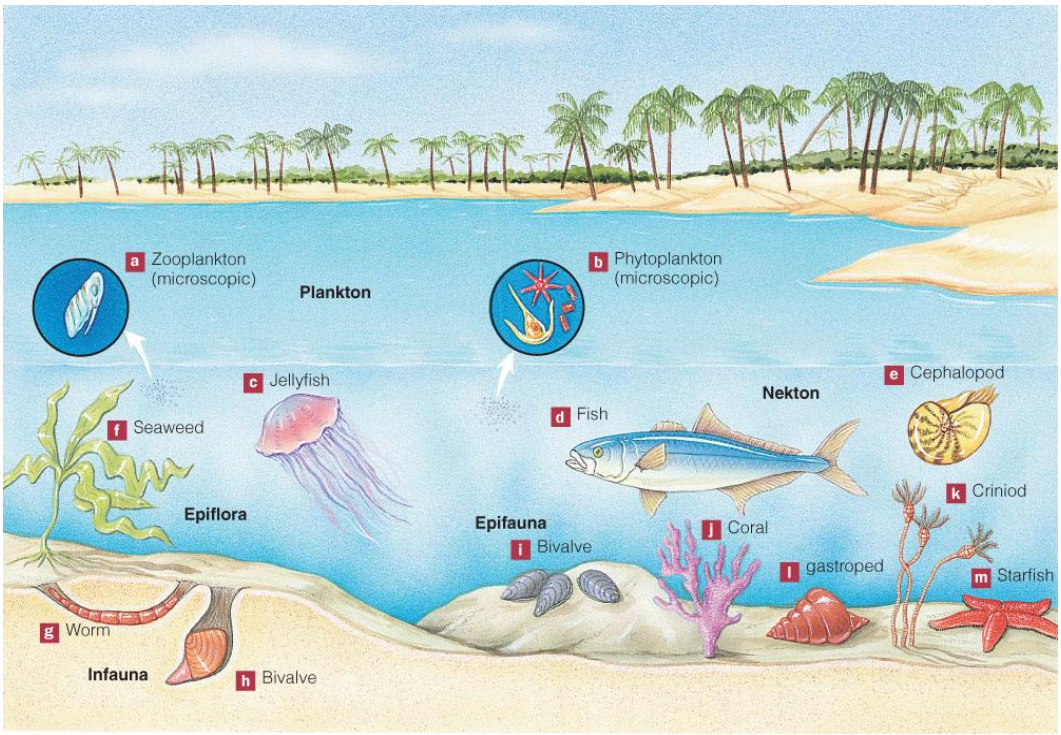
6.1. ZNAČAJKE FAUNE

Mikrofosilni nalazi, poglavito bentičke foraminifere, vjerojatno su pretaložene iz obližnjih eocenskih, ili neogenskih naslaga trošenjem, gravitacijom, ili tekućicama, na što ukazuju izrazito trošni i razlomljeni skeleti pa se tako kod većine ne može uopće razaznati površina stijenke. I planktonske foraminifere često su slomljene, kao i kućice bez spina, a promjena boje stijenke kod nekih jedinki u crveno-smeđu, ili sivkasto-metalnu boju je znak da je već došlo do dijagenetskih procesa trošenja minerala u sedimentu – oksidacije željezovitih minerala. Ono što je još zanimljivo u mikrofosilnom sadržaju su ljušture ostrakoda, sitnih račića koji su primarno bili marinski organizmi, no recentno su poglavito pokazatelji bočatih i slatkovodnih uvjeta, kao i nalazi girogonita zelenih algi, čije su ljušture bile ispunjene sedimentom, a iznimno su krhke i na dodir pincetom su se raspadale iako su u sedimentu bili relativno očuvani.

Fosilni nalazi makrofaune uključuju već spomenute recentne i subrecentne rodove i vrste, među kojima ima i marinskih i terestričkih organizama (primarno govorimo o puževima), a postavlja se pitanje zašto organizme različitog okoliša i facijesnih karakteristika nalazimo ne samo unutar istih naslaga, već istih slojeva? Okolna područja, krenuvši od najudaljenijih čine kredne naslage, koje izgrađuju brda, dok su na padinama mlađe miocenske i eocenske naslage, koje dolaze na pojednim mjestima sve do obale pa je prva pomisao, kao i u slučaju s mikrofosilima, bila da su i neki od makrofosila pretaloženi. Slučaj vrijedi za neke terestričke organizme (koji nisu recentni), koji su mogli obitavati u slatkovodnom miocenskom jezeru i iz obližnjih miocenskih naslaga erozivnim i gravitacijskim djelovanjem biti pretaloženi unutar subrecentnih sedimenata, međutim to nije slučaj i za marinske organizme. Dapače, eocenske glinene naslage poznate su po nalazima mikrofosila, tako da izvorište marinske makrofaune vjerojatno nije bilo na kopnu.

Marinski recentni makroorganizmi uključuju rodove puževa i školjaka obalnog podneblja ukopanih u muljevito dno - infauna, ali i onih koji obitavaju na površini dna – epifauna, odnosno bentos i vagilni bentos, od kojih neki čak i plivaju - nekton. Od epifaune najpoznatiji je puž iz familije Muricidae - *Truncullariopsis* ili *Hexaplex trunculus*, koji je u fosilnom zapisu poznat od pleistocena i značajan je jer je pračovjek od njegovih izlučevina

dobivao indigo boju. Obitava u plitkim, sublitoralnim vodama i radi se o strvinaru i predatoru koji može i plivati. Najpoznatiji plivač od školjkaša je *Pecten jacobaeus*, čiju smo donju zaravnjenu ljušturu pronašli i koji obitava na dnu gdje ima morske trave, na dubini minimalno od 10 m, a hrani se organskim lebdećim tvarima. Slučaj da školjkaš može plivati nije učestao jer općenito velike školjke žive sesilno, ili prirasle za dno ili ukopane u dnu, poput *Venus verrucosa*, koja se hrani planktonskim organskim lebdećim česticama i obitava na pjeskovitom dnu obalnog područja, ali i na većim dubinama, slično kao i školjkaši roda *Cardium*, čije smo fragmente pronašli, a koji žive u plitkim obalnim vodama i pjeskovitom i muljevitom dnu u velikom broju te ruju po podlozi. Posljednji nalaz školjke odnosi se na *Arca Noae*, veliku školjku koja ne živi sesilno, ali je jako slabo pokretna pa većinom bude jako pričvršćena za stjenovitu, kamenitu obalu u velikim naseobinama i pritom se hrani planktonskim detritusom. Od puževa, još ostaju *Cerithidium vulgata*, koja živi na pjeskovitoj i muljevitoj te kamenitoj podlozi, hrani se algama i strvinom i može se pojaviti i u brakičnoj vodi te *Gibbula*, široko rasprostranjen puž stjenovitog morskog dna dubine i do 100 m, koji se hrani algama i obraštajem (Garms & Borm, 1981) (slika 6.1.1.).



Slika 6.1.1. Marinski obalni ekosistem – plankton, nekton (neke školjke i puževi), epifauna (neke školjke, puževi, koralji itd.) te infauna (neke školjke) [7]

Od kopnenih puževa *Helix pomatia* bio je najučestaliji i najveći, a i radi se o rasprostranjenom rodu koji živi pretežno u vrtovima i parkovima i na podlozi koja sadrži vapnenac. Hrani se travama i u vrijeme suše kućicu zatvara sluzavom opnom, dok ga zimi štiti vapnenački poklopac i prezimljuje u zemlji. Slijedeći po veličini i broju pronađenih jedinki

bio je vjerojatno puž *Cepaea nemoralis* (*C. hortensis* nije toliko južno rasprostranjen). Ovaj puž obitava na kultiviranom bilju, hrani se biljkama i za vrijeme suše zatvara se u kućicu sluzavim poklopcem, dok tijekom kiše izlazi na lišće i stabljike i plodove biljaka. Dosta česti su i nalazi puža *Rumina decollata*, koji potječe s Mediterana i poznat je još od rimskog doba kada je bivao ciljano rasprostranjivan jer se radi o predatoru koji učinkovito suzbija ostale vrtne puževe, štetočine i koji je tolerantan na suhe i hladne uvjete, tijekom kojih se ukapaju duboko u zemlju, dok je najaktivniji po noći i za vrijeme kiše te poznatog kopnenog puža roda *Pupilla*, koji živi i na vlažnim mjestima ispod kamenja, lišća i mahovina, kao i na pjeskovitim i sunčanim staništima i suhim livadama i do 2400 m nadmorske visine.

6.2. INTERPRETACIJA REZULTATA

Naslage istraživanog područja sastoje se od izmjene slojeva pijeska, šljunka i gline. Pješčani slojevi sadrže riplove koji pokazuju transport u jednom ili u oba smjera (asimetrični ili strujni riplovi) tipične za mirniji okoliš i donji režim toka te simetrične odnosno valne riplove, zatim lamine koje nastaju u gornjem režimu toka, a kod visokoenergetskih naslaga učestalije su u tempestitima, te sloj s valnim i strujnim riplovima i lećama sitnog šljunka (koje se javljaju i u sloju gline blizu površine). Navedene karakteristike odstupaju od generalnih pokazatelja tsunamita jer su sedimenti tsunamita često masivni, kaotični i bez tekstura, ili normalno graduirani, što ovdje ne vidimo, već imamo očiglednu i jasnu izmjenu slojeva šljunka i pijeska. Na sedimentološkom stupu 1359, u jednom dijelu je prisutan isprekidani kontakt sloja gline i pijeska, a koji je inače prisutan kod visokoenergetskih naslaga. Dalje, već spomenuti pješčani slojevi s riplovima, odnosno strujanjem u dva smjera, inače nisu trag koji upućuje na tsunamit, iako se strujanja mogu poistovjetiti s udarnim valom koji prodire u kopno i povratnim koji se povlači prema moru, a koji se u najboljem slučaju manifestiraju kosom laminacijom u jednom i drugom smjeru (unakrsna kosa slojevitost) (slika 2.2.3.).

Općenito, s obzirom da govorimo o kompleksnim naslagama u visokoenergetskom okolišu pojačane erozije gdje se tragovi brzo brišu i resedimentiraju, dovoljna je jedna neobična značajka sedimenta, anomalno obilježje koje odudara od "normalnih" sedimentacijskih obilježja danog taložnog okoliša, a koje će nas nagnati na preispitivanje taložnog okoliša i uvjeta sedimentacije. U našem slučaju, trag koji upućuje na tsunami su izmiješani terigeni i marinski fosili te neobična pojava recentnih marinskih makrofosila

uklopljenih u sediment duž cijelog izdanka i visine do 4-5 m od razine mora, a koji se u sedimentu javljaju zajedno s kopnenim fosilima (slika 6.2.1.). Za kopnene makro i mikrofosile te marinske mikrofosile, s obzirom na okolne eocenske i miocenske naslage, nije bilo teško odrediti podrijetlo i mogućnost pretaloživanja ili ispiranja vodenim tokovima i bujicama iz unutrašnjosti prema obali. No, recentni marinski makrofosili koji se prostiru istraživanim izdankom, podrijetlo ne vuku iz okolnih naslaga jer u njima nisu bili pronađeni i zabilježeni, tako da se postavlja pitanje kako su se istaložili na istom mjestu s kopnenima. Pretpostavka je da se radilo o visokoenergetskom procesu koji je mogao pokupiti sa dna i školjke i puževe, od kojih neki obitavaju ukopani u dnu, kao npr. *Cardium, Venus* te ih "izvući" na obalu, ili su posljedica antropogenog utjecaja. Kod antropogenog utjecaja, kako smo već ranije spominjali, zbog konzumacije organizama obično se pronalazi veća nakupina jedinki istih ili različitih vrsta, a kod nas je slučaj da imamo nasumično razbacane marinske makrofosile duž izdanka, tako da smatramo da možemo isključiti antropogeni nanos.



Slika 6.2.1. Fosilni nalazi marinskih i kopnenih organizama ukopanih u sediment na istraživanom području te fragmenat stakla

Drugo objašnjenje bi bile promjene razine mora jer bi se u takvim uvjetima recentni i mlađi marinski organizmi mogli naći unutar istih naslaga, ali tada ne bi imali nalaze bentičkih organizama. Također, prema mnogim istraživanjima razine mora u kvartaru, znamo da ona

kontinuirano raste još od pleistocena prije 25 000 godina i glacijalnog maksimuma kada je dosegnuta najniža razina mora u odnosu na današnju: između -80 i -120 m (Šegota 1968, 1976, 1982-1983; Benac & Juračić, 1998, Surić 2009, Surić et al., 2014). Prema istraživanjima, more je počelo plaviti područje Jadrana prije 17 000 godina i razina je kontinuirano rasla sve do prije 6000 godina, s povremenim razdobljima stagnacije (plimske potkapine, abrazijske terase), a od 6000 godina do danas je rasla dosta polagano i prije 2000 godina, na koliko smo okvirno odredili starost naslaga istraživanog područja, razina je bila niža za oko 1.9 m (Šegota 1968), odnosno 0.4-0.75 m niža od današnje (Stiros & Moschas, 2012). Prema tome, jedina opcija donosa marinskog detritusa i fosila je naglim izdizanjem mora i zapljuskivanjem obale radom oluja ili tsunamija.

Sljedeća problematika je sam položaj naslaga u zaljevu, koji je zaštićen sa svih strana i postoji jedan ulaz, putem mora, iz smjera JI, kroz relativno uski tjesnac koji opet izlazi u dugački i uski zaljev između otoka Paga i kopna. Seizmička aktivnost sjevernog dijela Jadrana u smislu pobuđivanja tsunamija neznatna je i dosada nisu pronađeni tragovi u sedimentu koji bi uputili na tsunamite. U slučaju nailaska tsunamija iz smjera juga, s obzirom da je obala isprekidana mnoštvom otoka, otočića i hridi koji su mogli preusmjeriti tok valova tsunamija te lokalno povećati, ili smanjiti amplitudu, teško je očekivati da bi se tsunami uspio probiti do istraživanog područja, iako morfologija i varijabilnost dubine utječu na nepredvidljivo ponašanje tsunamija. Generalna pretpostavka, u vidu nedostatka podataka, jedino nas može uputiti na pojavu lokalnog karaktera. Već smo spomenuli slučaj amplifikacije tsunamija, što bi u ovom slučaju jako došlo do izražaja zbog uskog zaljeva jer bi se tsunami odbijao od rubova i postajao sve jači i jači, tzv. sejševi ili geofizički „štiga“.

U slučaju lokalnog tsunamija, postavlja se pitanje uzroka i vremena pojave, a misao vodilja bili su arheološki fosilni nalazi. S obzirom na razne artefakte za koje smatramo da potječu iz rimskog doba, ranije smo već dali naslutiti scenarij tsunamija kao uzrok propasti rimskog grada Cisse, Caske, koji je svojevremeno bio jedan od većih i važnijih gradova i luka, a o čijem postojanju svjedoče razni nalazi poput akvadukta koji je povezivao Novalju i Casku (Ilakovac, 2008), utvrde Sv. Jurja (Regan, 2002), kovanica koje se nakon 36 g.pr. Kr. ponovo javljaju tek od 3-5 st. (Ilkić, 2009) i ranokršćanskih relikvija (Ilakovac, 1993-1994), ostataka temelja i zidova (Kurilić, 2011) te ostataka šivanog broda i konstrukcije nekadašnjeg pristaništa (Radić Rossi, 2011; Boetto & Radić Rossi, 2012). Problematikom propasti Caske najviše se bavio Ilakovac, B. koji tijekom godina istraživanja u par navrata spominje nekoliko mogućnosti. U istraživanju (1993.-1994.) opisuje uvjete nalaza ranokršćanskih relikvija u

neposrednoj blizini ranokršćanske bazilike u Novalji na Pagu, za koje smatra da potječu iz Kesenske (*Cissa*) biskupije te da su bile skrivene u tajnu komoru 'loculus', a s obzirom na razliku u visini ostataka mozaičnog poda bazilike, smatra da uzrok propasti grada nije poplava, ili potonuće grada uslijed potresa, već razaranje jakim potresom, koji je pobliže datiran između 346. i 365. u Turskoj, Grčkoj ili Petri u Jordanu. Kao dodatan argument iznosi napuknuća kamenih ploča s bočne strane 'loculusa' koje nisu mogle podnijeti znatnija naprezanja. Potres kao uzrok se dugo spominje kroz raznu literaturu (Regan, 2002), no problem je nedostatak dokaza u ostalim mjestima, što spominje i Faričić (2003), jer potres dovoljno jak da razori čitav grad, evidentno bi ostavio traga u široj okolici, a zapisa o tome nema. K tome, spomenuti akvadukt je neoštećen. U novijem istraživanju, Ilakovac kao uzrok spominje scenarij klizišta koje je razrušilo i zatrpalo grad.

Problematika razaranja Caske potkrijepljena je i narodnom pričom izvedenom iz legende o Sodomi i Gomori, prema kojoj je grad progutala voda. Scenariju tsunamija ide u prilog manjak dokaza iz literature, što odgovara lokalnoj razornoj pojavi, ali i manjak dokaza u smislu nedostatka očuvanih zidova kuća, koje tsunamiji razore i povuku za sobom. Međutim, treba uzeti u obzir antropološki utjecaj, jer ljudi su obično građevni kamen znali uzimati iz već postojećih struktura, ili razrušenih kuća i uklopiti ga u nove građevine. Svejedno, implikacije o naseljavanju ljudi u razorenom gradu nose za sobom i pretpostavku da bi ostalo zapisa o izgledu i stanju grada. Dalje, spomenuti potres kao uzrok smo eliminirali jer bi traga ostavio i u drugim naseljima, a zapisa o tome nema. Međutim, mogući je lokalni tsunami kao posljedica potresa, pošto se u literaturi i spominje tsunami koji se nakon potresa proširio Mediteranom, kao i nalaz tsunamita na području Grčke i južne Italije koji koincidira sa spomenutim potresom. Pitanje u ovom slučaju je li tsunami zaista došao do Paškog zaljeva, u kojem je imao razorniji efekt nego na ostatku obale, s obzirom da opet, nema nikakvih zapisa. I konačno, scenarij klizišta i zatrpavanja grada, ili tonjenja grada npr., bi dovelo do postupnog iseljavanja i pretpostavljamo da bi postojali i arheološki tragovi, ali i pisani tragovi o tome.

7. ZAKLJUČAK

Tsunami je dugoperiodički val velikih valnih duljina i brzina, čija amplituda približavanjem obali i plićinama poprima velike razmjere zbog čega su toliko razorni, ukoliko pogode naseljena obalna područja. Sedimenti nastali djelovanjem tsunamija, tsunamiti, spadaju u tzv. momentne naslage, tj. epizodične naslage kratkog trajanja povezane s neobičnim ili visoko-energetskim procesima, u odnosu na naslage svakidašnjih, normalnih taložnih uvjeta, tzv. pozadinske naslage. Problem vezan uz tsunamite je što često ne ostane nikakav trag zbog visoko-energetskog okoliša koji pogađaju s izraženim erozivnim djelovanjem.

Tsunamiti u Jadranu su identificirani u nekoliko navrata, puno manje nego što je zabilježeno udara tsunamija unazad 2000 godina. Na talijanskoj strani, tsunamiji su izazvali velike probleme i štete uglavnom nakon velikih potresa i to 1873.-1875., 1905., 1908. i 1918. pa je i veći broj zabilježenih pojava tsunamija i interpretiranih tsunamita duž talijanske obale, poglavito sa Sicilije. Na području Hrvatske spominju se dubiozni sedimenti s otoka Brusnika te otoka Hvara (granica K-Pg) kao mogući primjeri tsunamita, a u literaturi su bili zabilježeni moderni slučajevi tsunamija u okolici Hvara iz 1965. te iz 1978. s epicentrom u Grčkoj, tijekom kojeg je najviše pogođena Vela Luka, a nešto manje Starigrad na Hvaru, Mljet i Trogir te 20-ak udara meteotsunamija od 1930.-ih godina do danas.

U vidu dosadašnjih istraživanja i znanja o tsunamitima, na otoku Pagu u Paškom zaljevu, između kampa Sv. Duh i Crnike, naišli smo na izdanak koji odudara od sedimenata istaloženih u normalnim uvjetima sedimentacije jer se u uzorcima i duž izdanka javljaju recentni marinski i terigeni organizmi, od kojih marinski nisu mogli biti pretaloženi iz starijih naslaga iz unutrašnjosti. Marinski organizmi sigurno su bili naneseni na obalu, no i dalje ostaje upitno na koji način, jer nismo mogli sa sigurnošću odrediti proces njihova transporta. Indikacije u načinu sedimentacije nisu jednoznačne jer smo pronašli karakteristike uobičajene i kod tsunamita i kod tempestita, a za konkretnije rezultate, potvrdu mogućeg visoko-energetskog događaja, kao i načina i putanje, ali i izvora istog (ako se radi o tsunamiju), potrebna su daljnja istraživanja. Scenariju tsunamija u prilog idu arheološki nalazi s istraživanog terena iz razorenog rimskog grada Caske, netragom nestalog bez ikakvih ostataka i zidova građevina, jer tsunami obično za sobom nosi čitava naselja, kao i nedostatak literature, što zajedno odgovara lokalnoj pojavi koja je mogla razoriti čitav grad, bez tragova u obližnjim naseljima.

8. LITERATURA

Abdulsamad, E., O. (2013): Sytematic Paleontology of Oligocene-Miocene Planktonic Foraminifera from NE... Egypt. Jour. Paleontol. 13, 1-28.

Ambraseys, N., N. (1962): Data for the investigation of the Seismic Sea-Waves in the Eastern Mediterranean. Bulletin of the Seismological Society of America, 52/4, 859-913.

Babić, Lj., Crnjaković, M. & Asmeron, Y. (2012): Uplifted Pleistocene marine sediments of the Central Adriatic Island of Brusnik. Geologia Croatica 65/2, 223-232.

Benac, Č. & Juračić, M. (1998): Geomorphological indicators of sea level changes during upper Pleistocene (Würm) and Holocene in the Kvarner region (NE Adriatic sea). Acta Geographica Croatica, vol. 33, 27-45, UDK 551.46 (497.5-3 Kvarner) „62“, Zagreb.

Beran, L. (2014): Contribution to the knowledge of non-marine aquatic molluscan fauna (Gastropoda, Bivalvia) of Pag Island (Croatia). Nat. Croat. 32/2, 303-313, Zagreb.

Bourgeois, J. (2009): Geologic effects and records of tsunamis. Tsunamis Harvard University Press 15, 53-91.

Boetto, G. & Radić Rossi, I. (2012): Šivani brod u uvali Caska na Pagu – istraživačka kampanja 2011. Histria antiqua 21, 609-622.

Brenko, T. (2015): Strukturna analiza bora i rasjeda na jugoistočnom dijelu otoka Paga. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet, diplomski studij geologije 57 str.

Bulić, J. & Jurišić-Polšak, Z. (2009): Macropalaeontology and stratigraphy of lacustrine Miocene deposits at Crnika beach on Island of Pag (Crnika). Geologia Croatica 62/3, 135-155, Zagreb.

Cantalamessa, G. & Di Celma, C. (2005): Sedimentary features of tsunami backwash deposits in a shallow marine Miocene setting, Mejillones Peninsula, northern Chile. Sedimentary Geology 178, 259-273.

Cimerman, F. & Langer, M., R. (1991): Mediterranian Foraminifera. Slovenska akademija znanosti in umetnosti; Razred za naravoslavne vede, dela 30. 119 str., 93 table, Ljubljana.

Dawson, G., A. & Stewart, I. (2007): Tsunami deposits in the geological record. Sedimentary Geology 200, 166-183.

De Martini, P., M., Barbano, M., S., Smedile, A., Gerardi, F., Pantosti, D., Del Carlo, P. & Pirrotta, C. (2010): A unique 4000 year long geological record of multiple tsunami inundations in the Augusta Bay (eastern Sicily, Italy). Marine Geology 276, 42-57.

Duplančić Leder, T., Ujević, T. & Čala, M. (2004): Coastline lengths and areas of islands in teh Croatian part of the Adriatic sea determined from the topographic maps at the scale of 1:25 000. Geoadria 9/1, 5-32, Zadar.

Engel, M. & Brückner, H. (2011): The identification of palaeo-tsunami deposits – a major challenge in coastal sedimentary research. Karius, Hadler, Deicke, von Eynatten, Brückner & Vött (eds.): Dynamische Küsten – Prozesse, Zusammenhänge und Auswirkungen, Coastline reports 17, 65-80.

Faričić, J. (2003): Otok Pag na starim kartografskim prikazima. Geoadria 8/1, 47-126, Zadar.

Garms, H. & Borm, L. (1981): Fauna Evrope priručnik za određivanje. Mladinska knjiga. VII-XXXII + 630 str., 1200 crteža, 1100 fotografija, Ljubljana.

Glöer, P. & Pešić, V. (2012): The freshwater snails (Gastropoda) of Iran, with descriptions of two new genera and eight new species. ZooKeys 219, 11-61.

Graziani, L., Maramai, A. & Tinti, S. (2006): A revision of the 1783-1784 Calabrian (southern Italy) tsunamis. Natural Hazards and Earthy System Sciences 6, 1053-1060.

Herak, D., Herak, M., Prelogović, E., Markušić, S. & Markulin, Ž. (2005): Jabuka island (Central Adriatic Sea) earthquakes of 2003. Tectonophysics 398, 167-180.

Herak, M., Orlić, M. & Kunovec-Varga, M. (2001): Did the Makarska earthquake of 1962 generate a tsunami in the central Adriatic archipelago? Journal of Geodynamics 31, 71-86.

Hwang, C.-C. (2014): Annotated type catalogue of land snails collected from Taiwan (Formosa) in the Natural History Museum, London. ZooKeys 428, 1-28.

Ilakovac, B. (1993-1994): Ranokršćanski relikvijari kesenske (Cissa) biskupije iz Novalje na otoku Pagu. VAMZ, 3.s., XXXVI-XXVII 47-65.

Ilakovac, B. (1997-1998): Limitacija agera rimske Kiše (Cissa) na otoku Pagu. VAMZ, 3.s., XXX-XXXI 69-82.

Ilakovac, B. (2008): Roman aqueducts on the island of Pag. VAMZ, 3.s., XLI 129-166.

Ilkić, M. (2009): Numizmatički nalazi iz dijela antičkog kompleksa u Caskoj – katastarska čestica 1941/24. Archaeologia Adriatica III, 173-182.

Jiménez-Moreno, G., de Leeuw, A., Mandic, O., Harzhauser, M., Pavelić, D., Krijgsman, W. & Vranjković, A. (2009): Integrated stratigraphy of the Early Miocene lacustrine deposits of Pag Island (SW Croatia): Paleovegetation and environmental changes in the Dinaride Lake System. Paleogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 280, 193-206.

Korbar, T., Montanari, A., Premec Fuček, V., Fuček, L., Coccioni, R., McDonald, I., Claeys, P., Schulz, T. & Koeberl, C. (2015): Potential Cretaceous-Paleogene boundary tsunami deposit in the intra-Tethyan Adriatic carbonate platform section of Hvar (Croatia). Geological Society of America Bulletin, 10.1130/B31084.1.

Kurilić, A. (2011): Kasnoantički stambeni objekt iz Caske (Cissa) na otoku Pagu. Histria antiqua 20, 405-413.

Limondin-Lozouet, N., Haddoumi, H., Lefèvre, D., Ghamizi, M., Aouraghe, H. & Salel, T. (2012): Holocene molluscan succession from NE Morocco: Palaeoenvironmental reconstruction and biogeographical implications. Quaternary International 302, 61-76.

Magaš, D. (2011): Zemljopisna obilježja otoka Paga u funkciji upoznavanja njegove toponimije. Sveučilište u Zadru, Odjel za geografiju, https://www.researchgate.net/publication/285221327.

Mamužić, P. & Sokač, B. (1973): Tumač osnovne geološke karte za listove Molat i Silba 1:100 000. Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.

Mamužić, P., Sokač, B. & Velić, I. (1970): Osnovna geološka karta SFRJ 1:100 000, list Silba L 33-126. Geološki zavod Zagreb, Savezni geološki zavod, Beograd.

Manenica, H. (2015): Urbanizacija između Raše i Krke u vrijeme ranog principata. Sveučilište u Zagrebu, Filozofski fakultet Zagreb, poslijediplomski studij arheologije, 322 str.

Maramai, A., Graziani, L. & Tinti, S. (2007): Investigation on tsunami effects in the central adriatic Sea during last century – a contribution. Natural Hazard and Earth System Sciences 7, 15-19

Massari, F., D'Alessandro, A. & Davaud, E. (2009): A coquinoid tsunamite from the Pliocene of Salento (SE Italy). Sedimentary Geology 221, 7-18.

Morton, R., Gelfenbaum, G. & Jaffe, B., E. (2007): Physical criteria for distinguishing sandy tsunami and storm deposits using modern examples. Sedimentary Geology, 10.1016/sedgeo.2007.01.003

Morton, R., A., Richmond, B., M., Jaffe, B., E., Gelfenbaum, G. (2008): Coarse-clast ridge complexes of the Caribbean: A preliminary basis for distinguishing Tsunami and Storm-Wave origins. Journal of Sedimentary Research 78, 624-637.

Neubauer, T., A., Mandic, O. & Harzhauser, M. (2013): The Middle Miocene freshwater mollusk fauna of Lake Gacko (SE Bosnia and Herzegovina): taxonomic revision and paleoenvironmental analysis. Fossil recor 16/1, 77-96.

Orlić, M (1984): Ima li »tsunamija« u Jadranskom moru? Priroda 310, svibanj-lipanj.

Orlić, M. (2015.): The first attempt at cataloguing tsunami-like waves of meteorological origin in Croatian coastal waters. Acta Adriatica 56(1), 83-96.

Papp., A. & Schmid, M., E. (1985): Die fossilen Foraminiferen des tertiären Beckens von Wien. Abhandlungen der geologischen bundesanstalt, Band 37, Wiena.

Paulatto, M., Pinat, T. & Romanelli, F. (2007): Tsunami hazard scenarios in the Adriatic Sea domain. Natural Hazard and Earth System Sciences 7, 309-325.

Phantuwongraj, S. & Choowong, M. (2012): Tsunamis versus storm deposits from Thailand. Natural Hazards 63, 31-50, ISSN 0921-030X, DOI 10.1007/s11069-011-9717-8.

Porfido, S., Esposito, E., Violante, C., Molisso, F., Sacchi, M. & Spiga, E. (2007): Earthquakes-Induced Environmental Effects in Coastal Area: Some Example in Calabria and Sicily (Southern Italy). Marine reSEArch@CNR.it

Radić Rossi, I. & Boetto, G. (2011): Šivani brod u uvali Caska na Pagu – istraživačka kampanja 2010. Histria antiqua 20, 505-513.

Regan, K. (2002): Utvrda Sv. Jurja u Caskoj na otoku Pagu. Pril. Inst. Arheol. Zagrebu 19, 141-148.

RMS Special Report (2008): The 1908 Messina Earthquake: The 100-Year Retrospective. Risk Management Solutions, Inc.

Sasaki, T. (2008): Micromolluscs in Japan: Taxonomic composition, habitats, and future topics. Zoosymposia 1, 147-232.

Scheffers, A., Kelletat, D., Vött, A., Matthias May, S. & Scheffers, S. (2008): Late Holocene tsunami traces on the western and southern coastlines of the Peloponnesus (Greece). Earth and Planetary Science Letters 269, 271-279

Shanmugam, G. (2015): The landslide problem. Journal of Palaeogeography 4/2, 109-166.

Shiki, T., Cita, M., B. & Gorsline, D., S. (2000): Sedimentary features of seismites, seismo-turbidites and tsunamites – an introduction. Sedimentary Geology 135, vii-ix.

Tinti, S., Maramai, A. & Graziani, L. (2004): The New Catalogue of Italian Tsunamis. Natural Hazards 33, 439-465.

Šegota, T. (1968): Morska razina u holocenu i mlađem dijelu würma. Geografski glasnik 30, 15-39.

Šegota, T. (1976): Promjena razine Jadranskog mora prema podacima mareografa u Bakru i Splitu. Geografski glasnik 38, 301-312.

Šegota, T. (1982-1983): Paleogeografske promjene u Jadranskom moru od virmskog maksimuma do danas. Radovi 17-18, 11-15, UDK 551.46.551.79.(497.13).

Surić, M. (2009): Rekonstruiranje promjena morske razine na istočnoj obali Jadrana (Hrvatska) – pregled. Geoadria 14/2, 181-199, UDK 551.46(497.58)(210.5)(262.3).

Surić, M., Juračić, M., Horvatinčić, N. & Krajcar Bronić, I. (2005): Late Pleistocene-Holocene sea-level rise and the pattern of coastal karst inundation: records from submerged speleothems aong the Eastern Adriatic Coast (Croatia). Marine Geology 214, 163-175.

Vermeulen, J., J., Liew, T.-S. & Schilthuizen, M. (2015): Additions to the knowledge of the land snails of Sabah (Malaysia, Borneo), including 48 new species. ZooKeys 531, 1-139.

Wang, T., Meng, T. & Zhao, H. (2015): Analysis of Tsunami Effects and Structural Response. Tehnički vjesnik 22/6, 1365-1371.

Yolsal-Çevikbilen, S. & Taymaz, T. (2012): Earthquake source parameters along the Hellenic subduction zone and numerical simulations of historical tsunamis in the Eastern Mediterranean. Tectonophysics 536-537, 61-100.

Zavodnik, D. & Kovačić, M. (2000): Index of Marine Fauna in Rijeka Bay (Adriatic Sea, Croatia). Nat. Croat. 9/4, 297-379, Zagreb.

Zore-Armanda, M. (1988): Tsunami na Jadranu? Pomorski zbornik 26, 657-668.

INTERNETSKI IZVORI

[1] www.novalja-pag.net/evita/ (27.12.2017.)
[2] https://de.wikipedia.org/wiki/Tsunamit (21.6.2017.)
[3] www.discovertsunamis.org/tsunami_science_u6.html (21.6.2017.)
[4] www.slideshare.net/wwlittle/clastic-shelf-systems 36/40 (21.6.2017.)
[5] commons.wikimedia.org/wiki/File:Adriatic_Sea_Bathymetry.svg (24.4.2017.)
[6] preglednik.arkod.hr/ARKOD-Web/
[7] keywordsuggest.org/gallery/406712.html (21.6.2017.)

www.zadarskilist.hr/clanci/05062012/uvala-caska-polako-otkriva-svoje-tajne (7.12.2016.)
www.sunturist.com/croatia/hr/paketi/plovidba-tragovima-rimske-cisse/ (7.12.2016.)
www.pagpress.com/novosti/949-senzacionalna-otkria-u-uvali-caska-na-pagu-potvrena-legenda-o-stranoj-propasti-kise.html (7.12.2016.)
www.geografija.hr/hrvatska/pag-otok-na-dodiru-geografskih-mikrosvijetova/ (15.12.2016.)
hr.metapedia.org/wiki/Hrvatsko-jadranski_pu%C5%BEevi (20.12.2016.)
walrus.wr.usgs.gov/tsunami/itst.html (20.12.2016.)
walrus.wr.usgs.gov/tsunami/peru2/sediments.html (21.12.2016.)
soundwaves.usgs.gov/2007/11/ (21.12.2016.)
www.pmfias.com/tsunami-2004-indian-ocean-tsunami-tsunami-waves-warning-systems/ (22.12.2016.)
www.discovertsunamis.org/tsunami_science_u3.html (10.1.2017.)
www.foraminifera.eu/ (10.1.2017.)
www.pbase.com/agfloridia/fauna_of_malta&page=9 (12.2.2017.)

www.marinespecies.org/photogallery.php?p=show&album=702&pg=1 (12.2.2017.)
keywordsuggest.org/gallery/406712.html (15.2.2017.)
http://www.carnegiemnh.org/science/mollusks/va_imagegallery.html (5.3.2017.)
http://www.seashellhub.com/Thailand.html (5.3.2017.)
http://www.zoologischemededelingen.nl/82/nr02/a41 (10.3.2017.)
www.weichtiere.at/Schnecken/index.html?/Schnecken/suesswasser/graecoanatolica_macedonica.html (10.3.2017.)
www.fotoconchigliemediterraneo.com/2017/01/terrestri-e-dulciacquicoli-1.html (22.3.2017.)
www.dmap.co.uk/fossils/bracklesham/gast/brackgast.htm (22.3.2017.)
www.molluscs.at/gastropoda/terrestrial.html?/gastropoda/terrestrial/enidae.html (22.3.2017.)
www.gastropods.com/Taxon_pages/Class_GASTROPODA.shtml (27.3.2017.)
bigai.world.coocan.jp/pic_book/index.html (27.3.2017.)
www.marinespecies.org/photogallery.php?p=show&album=772&pg=3 (25.5.2017.)

DODATAK I

U tablici iznosimo katalog svih zabilježenih tsunamija na Jadranu, uključujući cjelokupnu talijansku obalu prema talijanskom katalogu tsunamija ITC, Tinti et al. (2004) (u tablici "T") te kataloga tsunamija priloženih u radovima Ambraseys (1962) ("A") i Paulatto et al. (2007) ("P"). Za svaki zabilježeni tsunami, na temelju literature i kataloga iznosimo prvo godinu, zatim i datum ako je dostupan, pogođeno područje te uzrok, ukoliko je naveden, a u slučaju potresa i magnitudu i intenzitet ako su prethodno navedeni u literaturi. Zadnja kolona odnosi se na literaturu u kojoj se spominje tsunami, koju smo bilježili pod prethodno navedenim kraticama A, P i T.

N	Vrijeme udara tsunamija gg/dd/mm/		Područje pogođeno tsunamijem	Uzrok	Magnituda (M) i intenzitet (I)	Refe-rence
1.	58. pr.Kr		Obala Albanije - Durres	potres		A, P
2.	79.	24.8.	Obala Italije - Campania	vulkanska aktivnost		T
3.	346.		Obala Albanije - Durres	potres	M=6.8, I=IX	P
4.	365. (364. ili 369. ?)	21.7.	Istočni Mediteran – Grčka, obala Jadrana	potres	I=XI	A, P
5.	558		Ancona i okolno područje	nepoznat		P
6.	792. (ili 793. ?)	30.4.	Zaljev Venecije, obala Istre i Jadrana	potres	I=IX	A, P
7.	1106.	?.3.	Zaljev Venecije	potres	I=VIII	P
8.	1112.	20.6.	Obala Italije - Campania	nepoznat		T
9.	1169.	4.2.	Istočna Sicilija	potres		T
10.	1273.	?.9.	Obala Albanije – Durres, Potenza	potres	M=5.9	A, P
11.	1302.		Obala Riminija			A
12.	1303.	?.12.	Jadranska obala, Grčka - Kreta			A, P
13.	1321.		Zaljev Venecije	potres	I=VIII	P
14.	1329.	28.6.	Istočna Sicilija	vulkanska aktivnost		T
15.	1331.	13.3.	Jadranska obala	potres		P
16.	1348.	25.1.	Zaljev Venecije	potres	M=6.4/6.9, I=IX/XI	P
17.	1511.	26.3.	Sjeverni Jadran - zaljev Venecije, Trst	potres	M=6.2/6.5/6.8, I=IX/X	P, T
18.	1564.	20.7.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
19.	1613.	25.8.	Sjeverna Sicilija	potres		T
20.	1624.	18. ili 19.3.	Delta Padano, Argenta	potres	M=5.5, I=VIII-IX/X	P
21.	1627.	30.7.	Gargano, Capitanata	potres	M=6.8/7, I=IX/X	P, T
22.	1627.	6.9.	Centralni Jadran – Gargano, ušće rijeke Fortone	potres	M=5.7, I=VI-VII/VIII-IX	P
23.	1631.	17.12.	Campania	vulkanska aktivnost		T
24.	1638.	27.3.	Tirenska strana Calabrie	potres		T
25.	1646.	5.4.	Toskana	potres		T

26.	1646.	31.5.	Gargano	potres	M=6.1/6.4, I=VI/IX/IX-X	P
27.	1649.	?.1.	Messina	potres		T
28.	1667.	6.4.	Dalmacija i obala Italije, južni Jadran	potres	M=7.2, I=IX	P
29.	1667.	30.11.	Obala Jadrana, Venecija			P, A
30.	1672.	14.4.	Centralni Jadran - Rimini	potres	M=5.5/5.6, I=VIII/IX	P, T
31.	1693.	9.1.	Istočna Sicilija	potres		T
32.	1693.	11.1.	Istočna Sicilija	potres		T
33.	1694.	8.9.	Apulija – Brindisi, Bari	potres	M=6.8/7, I=X/XI	P
34.	1698.	14.5.	Campania	vulkanska aktivnost		T
35.	1703.	2.2.	Latium	potres		T
36.	1703.	2.7.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
37.	1714.	30.6.	Campania	vulkanska aktivnost		T
38.	1726.	1.9.	Sjeverna Sicilija	potres		T
39.	1727.	4.7.	Kanal Sicilije	potres		T
40.	1731.	20.3.	Gargano, apulijska obala – Siponto, Barletta	potres	M=6.2/6.6, I=IX/X	P, T
41.	1742.	19.1.	Toskana	potres		T
42.	1743.	20.2.	Apulija, Salentinski poluotok – Brindisi, Lecce	potres	M=7/7.3, I=VIII/IX	P, T
43.	1750.	17.9.	Jadranska obala - Rijeka	potres	I=VI	A, P
44.	1756.	22.10.	Obale Gargana			P
45.	1760.	16.6.	Campania	potres		T
46.	1781.	26.2.	Centralni Jadran – Ortona			P
47.	1783.	5.2.	Tirenska Calabria	potres		T
48.	1783	6.2.	Tjesnac Messine	potres		T
49.	1783	7.2.	Tirenska Calabria	potres		T
50.	1783	1.3.	Tirenska Calabria	potres		T
51.	1783	28.3.	Tirenska Calabria	potres		T
52.	1784.	7.1.	Jonska Calabria	potres		T
53.	1784.	19.1.	Tjesnac Messine	potres		T
54.	1802.	3. ili 4.1.	Dalmacija i Istra - Rijeka	potres	M=5.5, I=VII	A, P
55.	1805.	26.7.	Campania	potres		T
56.	1808.	2.4.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
57.	1809.	3.7.	Liguria Côte d´Azur	nepoznat		T
58.	1813.	7.4.	Jadranska obala	potres	I=VII	P
59.	1813.	17.5.	Campania	vulkanska aktivnost		T
60.	1817.	14.1.	Kanal Sicilije	potres		T
61.	1818.	20.2.	Istočna Sicilija	potres		T
62.	1818.	23.2.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
63.	1823.	5.3.	Sjeverna Sicilija	potres		T
64.	1823.	20.8.	Dalmacija - Dubrovnik			A, P
65.	1826.	18.3.	Obala Jadrana – Pesaro, Sinigallia	potres	I=III	P
66.	1828.	9.10.	Liguria Côte d´Azur	potres		T

67.	1832.	8.3.	Jonska Calabria	potres		T
68.	1833.	19.1.	Albanska obala – Valona, otok Saseno	potres	M=6.5, I=VIII	A, P
69.	1836.	25.4.	Jonska Calabria	potres		T
70.	1838.	10.8.	Dalmacija, Rijeka, Trst	potres	M=4.7	P
71.	1843.	14.9.	Dalmacija - Dubrovnik			A, P
72.	1844.	3 ili 23..3.	Dalmacija - Dubrovnik			A, P
73.	1845.	16.8.	Dalmacija - Dubrovnik			A, P
74.	1846.	14.8.	Toskana	potres		T
75.	1847.	26.8.	Campania	nepoznat		T
76.	1851.	12.10.	Albanska obala - Valona	potres	M=6.4/6.8, I=VIII	A, P
77.	1853.	11.12.	Dalmacija			P
78.	1866.	2.1.	Albanska obala – Valona, Himara	potres	M=6.6,I=IX	A, P
79.	1866.	6.1.	Albanska obala – Valona, Narta			A, P
80.	1866.	2. ili 3.3.	Albanska obala – Valona	potres	M=6.3, I=IX	A, P
81.	1866	6.3.	Albanska obala – Himara, Kanina	potres	M=6.1, I=VIII	A, P
82.	1866	13.3.	Albanska obala – Himara, Kanina	potres	M=5.6, I=VII	A, P
83.	1867.	20.9.	JI obala Italije			A
84.	1869.	28.12.	Albanska obala – Valona	potres	M=6.4, I=X	A, P
85.	1870.	29.7.	Otok Vis (Lissa)	potres	M=5.2/5.5, I=VIII	A, P
86.	1870.	6.8.	Dalmacija - Lesina			P
87.	1875.	17. ili 18.3.	Centralni Jadran – otok Vis, Rimini – Cervia	potres	M=5.2/5.8, I=VIII	P, T
88.	1887.	23.2.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
89.	1888.	30.7.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
90.	1889.	8.12.	Gargano, Ancona, otočje Tremiti	potres	M=5/5.6, I=VII	P, T
91.	1893.	14.6.	Albanska obala – Valona, Himara	potres	M=6.6, I=IX	A, P
92.	1894.	16.11.	Tirenska Calabria	potres		T
93.	1905.	8.9.	Tirenska Calabria	potres		T
94.	1906.	4.4.	Campania	vulkanska aktivnost		T
95.	1907.	23.10.	Jonska Calabria	potres		T
96.	1908.	28.12.	Tjesnac Messine	potres		T
97.	1916.	3.7.	Eolsko otočje	potres		T
98.	1919.	22.5.	Eolsko otočje	potres		T
99.	1920.	26.11.	Albania - Saseno	potres	M=6.3, I=IX	P
100.	1920.	18.12.	Albanska obala – Valona			A, P
101.	1926.	17.8.	Eolsko otočje	vulkanska aktivnost		T
102.	1930.	11.9.	Eolsko otočje	vulkanska aktivnost		T
103.	1937.	20.7.	Hrvatska obala – otok Hvar	potres	M=5.2, I=VIII	P
104.	1940.	15.1.	Sjeverna Sicilija	potres		T

105.	1944.	20.8.	Eolsko otočje	vulkanska aktivnost		T
106.	1954.	?.2.	Eolsko otočje	vulkanska aktivnost		T
107.	1962.	11.1.	Hrvatska obala - Makarska	potres	M=6.1	P
108.	1968.	18.4.	Liguria Côte d´Azur	potres		T
109.	1978.	21. ili 22.6.	Centralni Jadran – od Giulianove do Bisceglie	nepoznat		P, T
110.	1979.	7.4.	Južna Crna Gora			P
111.	1979.	15.4.	Južni Jadran – Bari	potres	M=6.8, I=IX	P
112.	1979.	16.10.	Liguria Côte d´Azur	marinsko klizište		T
113.	1988.	20.4.	Eolsko otočje	gravitac. klizište		T
114.	1990.	13.12.	Istočna Sicilija	potres		T
115.	2002.	30.12.	Eolsko otočje	vulkanska aktivnost		T