

# Geodinamika Zagrebačkog i Pokupskog sustava rasjeda

---

Lončar, Iva

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:450075>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-04**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Iva Lončar

GEODINAMIKA ZAGREBAČKOG I  
POKUPSKOG SUSTAVA RASJEDA

Diplomski rad

Zagreb, 2021.



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: SEIZMOLOGIJA I FIZIKA ČVRSTE ZEMLJE

Iva Lončar

Diplomski rad

**Geodinamika Zagrebačkog i Pokupskog  
sustava rasjeda**

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Snježana Markušić

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_  
2. \_\_\_\_\_  
3. \_\_\_\_\_

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2021.

*Prvo bih se zahvalila svojoj mentorici izv. prof. dr. sc. Snježani Markušić koja me je vodila kroz istraživanje i pisanje rada, uvijek bila dostupna i spremna pomoći. Hvala i Nikoli Beliću iz Hrvatskog geološkog instituta koji mi je pomogao u korištenju softvera MOVE. Hvala prof. dr. sc. Marijanu Kovačiću koji je pomogao u geološkoj potkrijepi ovog rada.*

*Naposljetku, hvala mojoj obitelji i prijateljima koji su me podupirali kroz cijeli studij, pa tako i prilikom izrade ovog rada.*

## Sažetak

Kako bi se što preciznije mogao odrediti seizmički hazard, potrebno je što bolje poznavati geodinamiku promatranog područja, odnosno poznavati potresnu povijest, seizmotektoniku i geologiju tog područja te bazu podataka o zabilježenim akceleracijama.

Potres magnitude 5.3 koji se dogodio u nedjelju 22. ožujka 2020. u 6:24 SEV s epicentrom u blizini Markuševca i Čučerja, 7 km od Zagreba, najjači je instrumentalno zabilježeni potres iz Zagrebačkog epicentralnog područja. Ovaj potres, intenziteta VII-VIII °MSK, je odnio jedan ljudski život i ostavio veliku materijalnu štetu posebice u samom centru Zagreba, gdje su najviše stradale građevine izgrađene do 1920. godine. Približno je procijenjeno da je gibanje tla od 0.16 - 0.19 *g* barem dvostruko amplificirano. Petrinjska serija potresa započela je vrlo jakim potresom magnitude 5.0 28. prosinca 2020. u 6:28 SEV, a nakon malo više od jednog dana uslijedio je glavni potres magnitude 6.2 u 12:19 SEV. Epicentri glavnog i najjačeg prethodnog potresa ove serije bili su na udaljenosti manje od 7 km jugozapadno od Petrinje, dok su im hipocentri bili na dubini od približno 9 km. Glavni potres intenziteta VIII-IX °EMS odnio je sedam ljudskih života te uzrokovao velike materijalne štete posebice u centru Petrinje. Procijenjeno je da je vršno ubrzanje tla bilo između 0.4 i 0.6 *g*, ovisno o tipu tla i udaljenosti od epicentra. Veliku ulogu u nastaloj šteti, nakon oba glavna potresa ove dvije serije, imala je nepropisna i strukturno neadekvatna gradnja.

Pomoću prostorne razdiobe žarišta potresa iz obje navedene serije potresa, u softveru MOVE su se pomoću IDW metode modelirale rasjedne ravnine koje najbolje opisuju aktivirane rasjede. Tako su za Zagrebačku seriju modelirana tri duboko ukopana rasjeda, tzv. slijepi rasjedi, koji nemaju manifestacija na površini. *Rasjed 1* ili *primarni* rasjed akomodira glavni potres i najjače naknadne potrese. Ovaj rasjed dobro se slaže s parametrima dobivenim u računu žarišnog mehanizma za glavni potres, koji je i pokazao da se potres dogodio na reversnom rasjedu nagiba prema jug-jugoistoku te on najbliže opisuje Sjeverni rubni medvednički rasjed. *Rasjed 2* je modeliran na temelju hipocentara potresa srednje jačine. Ovaj rasjed približno prati vrhove Medvednice i vrlo vjerojatno je reversan. Posljednji modeliran *Rasjed 3* je približno paralelan Kašinskom rasjedu. Aktivnost ovog rasjeda može ukazati na to da je i Kašinski rasjed još uvijek seizmogen. Iz vremenskih prikaza može se vidjeti da se u kasnijim fazama ove serije potresa nisu aktivirali dodatni rasjedi ni manje strukture zbog čega je za očekivati da se neki dodatni rasjedi neće ni aktivirati, čime će se seizmičnost ovog prostora lagano smanjivati.

Slično kao u Zagrebačkoj seriji, i u Petrinjskoj seriji se aktiviralo barem dva, vrlo vjerojatno slijepa, rasjeda. Modeliran je primarni *Rasjed 1* koji akomodira glavninu hipocentara potresa iz kataloga, uključujući i potrese najvećih magnituda. *Rasjed 1* opisuje Pokupski rasjed te se gotovo savršeno slaže s izračunatim žarišnim mehanizmom za glavni potres koji je dao subvertikalni rasjed s desnim pomakom po pružanju. U ovoj seriji se aktivirala i grupa potresa s epicentrima sjeveroistočno od Pokupskog rasjeda te su kroz tu grupu modelirana dva rasjeda: *Rasjed 2* (Petrinjski rasjed) približno okomit na Pokupski te *Rasjed 3* približno paralelan Pokupskom. Prostorna razdioba prethodnih potresa ukazuje na aktivnost sekundarnog rasjeda (vjerojatno Petrinjskog) koji je vrlo vjerojatno potaknuo aktivnost Pokupskog rasjeda na kojem se glavni potres

i dogodio. Zbog toga se ne može zanemariti mogućnost da su se u ovoj seriji potresa ipak aktivirala sva tri modelirana rasjeda.

Katalozi potresa sadrže još uvijek preliminarno određene potrese koji su još uvijek podložni promjenama pa su tako i rezultati ovog rada preliminarni. Svrha ovog rada bila je dati bolji uvid u aktivirani sustav rasjeda te tako osigurati temelje za daljnja istraživanja i preciznije određivanje seizmičkog hazarda.

**Ključne riječi:** Zagrebačka serija potresa, Petrinjska serija potresa, geodinamika, strukturno modeliranje, sustav rasjeda, seizmičnost

# Geodynamics of Zagreb and Pokupsko fault systems

## Abstract

To contribute to a better and more precise assessment of the seismic hazard for a certain area, it is important to understand the geodynamics of that area. That means we should know earthquake history, seismotectonics and geology of that area as well as having a database of recorded accelerations.

On early Sunday morning on 22nd of March 2020, at 6:24 CET, an earthquake M5.3 occurred with epicenter near Markuševac and Čučerje, 7km far from the Zagreb city center. That earthquake is the strongest, instrumentally recorded earthquake in the Zagreb epicentral area. With a maximum intensity of VII - VII °MSK, that earthquake took one life and left severe material damage, especially in the center of Zagreb where the most severely damaged buildings were built until 1920. The first-order assessment of seismic amplification (due to site conditions) in the Zagreb area shows that ground motion of approximately 0.16 - 0.19  $g$  were amplified at least twice. Petrinja earthquake series started with a strong M5 foreshock on early Monday morning on 28th of December 2020, at 6:28 CET. The day after, mainshock M6.2 occurred at 12:19 CET. Epicenters of those two earthquakes are almost at the same place, almost 7 km SW from Petrinja and at the depth of approximately 9 km. The mainshock, with maximum intensity of VIII-IX °EMS, took seven lives and caused severe material damage, especially in the center of Petrinja. It was estimated that peak ground acceleration of mainshock was in between 0.4 and 0.6  $g$ , depending on local soil type and epicentral distance. The main reasons for a big material damage, caused by the mainshocks from both earthquake series, was improper construction of buildings.

In this research, spatial distribution of hypocenters from both earthquake series were analysed in structural geological modelling software MOVE using IDW metode, to describe activated faults. For the Zagreb earthquake series three faults that accommodate the vast majority of hypocenters (as well activated faults) were modeled as deep-seated. *Fault 1*, interpreted as a primary thrust fault, accommodates mainshock and the strongest aftershocks. This fault describes well parameters given in the calculated focal mechanism which as well indicates that mainshock and the strongest aftershock happened on a south-southeast-dipping thrust fault. *Fault 1* describes the Northern Medvednica Boundary Fault the best. *Fault 2*, modelled on hypocenters of moderate earthquakes, is of unknown character (probably thrust fault as well) and it dissects the Medvednica Mt. generally across the highest peaks. Lastly modeled is *Fault 3* which is almost parallel to the Kašina fault and can indicate its activity. From the time dependent 3D model it is visible that in later phases of this earthquake series no additional faults and structures were activated. Because of that, it is expected that the seismic activity of the Zagreb epicentral area is slowly calming down.

Similar to the Zagreb earthquake, in the Petrinja earthquake series activated at least two, probably blind, faults. Primary *Fault 1* is modeled to accommodate the vast majority of earthquakes from catalogue, including the strongest ones. *Fault 1* describes Pokupsko fault and it describes almost perfectly the parameters of the dextral

strike-slip calculated in the focal mechanism of mainshock. Smaller group, NE from Pokupsko fault, activated as well, therefore two faults were modeled to accommodate those earthquakes: *Fault 2* (Petrinja fault) perpendicular to Pokupsko fault, and *Fault 2* almost parallel to the primary Pokupsko fault. Spatial distribution of foreshocks implies the activity of secondary fault (possibly Petrinja fault) which most likely initiated activity of the Pokupsko fault on which the mainshock happened. Because of that, the possibility that all three modeled faults were activated in this earthquake series cannot be ignored.

Earthquake catalogues used in this research still contain preliminary analysed earthquakes that can still be changed and therefore results given in this research are preliminary. The main purpose of this research is to give a better insight into the activated fault system to insure foundations for further research and more precise seismic hazard assessment.

**Keywords:** Zagreb earthquake series, Petrinja earthquake series, geodynamics, structural modeling, fault system, seismicity

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Teorijska podloga seizmičnosti sjeverozapadnog dijela Hrvatske</b>	<b>3</b>
<b>3. Zagrebački rasjedni sustav</b>	<b>6</b>
3.1. Geološki pregled zagrebačke seizmogene zone . . . . .	6
3.2. Seizmička povijest šireg zagrebačkog područja . . . . .	7
3.3. Zagrebački potres 22. ožujka 2020. . . . .	9
3.3.1. Žarišni mehanizam . . . . .	10
3.3.2. Opis štete i karakteristike građevina . . . . .	11
3.3.3. Amplifikacija i lokalni uvjeti tla . . . . .	13
3.4. Podaci i metode . . . . .	18
3.5. Rezultati i diskusija . . . . .	22
<b>4. Pokupski rasjedni sustav</b>	<b>27</b>
4.1. Geološki pregled pokupske seizmogene zone . . . . .	27
4.2. Seizmička povijest šireg pokupskog područja . . . . .	28
4.3. Petrinjski potres 29. prosinca 2020. . . . .	29
4.3.1. Žarišni mehanizam . . . . .	30
4.3.2. Utjecaj na okoliš, opis štete i karakteristike građevina . . . . .	31
4.3.3. Amplifikacija i lokalni uvjeti tla . . . . .	33
4.4. Podaci i metode . . . . .	36
4.5. Rezultati i diskusija . . . . .	40
4.5.1. Strukturno modeliranje Pokupske serije potresa . . . . .	42
<b>5. Zaključak</b>	<b>48</b>
<b>Literatura</b>	<b>50</b>
<b>Popis kratica</b>	<b>53</b>
<b>Dodatak A 3D prikaz modeliranih rasjeda Zagrebačke serije potresa</b>	<b>54</b>
<b>Dodatak B <i>Time-lapse</i> Zagrebačke serije potresa</b>	<b>54</b>
<b>Dodatak C 3D vremenski prikaz hipocentara Zagrebačke serije potresa</b>	<b>54</b>
<b>Dodatak D 3D prikaz modeliranih rasjeda Petrinjske serije potresa</b>	<b>54</b>
<b>Dodatak E <i>Time-lapse</i> Petrinjske serije potresa</b>	<b>54</b>
<b>Dodatak F <i>Time-lapse</i> prva dva dana Petrinjske serije potresa</b>	<b>55</b>
<b>Dodatak G <i>Time-lapse</i> hipocentara Petrinjske serije potresa projiciranih na profile</b>	<b>55</b>

# 1. Uvod

Seizmički hazard ili potresna opasnost govori o vjerojatnosti da se neki iznos odabranog parametra trešnje tla premaši u zadanom razdoblju (Herak, 2012). Kako je hazard intrinzična prirodna vjerojatnost potresa, a time resultantnih kretanja tla i drugih efekata, a rizik opasnost koju hazard predstavlja za živote i imovinu (Stein i Wysession, 2009), vrlo je važno da znamo dobro procijeniti hazard. Drugim riječima, iako je seizmički hazard svojstvo potresa koje može uzrokovati štetu te je on potpuno definiran prirodom, o riziku odlučujemo sami.

Kako bismo što točnije mogli procijeniti seizmički hazard, potrebno je dobro poznavati povijest potresa, seizmotektoniku i geologiju nekog područja za koje želimo odrediti hazard te imati bazu podataka o zabilježenim akceleracijama (osnova za procjenu akceleracija budućih potresa). Poznavanje povijesti potresa znači imati što potpuniji katalog potresa koji će sadržavati sve velike povijesne potrese, ali i one slabije potrese koji se uz današnje moderne seizmografe mogu pouzdanije locirati. Katalog mora biti potpun, homogen te mora pokrivati i susjedna područja - jer potresi ne poznaju granice (tako npr. katalog Hrvatske obuhvaća i područja oko 100-150 km izvan granica Republike Hrvatske). Dobro poznavanje seizmotektonike važno je zbog pouzdane procjene najvećih mogućih magnituda i mjesta gdje se potresi tih magnituda mogu dogoditi. Poznavanje geologije područja važno nam je zbog procjene lokalnih učinaka tla, tj. amplifikacijskih efekata tla. Da bismo točno odredili povijesnu opasnost, trebali bismo imati potpuni katalog potresa za posljednjih 500-ak tisuća godina i 10-tak tisuća zabilježenih akcelerograma, što evidentno nije moguće.

U ovome radu će se analizirati dvije serije potresa koje su se dogodile tijekom 2020. godine. Prva je započela 22. ožujka 2020. godine potresom s epicentrom kraj Zagreba. Razmotrit će se geologija i seizmičnost šireg zagrebačkog područja. Kako bismo mogli procijeniti maksimalne moguće magnitude potresa, potrebno je razumjeti geodinamiku promatranog područja, odnosno razumjeti rasjedne sustave na kojima se ti potresi mogu generirati. Tako je cilj ovog rada analizirati prostornu pojavnost potresa navedene zagrebačke serije, odnosno detektirati i modelirati tada aktivirane rasjede. Rasjedi su modelirani na osnovu preliminarno određenih žarišta potresa koji su se dogodili do 14. travnja u radu Markušić i sur. (2020), no u ovome radu će se razmotriti duži niz podataka, odnosno naknadni potresi do 7. lipnja 2020. godine. Cilj je uočiti jesu li se u kasnijoj fazi aktivirali neki drugi rasjedi ili neki manji fragmenti. Treba imati na umu da je u trenutku analiza naknadnih potresa za ovaj rad korišten preliminarni katalog potresa u kojemu još uvijek može doći do promjena. Rasjedi modelirani u ovom radu usporedit će se sa žarišnim mehanizmima glavnog i najjačeg naknadnog potresa te će se rezultati usporediti s dosadašnjim.

Slično kao i za seriju potresa kraj Zagreba iz 2020., razmatrat će se i geodinamika šireg pokupskog područja pa će se tako modelirati rasjedi aktivirani drugom potresnom serijom, koja je započela 28. prosinca iste godine potresom s epicentrom kraj Petrinje. U ovom slučaju će se rasjedi modelirati na osnovu žarišta potresa u periodu između 28. prosinca 2020. i 14. veljače 2021. iz preliminarnog, i još uvijek ne sasvim potpunog, kataloga. Dobiveni parametri ovako modeliranih rasjednih ravnina usporedit će se s izračunatim žarišnim mehanizmom jačih potresa.

Nadalje, razmotrit će se vremenske karakteristike ovih serija potresa, odnosno

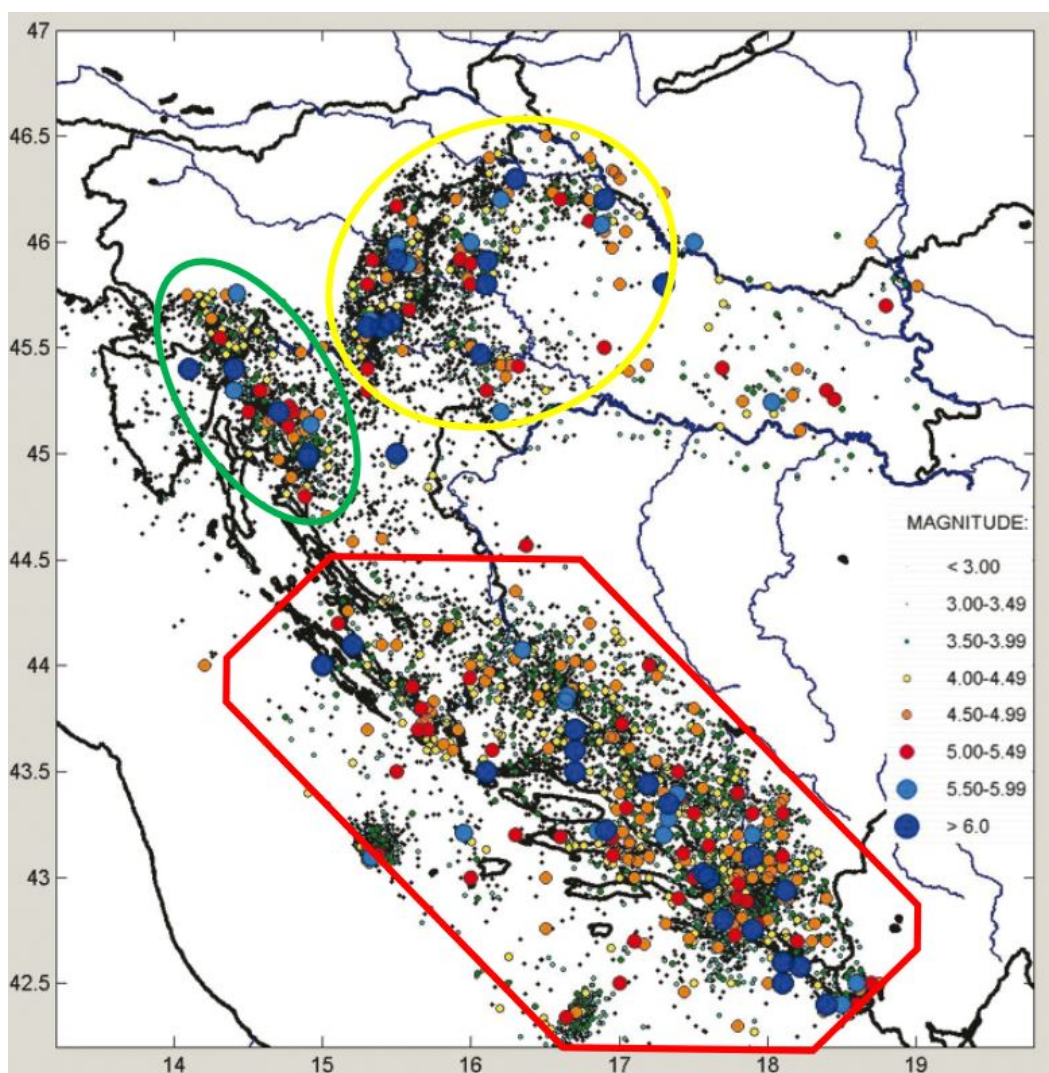


dnevni broj naknadnih potresa u ovisnosti o broju dana od glavnog potresa, magnitude tih događaja i dr.

Konačni cilj ovog rada je dati detaljniju analizu zagrebačkog i pokupskog seizmičkog područja te bolji uvid u Zagrebačku seriju potresa (započetu u ožujku 2020.), kao i Petrinjsku seriju potresa (započetu u prosincu 2020.), kako bi se doprinijelo daljnjoj procjeni seizmičkog hazarda ovih područja.

## 2. Teorijska podloga seizmičnosti sjeverozapadnog dijela Hrvatske

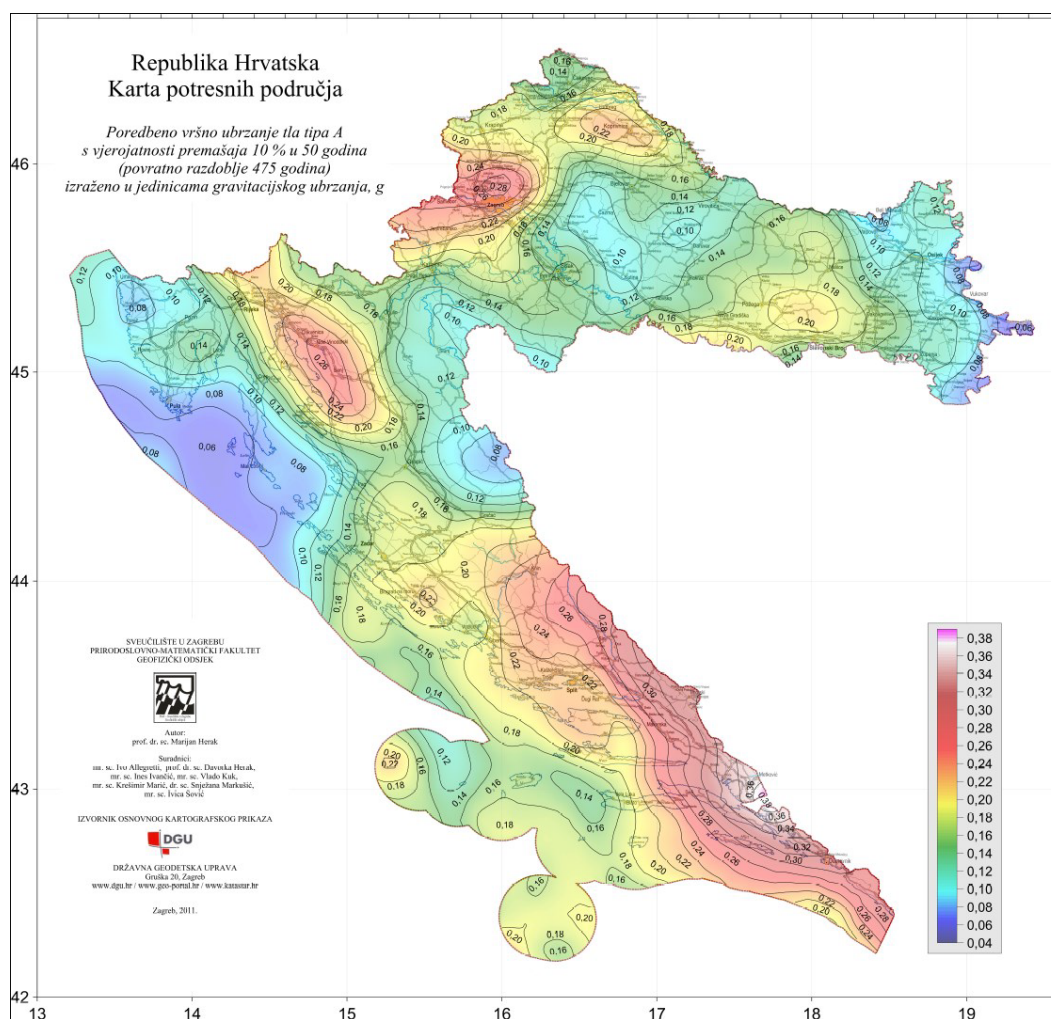
Prema podacima o potresima iz *Hrvatskog kataloga potresa* mogu se uočiti tri veće regije u kojima je seizmička aktivnost pojačana u odnosu na ostala područja (Slika 2.1). Na slici se može primijetiti da se šire zagrebačko i pokupsko područje nalazi u seizmički aktivnijem području (sjeverozapadna regija Hrvatske uokvirena žutom bojom).



Slika 2.1. Epicentri svih potresa u Hrvatskoj iz Hrvatskog kataloga potresa u periodu do 2004. godine (Markušić, 2008). Na karti su naglašene regije značajnije seizmičke aktivnosti u sjeverozapadnom dijelu Hrvatske (žuto), jugoistočnom dijelu Hrvatske (crveno) te područje Hrvatskog primorja i Kvarnera (zeleno).

Dobro poznavanje seizmičnosti Hrvatske je nužan preduvjet za bolju procjenu potresne opasnosti, odnosno seizmičkog hazarda. Uobičajeno je da se seizmički hazard izražava preko ubrzanja tla tijekom potresa, koja će se s unaprijed odabranom vjerojatnosti premašiti tijekom nekog referentnog razdoblja. Povratno razdoblje definirano je kao prosječni interval između dva premašivanja  $a_g$ , gdje je  $a_g$  maksimalno horizontalno

ubrzanje tla. Prilikom određivanja povratnog razdoblja se ne implicira na periodičnost. Pojedini intervali između događaja u kojem se premaši zadana akceleracija ili neki drugi parametar mogu biti duži i kraći od zadanog razdoblja.

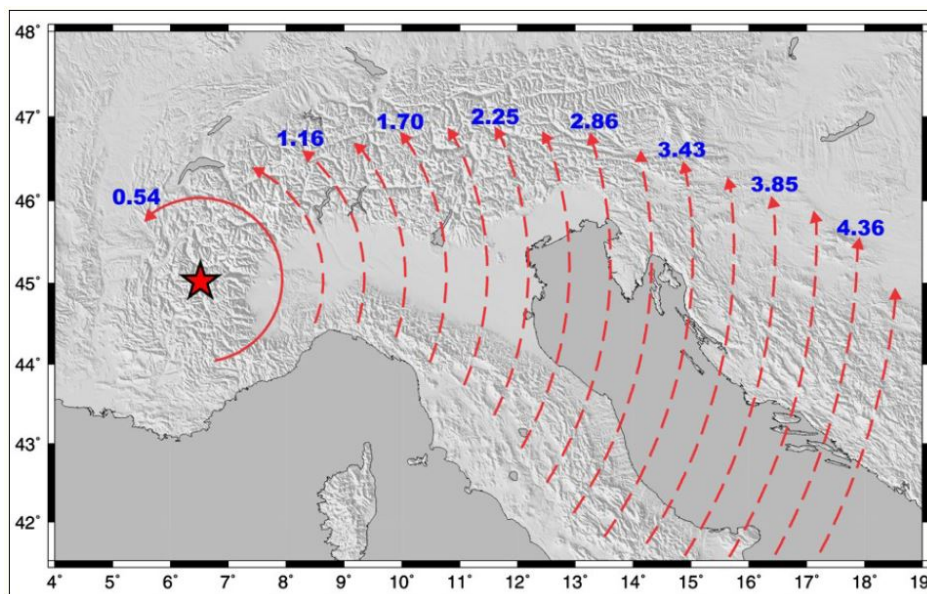


Slika 2.2. Karta seizmičkog hazarda za područje Hrvatske na razini osnovne stijene uz povratno razdoblje 475 godina (Herak i sur., 2011).

Na slici 2.2 prikazana je karta potresne opasnosti za područje Hrvatske gdje prikazane proračunate vrijednosti parametra  $a_g$  vrijede na razini osnovne stijene. Prema Eurokodu-8, zbirici normi za protupotresnu gradnju, osnovna stijena se određuje kao sredstvo u kojem je prosječna brzina S-vala u gornjih 30 m tla  $V_{S30} \geq 800$  m/s. Drugim riječima, u procjeni seizmičkog hazarda ovdje nisu uzeti u obzir površinski slojevi koji ubrzanje tla mogu znatno amplificirati. Gore spomenute seizmički aktivnije regije, kao i šire zagrebačko i pokupsko područje, možemo raspoznati i na ovoj slici (crveno, žuto i žuto-zeleno). U tim područjima su veća ubrzanja osnovne stijene s vjerojatnošću premašaja od 10% u 50 godina (za povratno razdoblje od 475 godina).

Potresi na ovim područjima nastaju zbog napetosti u gornjim dijelovima Zemljine kore, a te napetosti posljedica su konvergencije (kompresije) Jadranske mikroploče prema velikoj Euroazijskoj ploči. Mala Jadranska ploča rotira u suprotnom smjeru od kazaljke na satu s Eulerovim polom na području zapadnih Alpi (Slika 2.3). Brzina konvergencije te ploče je oko 0.54 mm/god bliže polu rotacije, a raste do otprilike 4.5

mm/god prema jugu Hrvatske (Weber i sur., 2010).



Slika 2.3. Eulerov pol rotacije Jadranske mikroploče iz Dasović i sur. (2020) (prema Weber i sur. (2010)). Rotacija (crvene isprekidane linije) oko pola označenog zvjezdicom odvija se suprotno od kazaljke na satu. Od pola prema jugu Hrvatske raste brzina konvergencije (rotacije) prema stabilnoj Europi otprilike 0.54 - 4.5 mm/god.

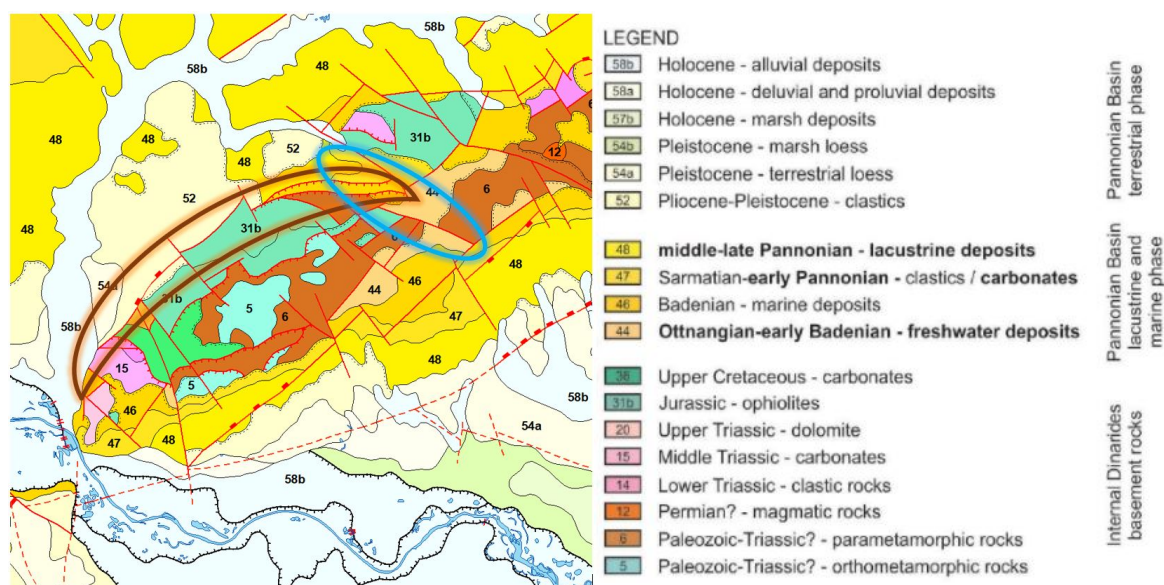


### 3. Zagrebački rasjedni sustav

#### 3.1. Geološki pregled zagrebačke seizmogene zone

Središnjim dijelom šireg zagrebačkog područja dominira planina Medvednica. Ona je dio Unutarnjih Dinarida te se proteže u smjeru SI-JZ. Nalazi se na vrlo zanimljivoj granici tri geotektonski različite regije: Panonski bazen na istoku, Alpe na sjeverozapadu te Dinaridi na jugu.

S obzirom da se područje Medvednice nalazi na području različitih subdukcijskih polariteta (Schmid i sur., 2008) – utjecaj gornje Jadranske ploče na Alpe i utjecaj donjeg dijela Jadranske ploče na Dinaride – rasjedni sustavi sjeverozapadne Hrvatske (pa tako i Medvednice) su dosta kompleksni. Ovaj kompleksni aktivni tektonski režim u tranzicijskom području jugoistočnih Alpi, sjeverozapadnih Dinarida i Tisza Mega jedinice Panonskog bazena rezultat su interakcija u gornjem tektonskom bloku kore formiranog tijekom mezozojske i kenozojske evolucije ovog područja (Van Gelder i sur., 2015). Upravo zbog kontakta ove dvije regije, vjeruje se da je područje Medvednice ispucalo i prožeto mnogim, većim ili manjim, rasjedima i strukturama (fragmentima). Današnja pozicija i trend Medvednice objašnjava se pomakom prema istoku (engl. *tectonic escape*) i rotacijom tektonskog bloka za otprilike 130° u smjeru kazaljke na satu, odnosno kompresijom istog na Medvednicu i okolne planine u periodu od kasnog paleogena pa do ranog neogena (Tomljenović i sur. (2008); Márton i sur. (2002)).



Slika 3.1. Lijevo: geološka karta (ustupio HGI) M 1:300000 izrezana za Medvednicu i okolno područje. Smeđe je uokviren sustav Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda, a plavo je uokviren sustav Kašinskog rasjeda. Desno: Legenda geoloških oznaka (Kovačić i sur., 2016).

Geološka struktura Medvednice je vrlo zanimljiva i kompleksna (Slika 3.1). Na slici su s 5 i 6 prikazane stare paleozojske stijene, tj. stijene metamornog kompleksa jezgre Medvednice (Kovačić i sur., 2016). Te starije paleozojske stijene na površini izdajuju

pri vrhu Medvednice i prate njen hrbat. Idući prema nižim dijelovima, starije i čvršće paleozojske stijene sežu u dubinu, a prekrivaju ih mlađe, sedimentne i magmatske stijene mezozojske i neogenske starosti. Rubni dijelovi Medvednice, prema dolinama Krapine na sjeveru i Save na jugu, prekriveni su najmlađim rastresitim pleistocenskim i aluvijalnim naslagama.

Zbog kompleksne i dualne tektonske povijesti, Medvednica je prožeta brojnim (većinom reversnim) rasjedima od kojih je svakako najznačajniji, najveći i još uvijek aktivan sustav Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda (na geološkoj karti uokviren smeđe). Na slici su tirkiznom bojom i oznakom *31b* označene jurske ofiolitne naslage debljine stotinjak metara, ispod kojih se nalazi jezgra paleozojskih čvrstih stijena. Ofiolitne naslage su sastavljene od raznovrsnih sedimentnih stijena i vulkanita koji su dovoljno elastični da ne pucaju prilikom rasjednih deformacija čime bi se moglo objasniti postojanje isključivo slijepih rasjeda, tj. onih koji nemaju površinske manifestacije.

Brojevima *44*, *46*, *47* i *48* označene su puno mlađe, miocenske naslage čiji je postanak vezan uz formiranje i razvoj Panonskog bazena, a sastavljene su uglavnom od raznovrsnih klastičnih sedimenata i lapora, a manjim dijelom od vapnenaca. Te naslage bliže jezgri Medvednice na površini isklinjavaju, a debljina im postupno raste prema rubnim dijelovima gore gdje doseže i nekoliko stotina metara. Miocenske naslage u najnižim rubnim područjima Medvednice prekrivene su najmlađim kvartarnim sedimentima pleistocenske (broj *52*) i holocenske starosti (brojevi *54a* i *58b*).

Na slici je plavo označeno šire područje tzv. Kašinskog rasjeda. U ovom području jasno je vidljiv diskontinuitet površinskog rasprostiranja paleozojskih stijena koji upućuje na desni rasjedni pomak.

Zagreb se nalazi u podnožju, s južne strane, Medvednice kroz koju se proteže Žumberak-Medvednica-Kalnik rasjedna zona pružanja JZ-SI. Tektonski najaktivnija regija je u centralnom i jugozapadnom dijelu planine.

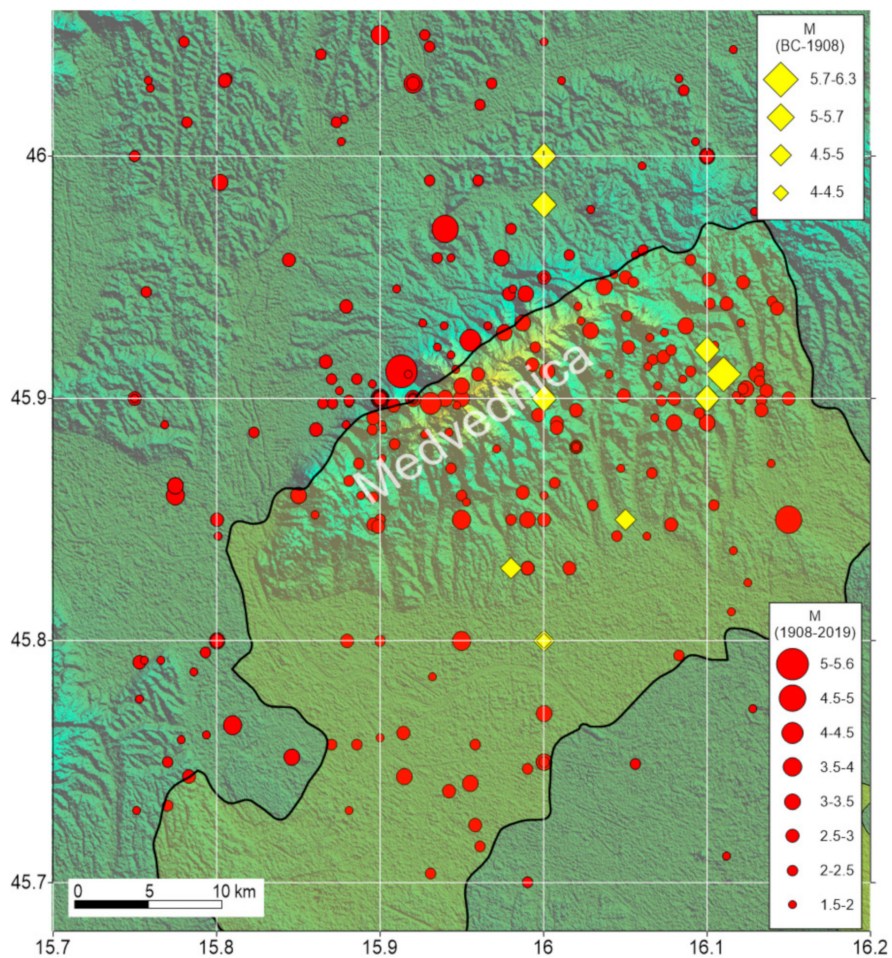
### ***3.2. Seizmička povijest šireg zagrebačkog područja***

U području Zagreba i okolice kroz povijest se dogodio velik broj potresa (Slika 3.2), no njihovo sistematsko zapisivanje započelo je tek nakon 1872. godine. Prema makroseizmičkim istraživanjima hrvatskog geofizičara Josipa Mokrovića, između 1502. i 1883. godine u širem zagrebačkom području se osjetio 661 potres.

Potica na sistematsko izučavanje potresa, označio je *Veliki zagrebački potres* 9. studenoga 1880. (u 7:03 UTC), koji je s magnitudom 6.3 ujedno i najjači dokumentirani potres u zagrebačkom epicentralnom području (Herak i sur., 1996). Hipocentar ovog potresa nalazio se u Medvednici, kraj mjesta Kašina i Planina. Prema povijesnim spisima, u tadašnjem Zagrebu živjelo je oko 30000 ljudi te je bilo oko 2500 građevina. U ovom potresu poginulo je dvoje ljudi, a oštećeno približno 1400 građevina (Torbar, 1882).

Potres magnitude 4.6 dogodio se 17. prosinca 1901. u blizini Šestina. Na skoro istoj lokaciji kao potres iz 1880. godine, a još dva vrlo jaka potresa su se dogodila 17. prosinca 1905. i 2. siječnja 1906. godine.

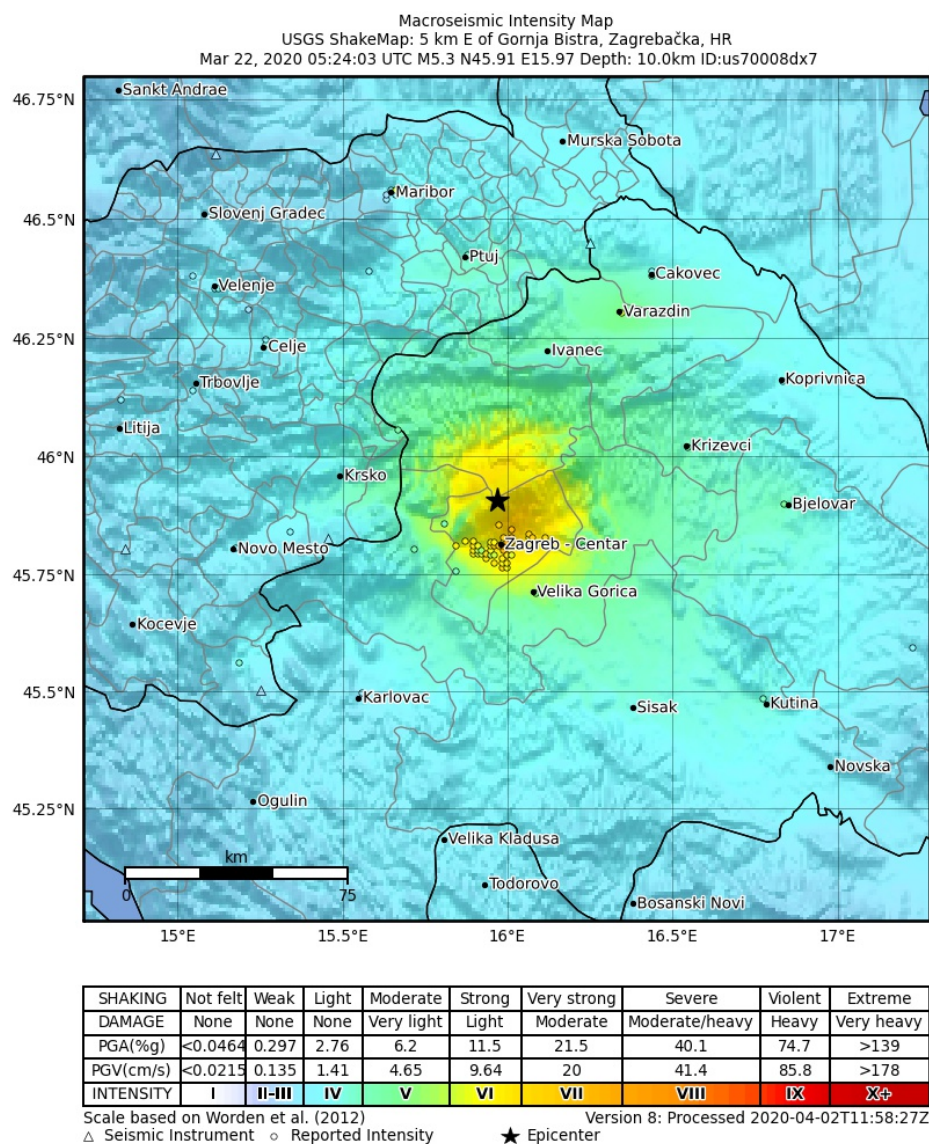
Vrlo jaki potres, magnitude 5.0, dogodio se 3. rujna 1990. s epicentrom kraj Kraljevog Vrha te je on posljednji jaki potres u ovom području prije potresa iz 2020. godine.



Slika 3.2. Prostorna razdioba potresa šireg zagrebačkog epicentralnog područja od vremena BC do 2019. (nadopunjena verzija Hrvatskog kataloga potresa, prvi put opisana u Herak i sur. (1996)). Žuto je naglašen prostor urbaniziranog Zagreba.

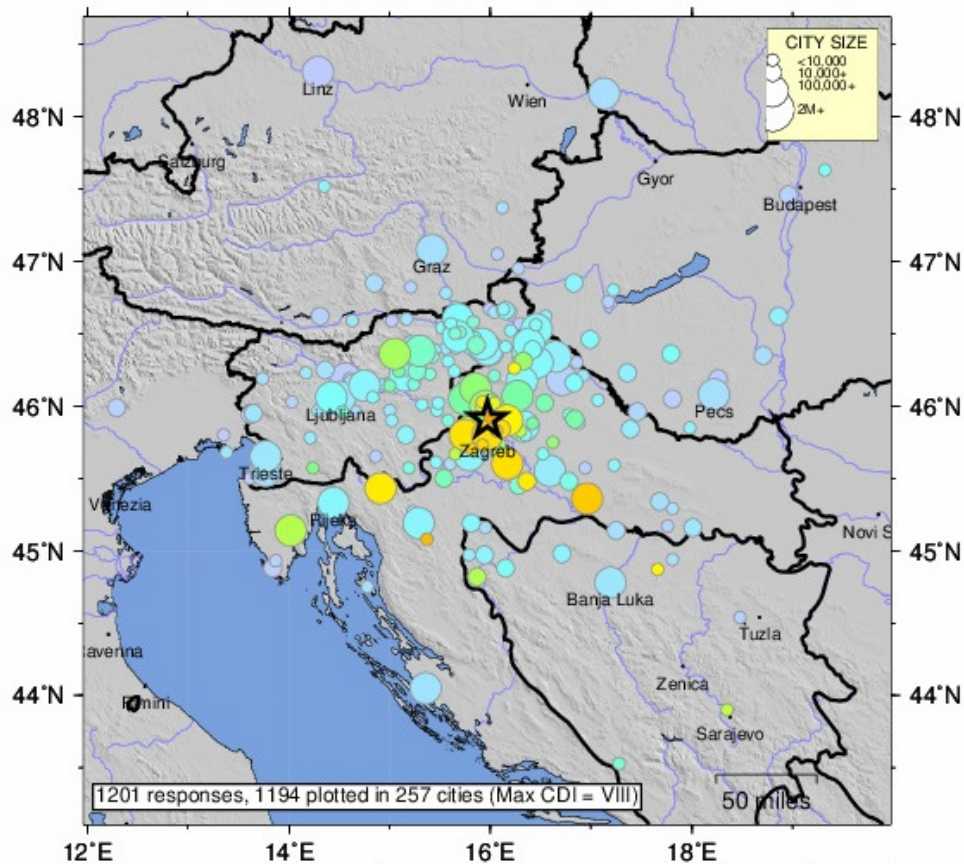
### 3.3. Zagrebački potres 22. ožujka 2020.

U nedjelju 22. ožujka 2020. godine, Zagreb i okolice je u 6:24 prema lokalnom vremenu probudio snažan potres. Potres magnitude  $M_L=5.3$  dogodio se s epicentrom u blizini Markuševca i Čučerja na dubini od skoro 9 km. Najveći intenzitet ovog potresa bio je VII-VIII °MSK (Slika 3.3), a osjetio se po cijeloj Hrvatskoj, ali i u Sloveniji, Italiji, Austriji, Češkoj, Bosni i Hercegovini te u Srbiji, tj. osjetio se na epicentralnim udaljenostima većim i od 1000 km (Slika 3.4).



Slika 3.3. Karta intenziteta potresa (USGS, 2020).





Slika 3.4. Karta intenziteta potresa s naznačenim gradovima u kojima se potres osjetio (USGS, 2020).

Drugi najjači, naknadni, potres magnitude  $M_L=4.9$  dogodio se nedugo nakon glavnog potresa, u 7:01 prema lokalnom vremenu, dok se treći najjači naknadni potres magnitude  $M_L=3.5$  dogodio u 7:41. U prvih 24 sata od glavnog potresa, dogodilo se 100 naknadnih potresa magnitude preko 1.5.

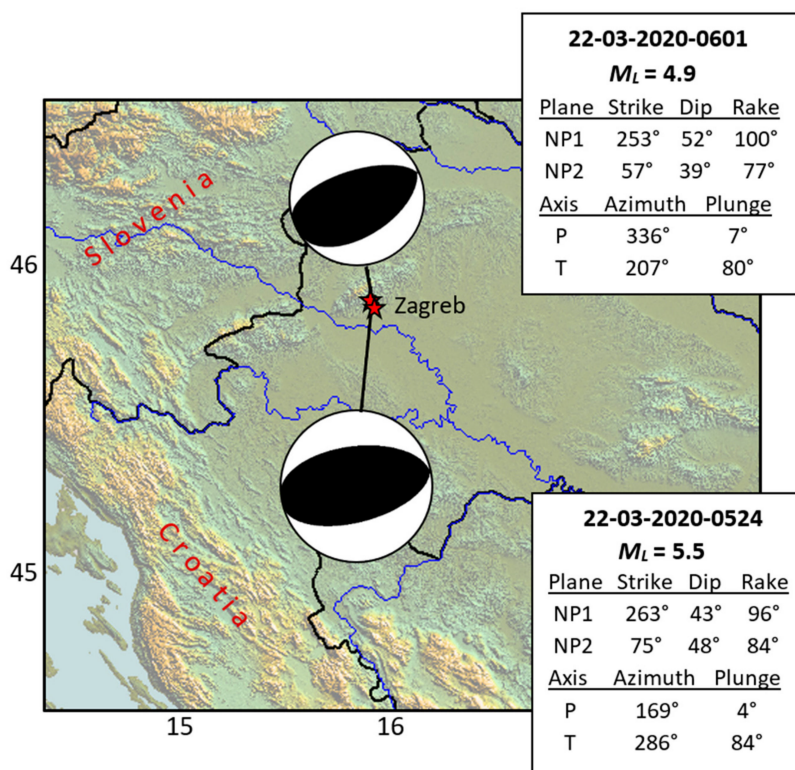
Prema opažanjima koseizmičkih deformacija *Sentinel-1* misije od 17. ožujka i 23. ožujka 2020. godine, opaženo je da je došlo do uzdizanja epicentralnog područja, površine približno  $20 \text{ km}^2$ , za oko 3 cm (Markušić i sur., 2020).

### 3.3.1. Žarišni mehanizam

Razmatranjem predznaka prvih nailazaka primarnih P seizmičkih valova na seizmološke postaje, moguće je, uz model dvostrukog para sila u žarišu, odrediti žarišni mehanizam potresa. Kako je za ovu metodu potrebno jasno razaznati prvi nailazak P vala (a tako i njegov predznak), određivanje žarišnog mehanizma moguće je, za sada, samo za jače potrese, tj. za one kojima se njihov zapis na seizmogramu (a osobito pomak prvog nailaska P vala) jasno može razaznati u odnosu na šum.

Rezultat računa žarišnog mehanizma su dvije konjugirane, međusobno okomite, rasjedne plohe prikazane na žarišnoj sferi, tj. obično na njezinoj donjoj hemisferi (Shearer, 2009). Samo na osnovu poznavanja predznaka prvih nailazaka P valova nije moguće odrediti na kojem od dobivena dva rasjeda se potres stvarno dogodio. Za određivanje pravog rasjeda potrebno je poznavati geologiju prostora, znati prostornu

razdiobu hipocentara potresa iz promatrane serije ili upotrijebiti neke druge dodatne metode.



Slika 3.5. Žarišni mehanizam izračunat za glavni i najjači naknadni potres serije potresa kraj Zagreba iz ožujka 2020 (Markušić i sur., 2020). Žarišne sfere prikazane su u stereografskoj projekciji.

Žarišni mehanizmi u Markušić i sur. (2020) izračunati su za glavni i najjači naknadni potres (Slika 3.5). Za oba ova potresa žarišni mehanizam ukazuje da su se dogodili na reversnim rasjedima. Jedna rasjedna ravnina glavnog potresa nagiba  $43^\circ$  nagnuta je prema jug-jugoistoku, a druga ravnina nagiba  $48^\circ$  nagnuta je prema sjever-sjeverozapadu. Najjači naknadni potres dogodio se na reversnom rasjedu nagiba  $52^\circ$  prema jug-jugoistoku ili na rasjedu nagiba  $39^\circ$  prema sjever-sjeverozapadu.

Izračunato je i da je os najvećeg tektonskog tlaka  $P$  bila gotovo horizontalna i u smjeru JJI-SSZ, dok je os najvećeg tektonskog vlaka  $T$  bila skoro vertikalna.

S obzirom na geologiju Medvednice, može se zaključiti da su se oba ova potresa dogodila na rasjedu/rasjedima nagnutima prema jug-jugoistoku. U ovome radu će se ova tvrdnja potkrijepiti i analizom prostorne razdiobe žarišta potresa ove serije.

### 3.3.2. Opis štete i karakteristike građevina

Zagrebački potres iz ožujka 2020. prekinuo je dugogodišnji seizmički mir na ovim područjima, uzrokovao je mnogo štete (puno više nego bi potres ove jačine trebao) te za sobom odnio jedan ljudski život.

U potresu je oštećeno dosta građevina od povijesnog i kulturnog značenja (uključujući i Zagrebačku katedralu, Rektorat i Banske dvore) te preko 26000 kuća, zgrada i spomenika od kojih je oko 1900 ostalo neupotrebljivo (NASA (2020); Ministarstvo unutarnjih poslova republike Hrvatske (2020)).

Većina građevina s 3-5 katova, sagrađenih u doba Austro-Ugarske monarhije pa do 1920. godine, u centru grada pretrpila je velike štete ili su potpuno uništene. Zgrade iz ovog doba uglavnom su bile građene od drvenih elemenata, dok je tek gradnja nakon 1920. godine ojačavana betonom. Zgrade izgrađene prije 1945. pružale su samo inicijalni seizmički otpor, tj. zbog vođenja brige o otporu vjetru u izgradnji, zgrade su mogle podnijeti samo 5% relevantnog vršnog ubrzanja tla (PGA). Prema Herak i sur. (2011) za zagrebačko područje, na razini vjerojatnosti premašaja od 10% u 50 godina s povratnim razdobljem od 475 godina, relevantni PGA je i do 0.28 *g*. U gradnji između 1945. i 1964. godine uzimala se u obzir otpornost na potres, ali su se koristile vrlo pojednostavljene metode - otpor na horizontalnu silu na vrhu zgrade. I s time se u dizajnu građevine u obzir uzimalo samo 10% relevantnog PGA.

Prekretnicu u gradnji označio je potres  $M_W$  6.2 u Skopju 1963. godine koji je odnio 1070 života, ozlijedio oko 3300 ljudi, a 76% stanovnika tog područja ostavio bez krova nad glavom (Petrovski, 2004). Ova velika katastrofa povećala je svjesnost da potresi nisu samo znanstveni problem, nego i ekonomski, tehnološki, politički te socijalni problem na nacionalnoj, ali i internacionalnoj razini.

Godine 1964. Federalna Republika Jugoslavija izdala je *Pravilnik o privremenim tehničkim propisima za građenje u seizmičkim područjima*, dokument koji je zahtijevao gradnju vertikalnih ili horizontalnih potpornih elemenata, ali ni tada generalni potresni otpor nije bio dovoljan. Pravilnik o protupotresnoj izgradnji iz 1964. bio je zamijenjen *Pravilnikom o tehničkim normativima za izgradnju objekata visokogradnje u seizmičkim područjima* iz 1981., koji je osigurao standarde gradnje koja bi pružala nešto bolju otpornost u slučaju potresa. Pri gradnji u periodu 1964.-1998. u obzir je uzeto 30-50% relevantnog PGA, dok je 70-100% relevantnog PGA uzeto u obzir pri izgradnji u periodu 1998.-2013. godine. Godine 2013. su dotadašnji pravilnici zamijenjeni Eurokod-8 regulativom koja je osigurala vrlo visoku otpornost građevina na trešnju tla (Code, 2005).

Građevine izgrađene nakon 1963. pretrpile su puno manje štete nego one izgrađene do 1920. ili čak 1945., što je utvrđeno prilikom terenskih obilazaka strukturnih inženjera.

Kako bi se dobio što bolji uvid u intenzitet potresa, Grünthal (1998) je stupnjevao razinu oštećenja. Iako ne baš sasvim objektivna metoda, 5 stupnjeva štete (DG, engl. *damage grade*) trebali bi aproksimativno opisati razinu oštećenja kao:

- DG 1: neznatna do slaba šteta
- DG 2: osrednje šteta
- DG 3: znatna do teška šteta
- DG 4: vrlo teška šteta
- DG 5: potpuno uništeno.

Ovako definirani DG donose detaljan opis štete te su najadekvatniji alat za inspekciju i procjenu zgrada oštećenih u potresu.

Kao što je već spomenuto, neojačane građevine iz perioda do 1920. (ili čak do 1945.) oštećene su puno više od zgrada građenih s ojačanim betonom. Usporedbe radi, sve građevine sa DG 4 ili DG 5 su iz perioda gradnje do 1920. (ili 1945. ako su neojačane), dok su kasnije građene zgrade uglavnom DG 1 ili DG 2. Većina nastale štete posljedica je urušavanja dimnjaka, što je pak indikator stupnja intenziteta VII prema MSK ljestvici. Potres iz ožujka 2020. bio je u centru grada intenziteta VII °MSK, ali i u velikom dijelu Zagreba.

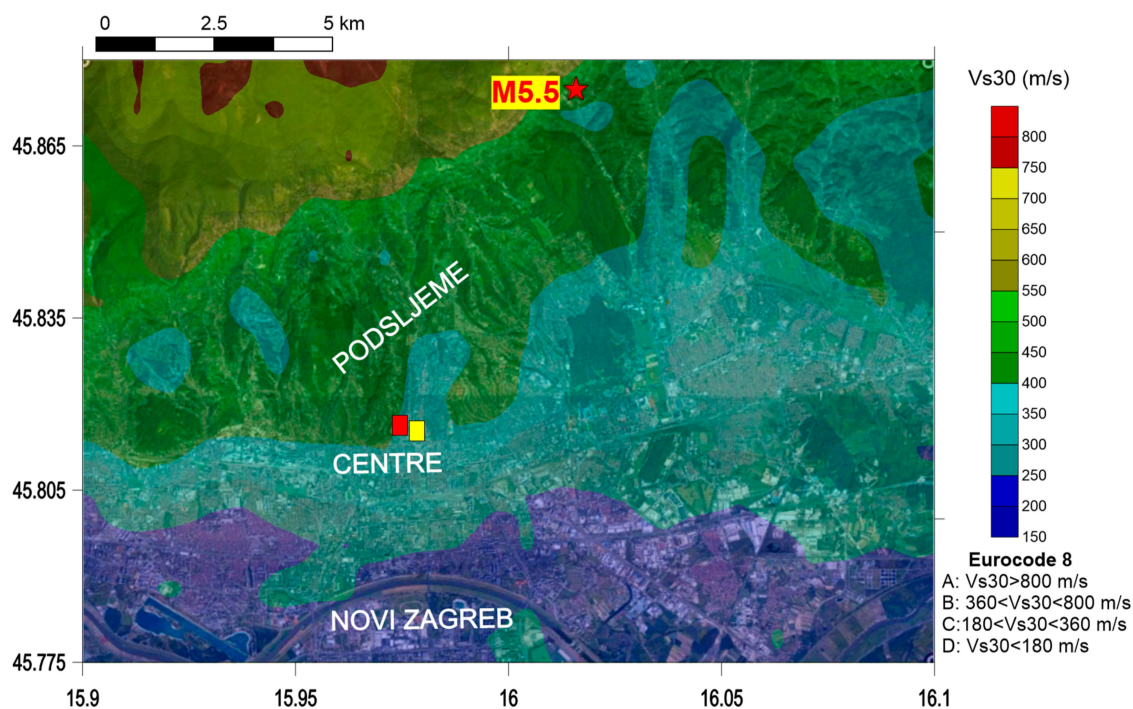
Uzimajući u obzir vremenski period i materijal gradnje, pregledane su i zgrade u neposrednoj blizini epicentra te se na temelju dostupnih podataka došlo do glavnog, i logičnog zaključka, da se uvažavanjem mjera o protupotresnoj gradnji značajno smanjuje moguća šteta na građevini.

Jako oštećene zgrade moraju se ili srušiti ili ojačati. Retrofitting je građevinski proces ojačavanja teško oštećene zgrade te on ima smisla samo za građevine od značajnog povijesnog i kulturnog značenja jer je inače sam proces financijski neisplativ. Procijenjeno je da bi trošak obnove zgrada mogao biti oko 6 milijardi USD, a prioritet, dakako, imaju one zgrade koje predstavljaju visok rizik za ljudske živote i imovinu.

### ***3.3.3. Amplifikacija i lokalni uvjeti tla***

Intenzitet potresa na nekom području ovisi o karakteristikama izvora, mediju kroz koji seizmički valovi putuju (atenuacija) te o lokalnim uvjetima tla. Najvažniji faktori koji utječu na efekte trešnje tla su dakako magnituda potresa i udaljenost od epicentra. Lokalni uvjeti tla mogu značajno amplificirati ili deamplificirati razinu trešnje tla ovisno o topografiji, sedimentnim naslagama i ostalim geološkim karakteristikama. Ovi čimbenici mogu modificirati, na svim frekvencijama/periodima tla, amplitude valova na površini u odnosu na amplitudu na osnovnoj stijeni (Kramer, 1996). Različita tla imaju različiti odgovor na seizmički događaj. Ovisnost amplifikacije seizmičkih valova u nekom tlu o razini gibanja tla može biti linearna, ali i nelinearna, kada se meko tlo zapravo ponaša kao prigušivač seizmičke energije pri vrlo jakoj trešnji (Beresnev i Wen, 1996).

Nakon zagrebačkog potresa 2020. godine, u radu Markušić i sur. (2020) razmatrala se šteta i lokalni učinci tla kako bi se procijenila prostorna distribucija amplifikacije seizmičkih valova. Pri procjeni se koristila razdioba prosječnih brzina S valova u prvih 30 m, aproksimiranih na osnovu nagiba topografije (Slika 3.6). Na slici 3.6 bojama su označena područja određenih intervala brzina kojima se prema normi Code (2005) definiraju osnovni tipovi tla (Tablica 3.1).



Slika 3.6. Prostorna razdioba  $V_{S30}$  aproksimirana na temelju nagiba topografije za šire zagrebačko područje. Žuto je naznačena Zagrebačka katedrala, crveno je zgrada Banskih dvora. Zvezdicom je označena lokacija glavnog potresa s magnitudom koja je bila prema tadašnjim preliminarnim podacima (materijal iz članka Markušić i sur. (2020) preuzet sa stranica USGS-a).

Tablica 3.1. Tipovi tla prema Eurokodu-8.

Tip tla	$V_{S30}$ [m/s]	Opis tla
A	$\geq 800$	Stijena ili druga geološka formacija uključujući najmanje 5 m slabijeg materijala na površini.
B	360 - 800	Slojevi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo čvrste gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara, karakterizirani stupnjevitim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom.
C	180 - 360	Slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline, debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.
D	$\leq 100$	Rastresiti do srednje zbijeni nevezani sedimenti (sa ili bez mekih kohezivnih slojeva) ili predominantno mekano do čvrsto kohezivno tlo.
E	-	Tlo se na površini sastoji od aluvijalnih nanosa s vrijednosti $V_S$ prema tipu C ili D i debljinom između 5 i 20 m, ispod kojeg je krući materijal s $V_{S30} \geq 800$ m/s.

Na slici 3.6 zanimljivo je primjetiti granicu između plavog (tlo tipa C) i zelenog područja (tlo tipa B), odnosno vidljiva su "isprepletana" područja - područje tipa

B okruženo područjem tipa C i obrnuto. Uzrok tome vrlo je vjerojatno strukturna promjena tla.

U članku Markušić i sur. (2020) korišten je nelinearni amplifikacijski model iz Stanko i sur. (2019) baziran na parametru  $V_{S30}$  i intenzitetu upadnog gibanja ( $PGA_{ROCK}$  - vršno ubrzanje tla na osnovnoj stijeni). Vrijednosti  $PGA_{ROCK}$  za ovaj potres procijenjene su uz pomoć teorije o nasumičnoj vibraciji (engl. *random vibration theory* ili RVT) i teorije o seizmičkom izvoru. Upadno gibanje u metodi baziranoj na RVT obično je definirano Bruneovim  $\omega^2$  stohastičkim modelom točkastog izvora (Brune, 1970). Za potrebe modela su u slučaju ovog potresa uzeti sljedeći parametri:

- Dubina žarišta: 10 km
- Prosječna vrijednost brzine  $S$  valova u kori: 3.5 km/s
- Gustoća kore: 2800 kg/m<sup>2</sup>.

Iz Dasović (2015) preuzeta je frekvencijski ovisna jednadžba za račun atenuacije

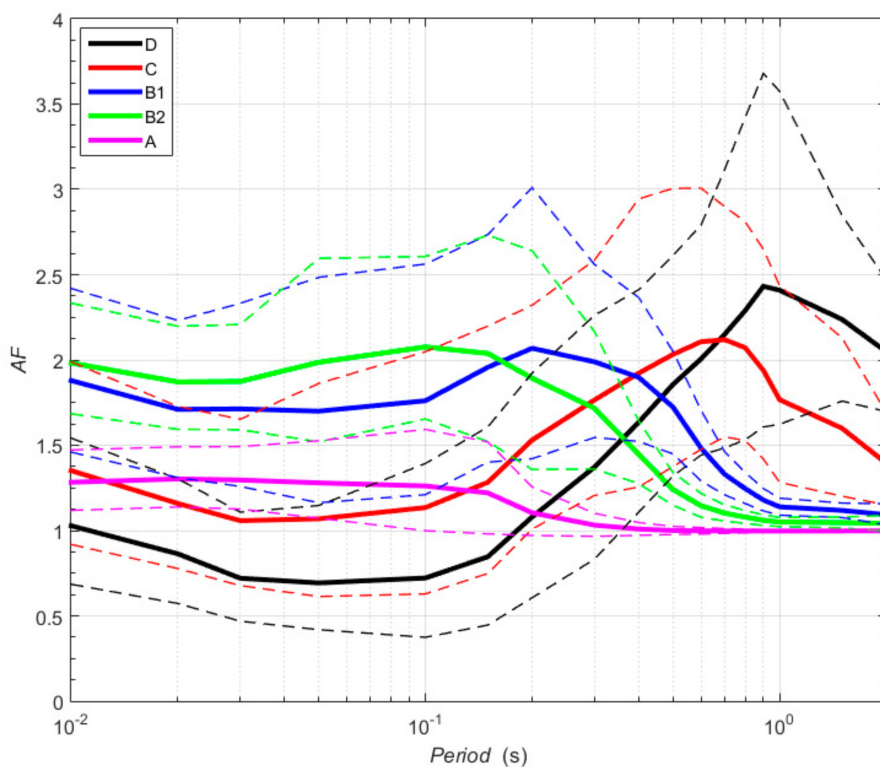
$$Q_c(f) = 78f_c^{0.69},$$

a iz Stanko (2018) preuzet je parametar  $\kappa_0 = 0.028$  s. Za lokacije vrlo blizu epicentru, do 5 km, izračunat je  $PGA_{ROCK}$  u rasponu 0.159 - 0.185  $g$ . Na osnovu ovih rezultata, procijenjen je medijan lokalnog amplifikacijskog faktora korištenjem modela (Stanko i sur., 2019) za  $V_{S30}$  kategorije tla prema Eurokodu-8 (Slika 3.7). Za tlo tipa B koristile su se dvije potkategorije: B1 za  $V_{S30}$  u rasponu 360 - 600 m/s te B2 za  $V_{S30}$  u rasponu 600 - 800 m/s. Profili s relativno plitkim površinskim slojevima podložnim tvrdoj osnovnoj stijeni mogu imati vrlo visok kontrast impedancija što može dovesti do jakih rezonantnih efekata, a što je i slučaj u području zagrebačke podsljemenske zone. Dominanti period (ili frekvencija) gibanja tla i prirodan period (ili frekvencija) tla kritični su zbog mogućih rezonantnih efekata tijekom trešnje zbog kojih može doći do velike štete. Stoga je vrlo važno znati i vlastitu frekvenciju građevina (koja ovisi značajno o visini iste) kako bi se mogla provoditi planska gradnja u cilju izbjegavanja rezonantnih efekata. Prema  $V_{S30}$  kategorizaciji, u području podsljemenske zone nalazi se tlo tipa B1, a na području centra i Novog Zagreba tlo je tipa C. Na slici 3.7 vidi se da je amplifikacija najznačajnija u periodu 0.1 - 0.5 s za tlo tipa B1, dok je za tlo tipa C amplifikacija najznačajnija u periodu 0.4 - 0.9 s. Prema empirijskoj relaciji ovisnosti svojstvenog perioda građevine o njezinoj visini iz Gallipoli i sur. (2010)

$$T = 0.016H,$$

do rezonancije sa građevinama, u podsljemenskoj zoni bi došlo za građevine (obiteljske kuće) od 3 ili 4 kata, a u području centra i Novog Zagreba za građevine s 4 - 15 katova.





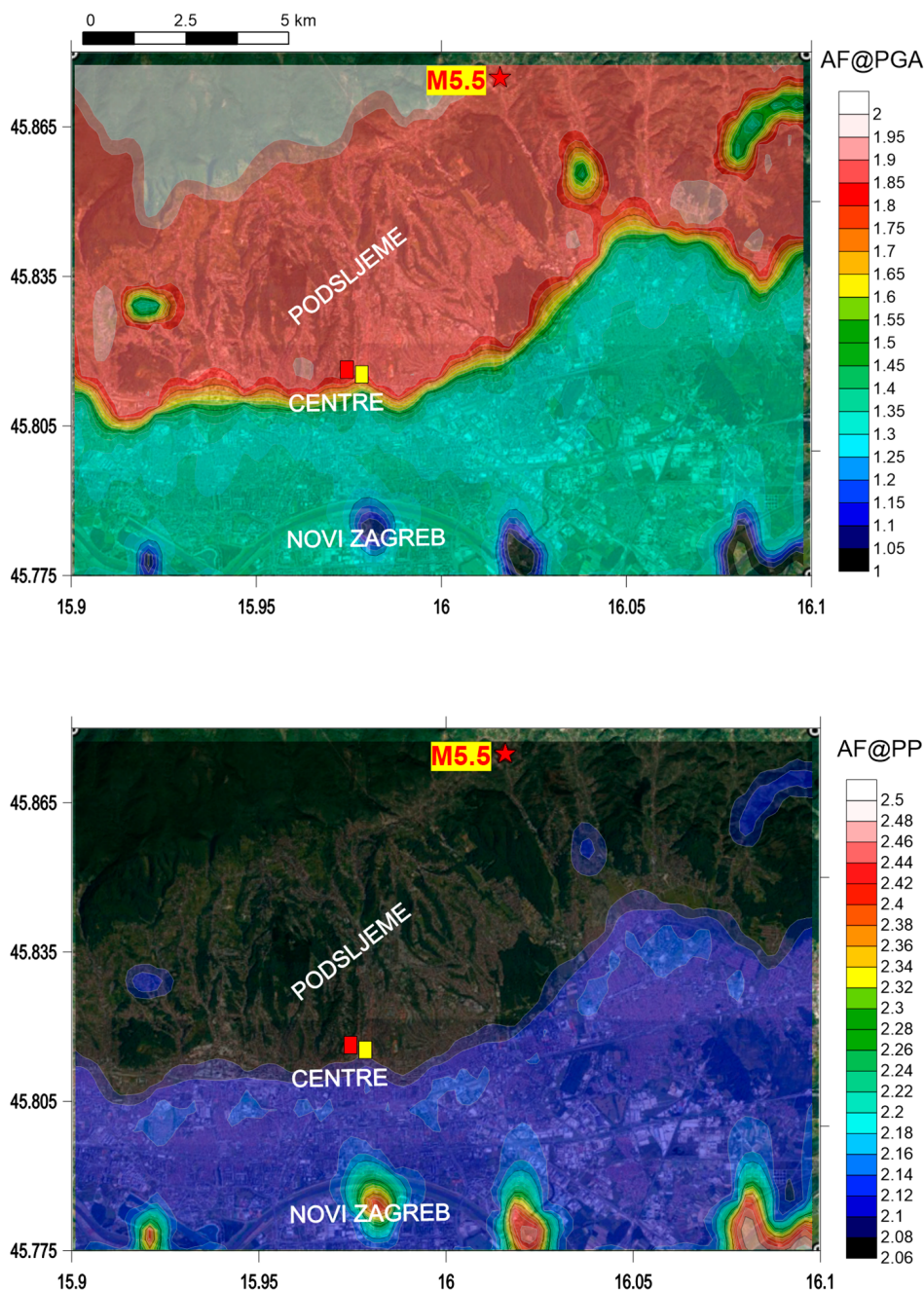
Slika 3.7. Medijan lokalnog amplifikacijskog faktora za  $V_{S30}$  klase tla bazirane na Eurokodu-8 sa  $\pm 1$  standardnom devijacijom (isprekidane linije) za  $PGA_{ROCK}$  u rasponu 0.159 - 0.185  $g$  (Markušić i sur., 2020).

Efekti potresa M5.3 iz ožujka 2020. ipak su bili slični za sve građevine neovisno o njihovoj visini, ali pri jačim potresima (npr. magnitude preko 7) vidjele bi se razlike u utjecaju potresa. Niske obiteljske, betonske građevine kraćih perioda ( $T < 0.2$  s), većinom su izgrađene nakon 1963. godine, ali su svejedno pretrpile veće štete nego što su trebale. Smatra se da veća šteta od očekivane ne ide u prilog  $PGA$ , nego nepropisnoj gradnji i konstrukciji ili su imale vrlo slabe temelje. Ovi zaključci nisu isti i u užem epicentralnom području gdje su jako oštećene i obiteljske kuće propisno i protupotresno građene. Zbog toga je vrlo važno dobro odrediti strukturne značajke zgrada kako bi se nadalje učinci potresa mogli jasno razlikovati.

Na slici 3.8 gore prikazana je prostorna razdioba  $PGA$  na površini i dolje predomnanti vršni period amplifikacije za procijenjeni  $PGA_{ROCK}$ . Amplifikacijski faktor na površini (Slika 3.8 gore), za potres iz ožujka, u podsljemenskoj zoni je 1.6 - 1.8, oko 1.4 - 1.6 u području centra grada, a oko 1.3 u području Novog Zagreba (aluvijalna savska zona) zbog nelinearnih efekata trešnje. Na rezonantnom periodu (Slika 3.8 dolje) opaženi amplifikacijski faktor varira od 2.1 u podsljemenskoj zoni, preko 2.2 u centru pa do 2.4 u Novom Zagrebu (Markušić i sur., 2020).

Prema inicijalnom određivanju seizmičke amplifikacije, zbog lokalnih uvjeta tla, za zagrebački potres iz 2020. pokazalo se da se gibanje tla od oko 0.16 - 0.19  $g$  barem dvostruko amplificiralo na području centra i podsljemenske zone, gdje je i bilo najviše štete. Najznačajnija šteta bila je na starijim građevinama izgrađenim prije 1964. godine, dok su novije građevine, koje su u gradnji uvažavale protokol Eurokoda-8, vrlo malo ili nisu uopće oštećene (npr. u Novom Zagrebu).

Konačno, valjano je iz opisanog zaključiti da poznavanje lokalne amplifikacije na nekom specifičnom spektralnom periodu treba biti uvaženo pri dizajniranju protupo-tresnih građevina, kako bi se izbjegla potencijalna rezonancija s tlom tijekom potresa. Nadalje, očito je da je dosta građevina pretrpilo veće štete zbog zanemarivanja i struk-turalnih propusta prilikom gradnje, zbog čega bi se postojeće zgrade trebale ojačati (posebice one od velikog kulturnog i povijesnog značaja), a u gradnji novih u obzir uzeti seizmičku otpornost.

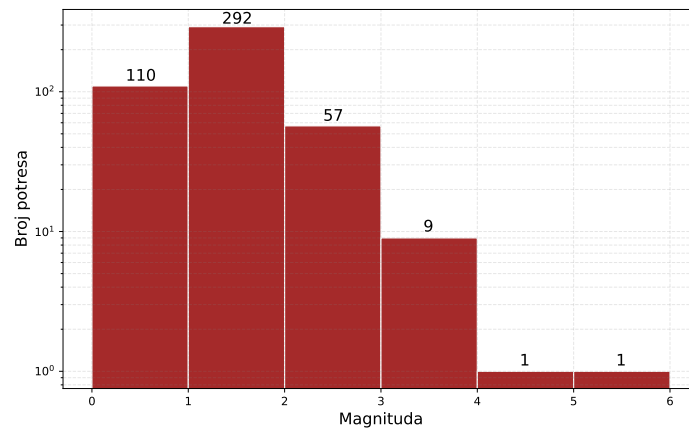


Slika 3.8. Gore: Karta lokalne amplifikacije za  $PGA$  na površini ( $AF@PGA$ ); Dolje: Predominantni vršni period amplifikacije ( $AF@PP$ ) za procijenjeni  $PGA_{ROCK}$  (Markušić i sur., 2020).

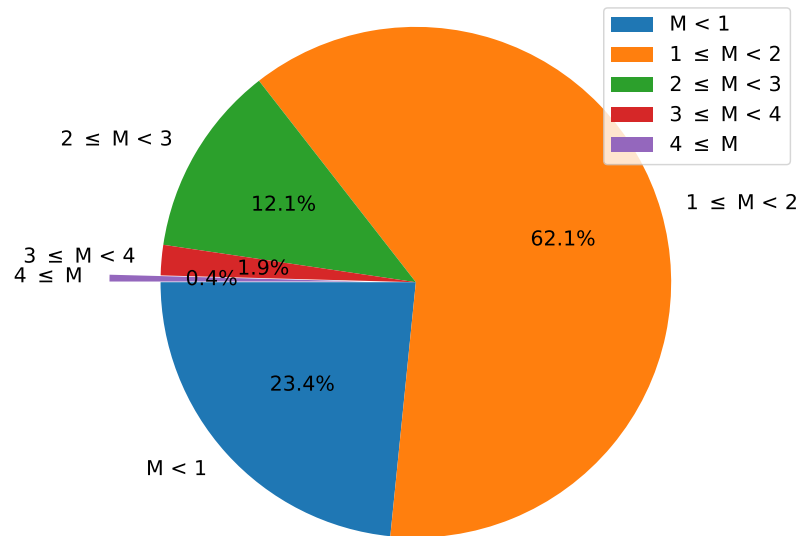


### 3.4. Podaci i metode

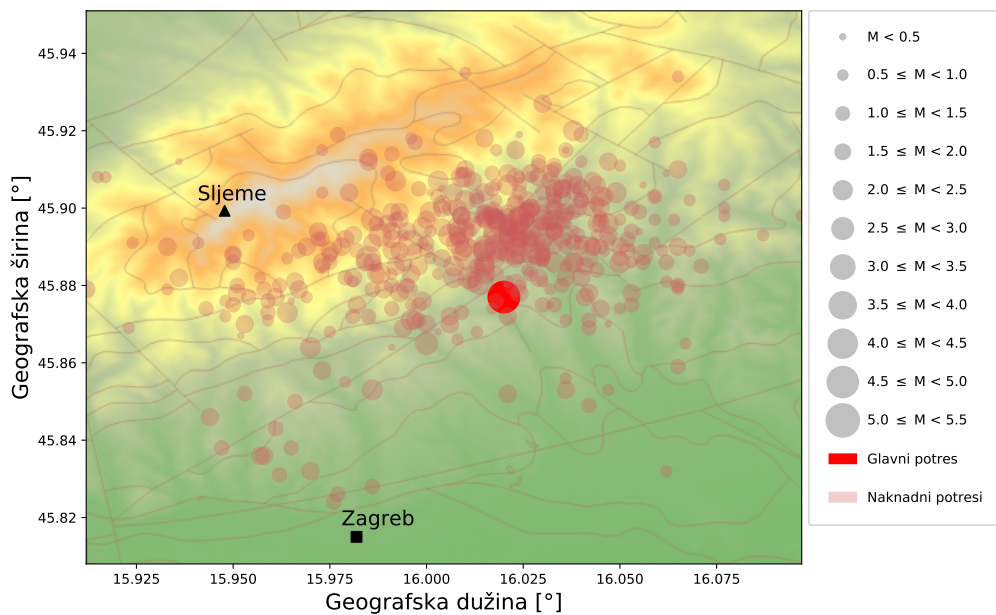
Za izradu ovog rada korišten je katalog potresa koji su se dogodili u Zagrebačkom epicentralnom području između 22. ožujka i 7. lipnja 2020. godine. Katalog još nije potpun pa su tako ovi preliminarni podaci skloni promjenama. Korišteni katalog do 14. travnja sadrži i potrese magnitude u rasponu 0 - 1.3, dok nakon 14. travnja sadrži samo one potrese kojima je magnituda preko 1.3 (u trenutku ovog istraživanja slabiji potresi još nisu očitani). Također, u daljnju analizu se nisu uzimali oni potresi kojima je dubina 0 km ili preko 20 km. Plići potresi (neposredno ispod površine) posljedica su nepreciznosti očitavanja, a s obzirom da niti jedan od rasjeda nema površinske manifestacije, sasvim je sigurno da se potresi nisu dogodili tako plitko. Nadalje stijene okvirno na dubinama od 20 km pa nadalje postaju već duktilne (ako se uzme okvirna pretpostavka da je termalni gradijent  $25\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  prema Van Gelder i sur. (2015)). Također, uzeti su oni potresi čiji su epicentri omeđeni prozorom aproksimativno  $16\text{ km} \times 16\text{ km}$  ( $\phi_{max} = 45.95\text{ }^{\circ}\text{N}$ ;  $\phi_{min} = 45.8\text{ }^{\circ}\text{N}$ ;  $\lambda_{max} = 16.1\text{ }^{\circ}\text{E}$ ;  $\lambda_{min} = 15.9\text{ }^{\circ}\text{E}$ ). Od 491 potresa u korištenom katalogu za navedeno razdoblje, 464 ispunjavaju gornje uvjete. Na slici 3.9 prikazana je raspodjela tih potresa prema intervalima magnituda, a na slici 3.10 prikazan je udio potresa određenih intervala magnituda u ukupnom broju potresa. Prostorna razdioba epicentara prikazana je na slici 3.11. Treba imati na umu da ovaj katalog još uvijek nije potpun i da je, primjerice, potresa magnitude ispod 1 bilo puno više nego što je ovdje prikazano. Sve daljnje analize provodit će se nad ovim skupom podataka.



Slika 3.9. Broj potresa po intervalima magnituda za korišteni preliminarni katalog Zagrebačke serije potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. godine.



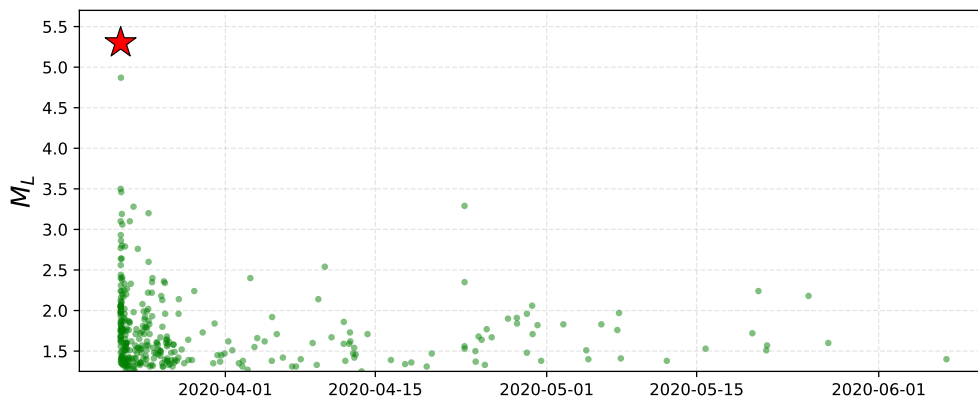
Slika 3.10. Postotak potresa po intervalima magnituda za korišteni preliminarini katalog Zagrebačke serije potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. godine.



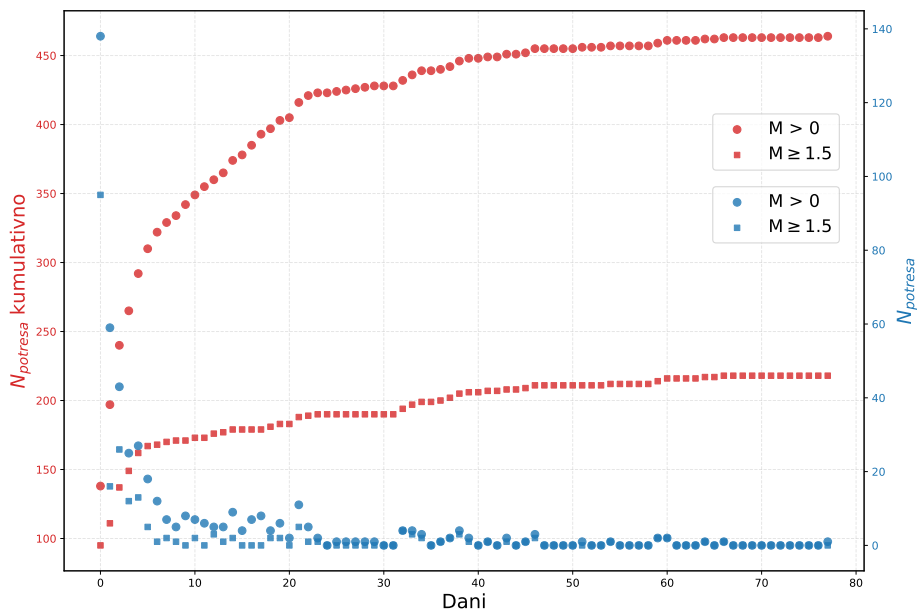
Slika 3.11. Prostorna razdioba epicentara potresa iz preliminarinog kataloga Zagrebačke serije potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. godine.

Često pitanje koje se postavlja jest: *Koliko će biti još naknadnih potresa i kada će oni prestati?* Točan odgovor na ovo pitanje ovisi o puno faktora koje vrlo vjerojatno nikada nećemo znati precizno odrediti s obzirom da se ne zna koliko akumulirane energije se oslobodilo kroz glavni potres. Za ovako jake potrese pojava naknadnih potresa je česta i očekivana. Samo trajanje pojačane seizmičnosti ovisi i o pohranjenoj energiji, ali i o sustavu samih rasjeda. Zanima nas koliko rasjeda i manjih struktura se aktiviralo i jesu li naknadne trešnje možda pobudile neke druge rasjede, koji bi mogli svojom aktivnošću još produljiti trajanje ove serije potresa.

Na slici 3.12 prikazane su magnitute potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. Iako slika prikazuje samo one potrese magnitute iznad 1.3, lijepo se vidi kako magnitute potresa s vremenom opadaju. U nadopunu ovome grafu valja promotriti i graf na slici 3.13 koja prikazuje broj potresa po danima, ali i njihov kumulativni broj. Na ovome grafu prikazani su svi potresi iz kataloga, ali i samo oni potresi kojima je magnituda preko 1.5. Iz grafa se može lijepo uočiti da broj potresa u danu s vremenom opada kao i otupljivanje kumulativne krivulje. Ovi prikazi mogu ukazati na to da se u kasnijoj fazi ove serije nisu aktivirali neki dodatni rasjedi.



Slika 3.12. Magnitute potresa po danima nakon glavnog potresa. Graf prikazuje samo potrese magnitute preko 1.3. Crvenom zvjezdicom označen je glavni potres.

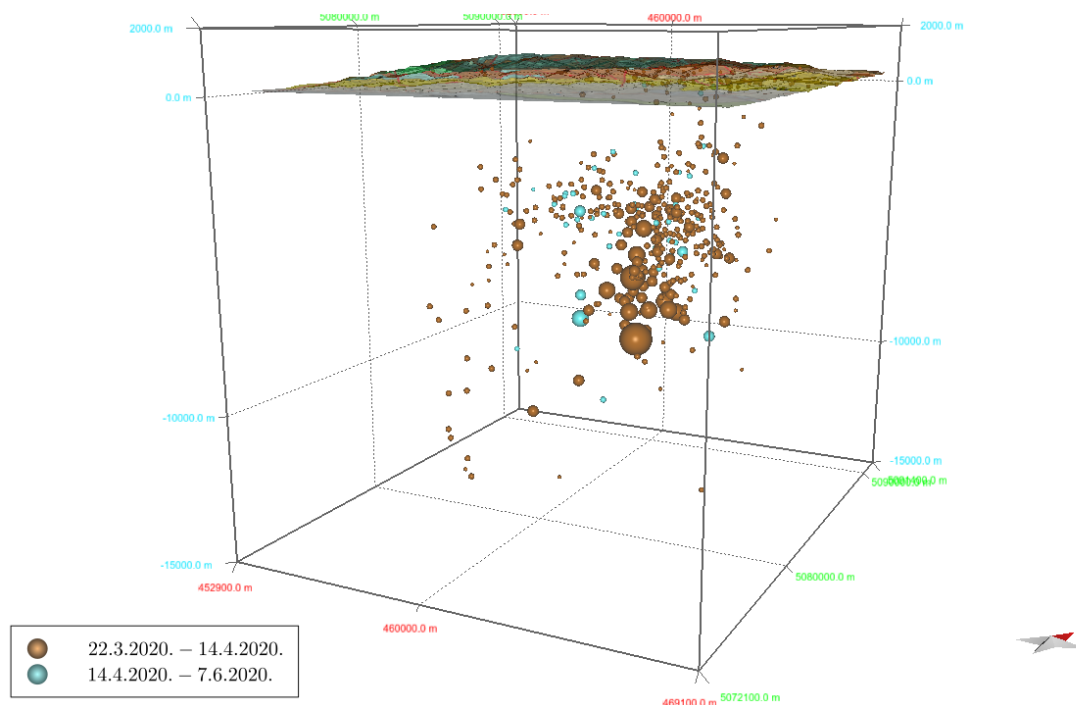


Slika 3.13. Ovisnost broja potresa u danima nakon glavnog potresa. Crveno su kumulativne vrijednosti (crvena skala na lijevoj ordinati), a plavo su brojevi potresa po danima (plava skala na desnoj ordinati). Kružićima su prikazani svi potresi iz kataloga (magnituda preko 0), dok su kvadratićima prikazani samo oni potresi magnituda preko 1.5.

Potresi Zagrebačke serije do 7. lipnja 2020. selektirani su i statistički su obrađeni u programskom jeziku *Python* u kojem je i izrađen *time-lapse* epicentara. Za strukturno modeliranje rasjeda koristio se softver MOVE pod akademskom, nekomercijalnom licencom. Za rad u MOVE-u podaci su prilagođeni u besplatnom softveru QGIS. Samo modeliranje provelo se pomoću IDW (engl. *Inverse Distance Weight*) determinističke metode interpolacije za odabrani skup hipocentara, gdje težina pojedinog ovisi o recipročnoj udaljenosti od inicijalno pretpostavljene rasjedne ravnine.

### 3.5. Rezultati i diskusija

Prostorna razdioba epicentara u vremenu za period od početka ove serije potresa pa do 7. lipnja 2020. (Dodatak B) prikazuje seizmičku evoluciju u kojoj možemo primjetiti veći intenzitet i broj potresa u prvih par dana. U radu Markušić i sur. (2020) prikazan je trodimenzionalni *time-lapse* za potrese u prva 24 sata od glavnog potresa. Nameće se pitanje jesu li se neki rasjedi ili manje strukture naknadno kasnije aktivirale. Na slici 3.14 prikazani su hipocentri potresa bez modeliranih rasjeda zbog preglednosti (Dodatak C). Smeđe označeni su oni potresi koji su se dogodili do 14. travnja, a plavo su označeni potresi nakon 14. travnja. Veličine kuglica odražavaju jačinu potresa. Na slici se jasno vidi da ne dolazi do nekog pravilnijeg grupiranja hipocentara potresa koji su se dogodili nakon 14. travnja, što dovodi do zaključka da se vrlo vjerojatno neki drugi rasjedi kroz vrijeme nisu aktivirali. S obzirom da seizmičnost značajno opada, vrlo vjerojatno se drugi rasjedi neće ni aktivirati.

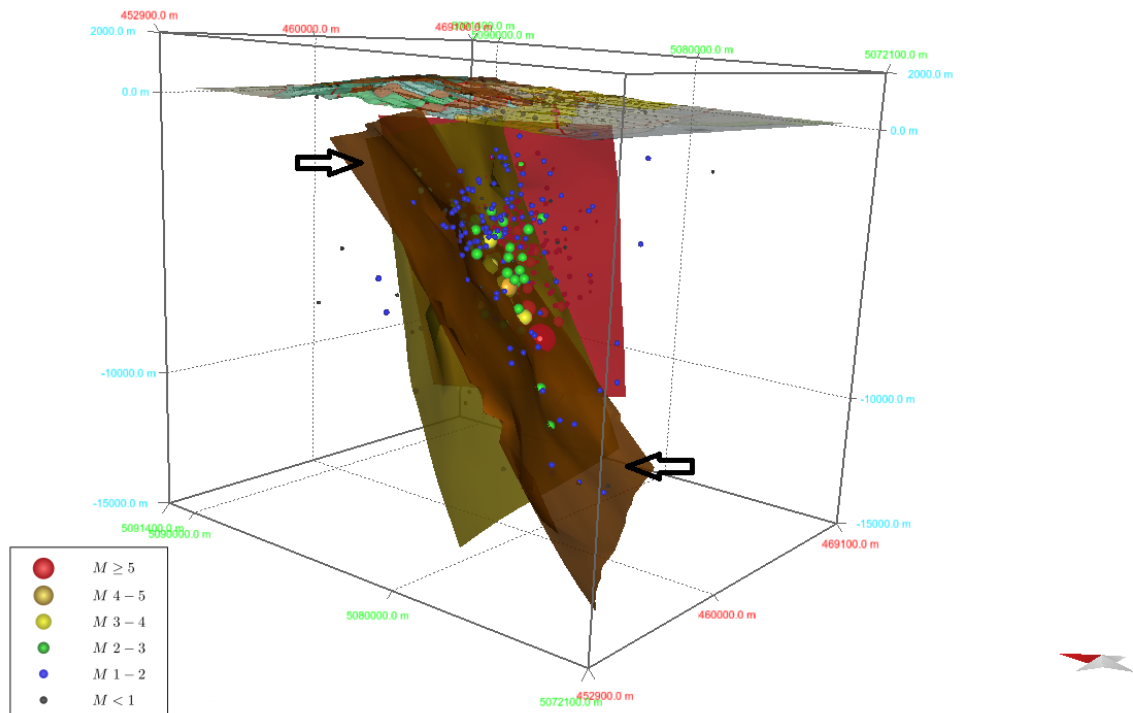


Slika 3.14. Hipocentri potresa između 22. ožujka i 14. travnja 2020. označeni su smeđe, a plavo su označeni hipocentri potresa između 14. travnja i 7. lipnja 2020. Modelirane rasjedne ravnine uklonjene su zbog preglednosti. Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

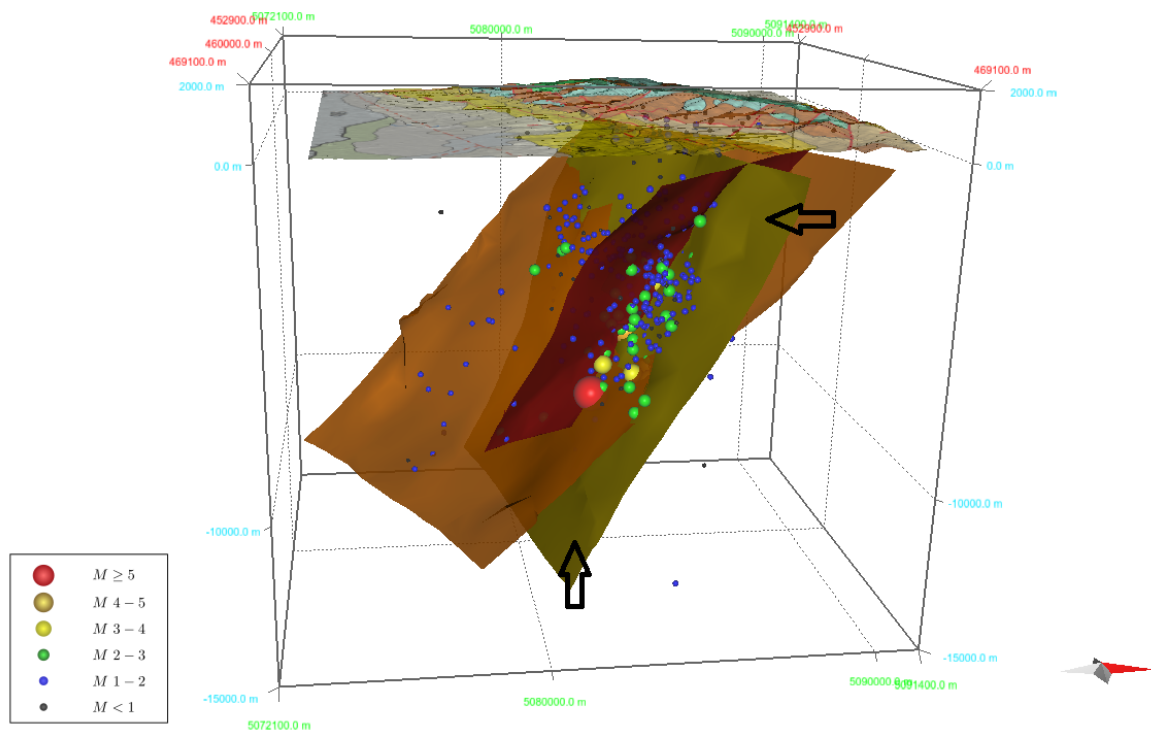
Na osnovu položaja hipocentara iz kataloga potresa, modelirane su tri rasjedne ravnine u softveru za geološko strukturno modeliranje MOVE (Dodatak A). Uzme li se u obzir i teorija da je unutrašnjost Medvednice ispunjena s puno više manjih fragmenata, moguće je bilo modelirati samo tri velike rasjedne ravnine koje su akomodirale većinu žarišta. S obzirom da su podaci preliminarni, ravnine su modelirane na osnovu potresa značajnijih magnituda (Slika 3.15). Ova vizualna analiza dio je geološke interpretacije koja zajedno sa žarišnim mehanizmom (Slika 3.5) daje jasniju sliku o onome što se nalazi ispod površine Zemlje. Na slici 3.18 je prikazana usporedba površinske projekcije modeliranih rasjednih ploha s geološkom kartom.

Hipocentri koji se pojavljuju u neposrednoj blizini površine ili jako odstupaju od modeliranih ravnina su se dogodili na manjim strukturama ili su posljedica pogreški u procesu lociranja te su oni raspršeni na većoj površini. Radi se o vrlo vjerojatno nedovoljno precizno očitanim nastupnim vremenima, pa tako i o nepreciznim lokacijama te su kao takvi zanemareni u analizi. Riječ je mahom o potresima magnituda ispod 1 te su u prvih nekoliko dana nakon glavnog potresa bili teži za prepoznati u velikom broju jačih potresa. Niti jedan od ova tri rasjeda se ne vidi na površini, tj. nema površinskih manifestacija (modelirani su kao duboko ukopani rasjedi) što se može objasniti na dva načina. Prvo, zbog mlađih, manje krutih naslaga koje pod utjecajem napetosti ne pucaju nego se elastično deformiraju, ovi rasjedi su slijepi, tj. zaista ni ne dolaze do površine. Druga opcija je da postoje rasjedi koji dolaze do površine, ali zbog kompleksnosti terena, pokrivenosti šumom i izgrađenosti, nisu vidljivi. Pogledali se prikaz žarišta potresa jasno se može primijetiti da, iako su potresi u ovoj seriji bili plitki, nisu dolazili do površine. Opet, iako je vidljiva nekolicina žarišta u neposrednoj blizini površine, to su sve potresi vrlo malih magnituda ( $M_L < 1$ ) te su vrlo vjerojatno neprecizno locirani. Dakle, vjerojatnije je da su medvednički rasjedi slijepi rasjedi.

Prvi i najjasnije modelirani rasjed je smeđi rasjed na slici 3.15. Ovaj *Rasjed 1* ili *primarni* rasjed modeliran je na osnovu 50 hipocentara među kojima su i hipocentri najjačih potresa ove serije (uključujući glavni potres i najjači naknadni potres). Azimut ovog rasjeda je  $243^\circ$ , a nagib  $45^\circ$ , što možemo usporediti s rasjednim parametrima dobivenim iz izračunatog žarišnog mehanizma po kojem je azimut pružanja  $263^\circ$ , a nagib  $43^\circ$ . S obzirom na relativnu subjektivnost metode, ova dva rezultat lijepo se slažu. O pomaku samog rasjeda više saznajemo iz žarišnog mehanizma koji je ranije pokazao da se radi o reversnom rasjedu. Kada bi se ovaj rasjed projicirao na površinu, na površini bi otprilike bio blizu sjevernog podnožja Medvednice, odnosno na granici s jurskim naslagama. Površinska projekcija ovog rasjeda prikazana je smeđe na slici 3.18. Iako projekcija ne prati savršeno geološke granice prikazane na karti, treba imati na umu da je ova geološka karta izrađena isključivo na osnovu površinskih obilježja te da ovaj rasjed ne mora biti ravan u svom plićem dijelu. Model je izrađen da dobro opisuje područje u kojem postoje hipocentri, ali izvan toga ne mora pratiti model. Od modeliranih rasjeda, upravo *Rasjed 1* najbliže opisuje Sjeverni rubni medvednički rasjed. U radu Markušić i sur. (2020) ovaj rasjed modeliran je s azimutom smjera pružanja  $215^\circ$  i s blažim nagibom od  $31^\circ$  zbog čega mu je površinska projekcija u centralnom dijelu Zagorja. Parametri modela iz ovog rada bolje se slažu s onima dobivenim iz žarišnog mehanizma vjerojatno jer je korišten dulji vremenski interval.



Slika 3.15. *Rasjed 1* (smeđe) modeliran na osnovu 50 hipocentara. Azimut pružanja je  $243^\circ$ , a nagib  $45^\circ$ . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

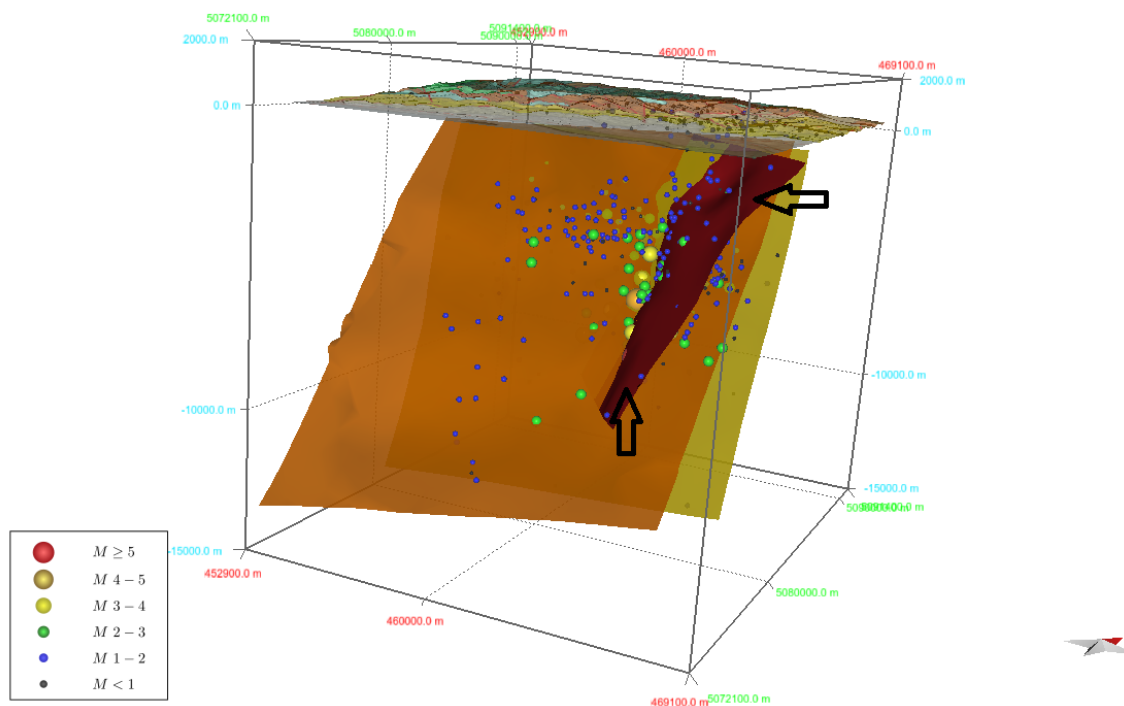


Slika 3.16. *Rasjed 2* (žuto-zeleno) modeliran na osnovu 40 hipocentara. Azimut pružanja je  $247^\circ$ , a nagib  $62^\circ$ . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koord. sustavu.

Na slici 3.16 žuto-zeleno je označen *Rasjed 2* modeliran na osnovu 40 hipocentara srednje jakih potresa. Prema modelu, ovaj rasjed je azimuta smjera pružanja  $247^\circ$  i strmog nagiba od  $62^\circ$ . Površinska projekcija mu je na slici 3.18 prikazana žutom bojom i, iako odstupa, najbliže prati vrhove/hrbat Medvednice, a posebno u najvišim dijelovima. *Rasjed 2* je vrlo vjerojatno reversni i secira centralni dio Medvednice te kao takav, ovaj rasjed bi mogao biti dio sustava reversnih rasjeda na geološkoj karti ucrtanih kao granica između jurskih naslaga (*31b*) i paleozojskih stijena (*6*) u centralnom dijelu Medvednice. Slično ovome, u Markušić i sur. (2020) modeliran je nešto malo blaže nagnuti rasjed azimuta smjera pružanja  $256^\circ$  i nagiba  $57^\circ$  koji ipak bolje prati hrbat Medvednice.

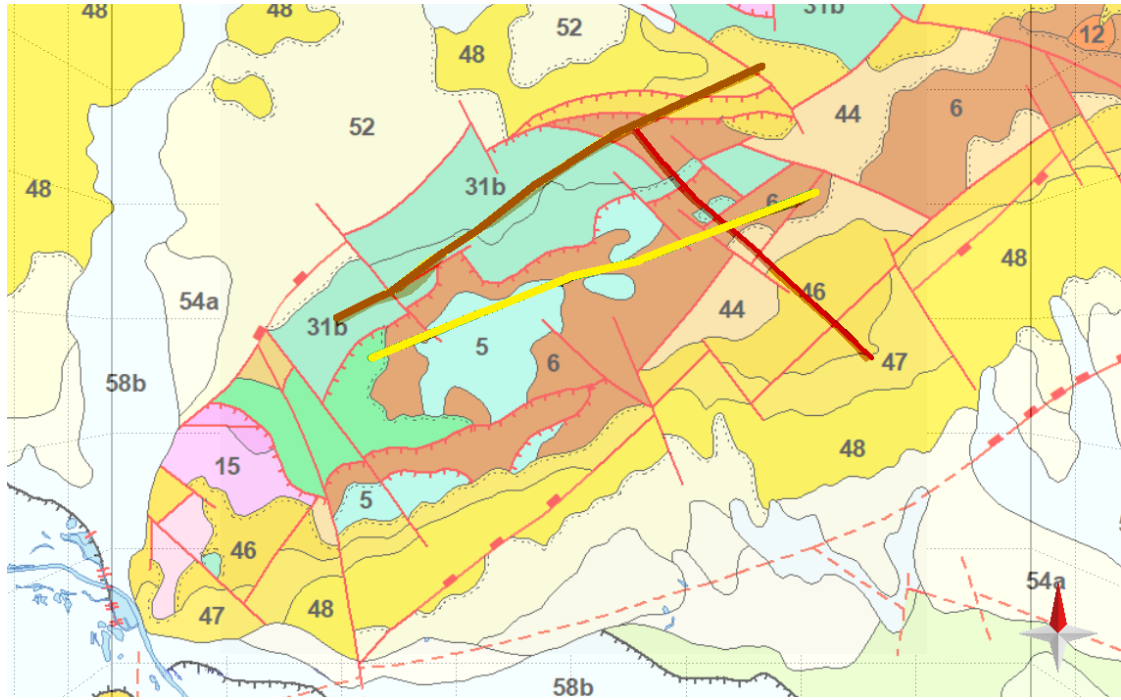
Ono što je vrlo zanimljivo jest crveno označeni rasjed na slici 3.17 azimuta smjera  $317^\circ$  i nagiba  $55^\circ$  koji, iako se ne poklapa s Kašinskim rasjedom, ima pružanje približno paralelno s njime, ali s odmakom od nekoliko km prema zapadu. Na geološkoj karti prikazanoj na slici 3.18 crveno označeno se vidi površinska projekcija ovog rasjeda. Iako rasjedi ovog pružanja nisu česti, na slici 3.6 se vidi ispreplitanje tla B i C tipa što može ukazivati na anomalije u strukturnoj građi, a što pak opravdava ovaj model. Prema Eurokodu-8, tlo tipa B su slojevi vrlo zbijenog pijeska, šljunka ili vrlo čvrste gline, debljine najmanje nekoliko desetaka metara karakterizirani stupnjevitim povećanjem mehaničkih svojstava s dubinom, dok su tlo tipa C manje čvrsti slojevi zbijenog ili srednje zbijenog pijeska, šljunka ili čvrste gline debljine od nekoliko desetaka do više stotina metara.

Ukoliko se *Rasjed 3* zaista aktivirao, on može značiti da su bliski paralelni rasjedi, pa tako i Kašinski rasjed, još uvijek seizmogeni što uvelike mijenja pogled na potrese ovih područja prije instrumentalnog bilježenja (npr. Veliki zagrebački potres iz 1880.).



Slika 3.17. *Rasjed 3* (crveno) modeliran na osnovu 18 hipocentara. Azimut pružanja je  $317^\circ$ , a nagib  $55^\circ$ . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.





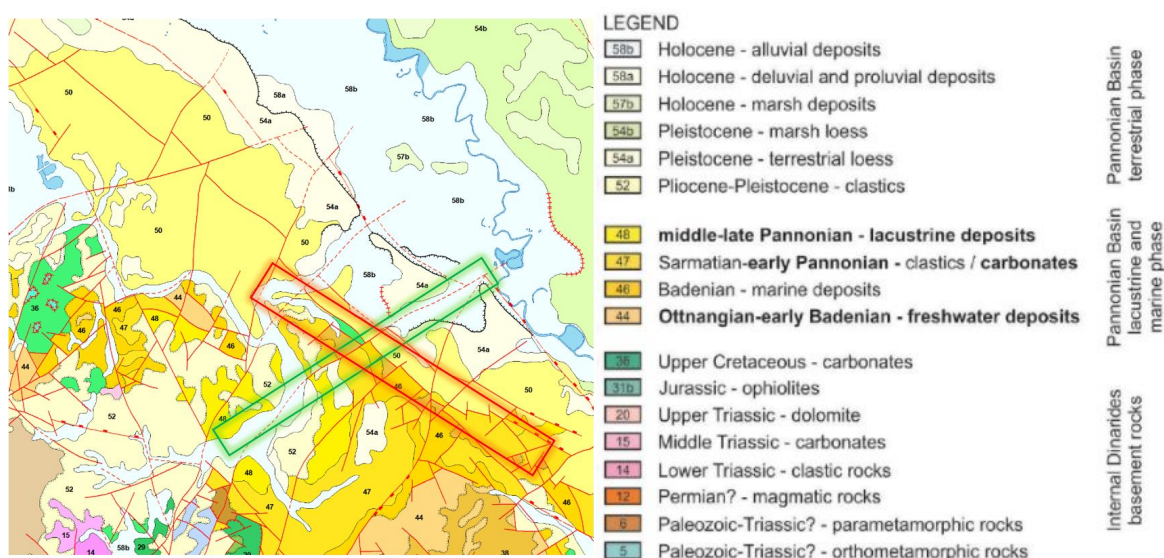
Slika 3.18. Projekcija modeliranih slijepih rasjeda na površinu. Smeđe označen je *Rasjed 1*, žuto *Rasjed 2*, crveno *Rasjed 3*. U pozadini slike geološka je karta (GK 1:300000) čiji su elementi opisani na slici 3.1.

Konačno, zanimljivo je i primjetiti da se hipocentar glavnog potresa nalazi blizu sve tri modelirane ravnine zbog čega je vrlo vjerojatno aktivirao sva tri rasjeda. Zbog samog položaja bi se glavni potres mogao "pripisati" svim trima ravninama, ali analizirani žarišni mehanizam ide u prilog *Rasjedu 1*. Slučajevi u kojima se aktivira više od jednog rasjeda značajno otežavaju procjenu seizmičkog hazarda.

## 4. Pokupski rasjedni sustav

### 4.1. Geološki pregled pokupske seizmogene zone

Područje Banovine, gdje prolaze ortogonalni sustavi Pokupskog (rasjedna linija Pokupsko-Kostajnica-Banja Luka) i Petrinjskog rasjeda (rasjedna linija Sisak-Petrinja-Glina-Topusko), vrlo je geološki kompleksno. Na slici 4.1 prikazana je geološka karta (ustupio HGI) odrezana na šire područje Banovine (poligon omeđen s 45.25° N 15.8° E i 45.7° N 16.5° E) - radi se o području na kojem je započela serija potresa u prosincu 2020. Na karti su približno označeni prostori pružanja Pokupskog rasjeda (crveno) i Petrinjskog rasjeda (zeleno). Prema prostornoj razdiobi epicentara potresa ove serije, može se lako zaključiti da je glavni seizmogeni rasjed bio upravo Pokupski rasjed. Ova geološka karta i strukture prikazane na njoj dosta su simplificirani te isto tako Pokupski rasjed vjerojatno nije samo jedna jednostavna ravnina nego niz međusobno bliskih i paralelnih struktura.



Slika 4.1. Lijevo: geološka karta (ustupio HGI) M 1:300000 izrezana za šire područje Banovine. Crveno je uokvireno područje kojim se približno prostire Pokupski rasjed, zeleno je označeno približno područje prostiranja Petrinjskog rasjeda. Desno: Legenda geoloških oznaka (Kovačić i sur., 2016).

Prema područjima označenima na geološkoj karti može se detaljnije prodiskutirati tip naslaga koje se nalaze u okolini potresima pogođenog područja. S 50 i blijedo žutom bojom označene su pliocenske naslage, tj. pijesci, gline i silt. Ovakvi sedimenti i tlo na njima gotovo uvijek su zasićeni vodom te su zbog toga dosta plastični. Drugim riječima, rupturi uslijed jakog potresa na ovakvim tlima vrlo malo su moguće. Ukoliko na takvom tlu ipak nastane nekakav oblik rupturi, on će se vrlo teško primijetiti s obzirom da su ova tla potpuno prekrivena vegetacijom. Nešto čvršći stijenski materijal označen je s 46, 47 i 48, odnosno tamnije žutom bojom, a radi se o litotamijskim vapnencima i laporima iz srednjeg i gornjeg miocena. Sa zelenom bojom i brojem 36 označene su krte vulkanitne stijene. Svijetlo plavom bojom i oznakama 58a i 58b označene su najmlađe holocenske naslage, odnosno recentni šljunci i mulj rijeke Save.

Ovi aluvijalni nanosi, ali i oni označeni s 54 i 56, zapravo su dijelovi savskih riječnih terasa. Na geološkoj karti je vidljiva i oštra granica između pliocenskih glina i pijeska označenih s 50 i vapnenaca i lapora označenih s 46, 47 i 48. Na ovom području u kontaktu se nalaze litološke jedinice različitih vremena nastanka što je karakteristika rasjednih kontakata. Upravo zato se ova oštra granica smatrala mjestom Pokupskog rasjeda.

Geološka karta prikazuje površinsko rasprostiranje naslaga na nekom području, a one se po svojim svojstvima najčešće razlikuju od naslaga na većim dubinama na kojima se rasjedi i nalaze. Za očekivati je da mekani sedimenti zasićeni vodom (većina mlađe holocenske ili čak pliocenske starosti) kao i tlo razvijeno na njima prilikom rasjedanja na većim dubinama, neće rupturirati na površini. Također, ukoliko se rasjed nalazi na nekoj dubini ispod takvog sedimenta, može se pretpostaviti da takav rasjed neće imati površinsku manifestaciju kroz takvo tlo. S druge strane, u kompaktnijim stijenama poput miocenskih vapnenaca to može biti slučaj, ali opet postojanje površinskih ruptura i površinskih manifestacija rasjeda uvjetovano je brojnim čimbenicima poput tipa rasjeda, dubine rasjeda, jačine potresa, u kojoj mjeri je došlo do rasjedanja itd.

#### **4.2. Seizmička povijest šireg pokupskog područja**

Prema Hrvatskom katalogu potresa (Herak i sur., 1996), seizmička aktivnost pokupsko-petrinjskog epicentralnog područja okarakterizirano je manjim brojem jačih potresa i većim brojem slabijih potresa, tj. od ukupnog broja potresa zabilježenih na tom području, 80% ih je bilo magnitude manje od 2.5. U katalogu potresa prvi podatak o jakom potresu na ovom području bio je potres 17. kolovoza 1903., epicentralnog intenziteta VI °MCS u Petrinji, a procijenjena magnituda bila je 4.6.

Najjači instrumentalno zabilježeni potres (do 2020.) na ovom području bio je, jedan od svjetski najpoznatijih, potres 8. listopada 1909. epicentra sjeverno od Pokupskog (u dolini rijeke Kupe) i magnitude 5.8. Ovaj potres je jedan od značajnijih povijesnih potresa jer je na osnovu ovog potresa geofizičar Andrija Mohorovičić otkrio diskontinuitet u seizmičkoj brzini, koji odvaja Zemljinu koru od gornjeg plašta. Ovaj diskontinuitet kasnije je i nazvan Mohorovičićevim. Zanimljivo je da se ovaj potres dogodio samo godinu dana nakon što je Mohorovičić u Zagrebu osposobio prvi mehanički Wiechertov seizmograf. Prema Herak i Herak (2010) ovaj potres se dogodio na Pokupskom rasjedu pružanja SZ-JI te s nagibom prema istoku. Ondašnjim seizmografima zabilježeno je oko 50 naknadnih potresa do kraja 1910. Najjači naknadni potres magnitude 5.3 dogodio se 29. siječnja 1910. s epicentrom oko 15 km istočno od epicentra glavnog potresa.

U zadnjih 30 godina, do prosinca 2020. godine, u ovom epicentralnom području najjači potres bio je potres iz 1996. magnitude 4.5. Ovaj potres uzrokovao je osrednju štetu u Petrinji, Komarevu, Glini, Majama, Sisku i Velikom Svinjičkom (Markušić i sur., 2021).

Razdioba hipocentara potresa, ali i izračunati žarišni mehanizmi jačih potresa iz serije s kraja 2020. upućuju na to da je Pokupski rasjed ipak subvertikalalan i s pomakom po pružanju. Nakon potresa 29. prosinca 2020. i ostalih jačih potresa ove Petrinjske serije, postalo je jasno da je seizmički potencijal premašio očekivanja u prijašnjim studijama (karta seizmičkog hazarda za područje Hrvatske). Ovo premašenje očekivanja upućuje na to da je geodinamički model ovih prostora puno kompliciraniji nego što se mislilo što nadalje upućuje na važnost novih istraživanja i razvitka novih modela.

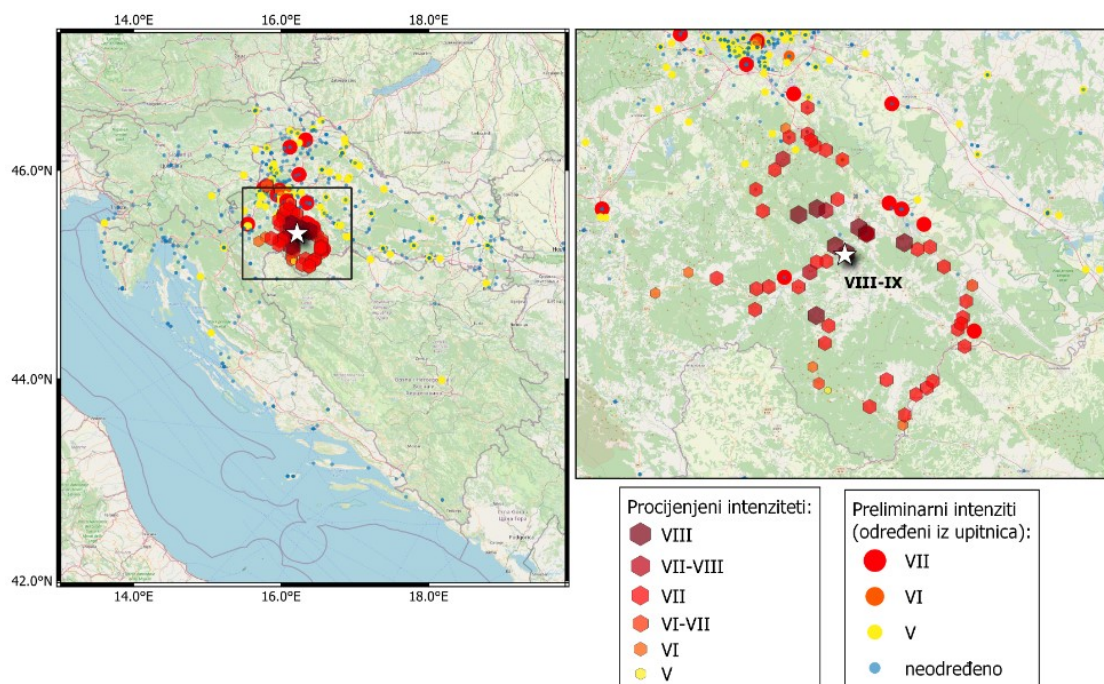
### 4.3. Petrinjski potres 29. prosinca 2020.

Petrinjska serija potresa iz 2020. godine započela je u ponedjeljak 28. prosinca u 6:28 po lokalnom vremenu snažnim potresom magnitude 5.0 nakon čega je taj dan uslijedio niz slabijih i srednje jakih potresa. Nešto malo više od sat vremena nakon prvog potresa ove serije uslijedio je potres magnitude 4.6. Glavni potres, magnitude 6.2, s lokacijom epicentra približno identičnoj onoj od prvog prethodnog potresa (M5.0) i s hipocentrom na oko 9 km dubine, uslijedio je u 12:19 po lokalnom vremenu u utorak 29. prosinca, nakon približno 40 prethodnih potresa od početka serije. Glavni potres bio je intenziteta VIII - IX °EMS i osjetio se po čitavoj Hrvatskoj te u Sloveniji, Bosni i Hercegovini, sjevernoj Italiji, zapadnoj Mađarskoj, sjeverozapadnoj Srbiji, ali i u južnim dijelovima Austrije te u jugozapadnim dijelovima Slovačke.

U prvih tjedan dana od početka ove serije potresa, dogodilo se preko 2500 potresa od kojih je njih 66 bilo magnitude preko 3, odnosno njih 11 magnitude preko 4.

Na slici 4.2 prikazana je preliminarna karta intenziteta glavnog potresa koji se osjetio diljem Hrvatske. Ovako dobiveni intenzitet dobiven je automatskom obradom upitnica i prikupljanjem podataka na terenu, a različite boje sugeriraju razinu intenziteta određene po EMS ljestvici.

Prema satelitskim opažanjima koseizmičkih deformacija opaženo je da je nakon glavnog potresa došlo do relativnog pomaka od 10 cm u prosjeku, dok je najveći zabilježeni pomak bio 38 cm (Markušić, osobno priopćenje).



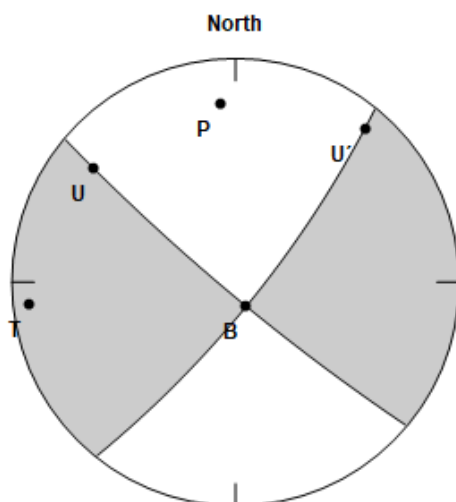
Slika 4.2. Lijevo: preliminarna karta intenziteta za potres magnitude 6.2 od 29. prosinca 2020. dobivena na temelju automatski obrađenih upitnica (krugovi) i na temelju terenski prikupljenih podataka (šesterokuti); Desno: preliminarno određeni intenzitet šireg petrinjskog područja označeno pravokutnikom na lijevoj slici (Sović, I., Latečki, H., 2021).

### 4.3.1. Žarišni mehanizam

Na osnovu prvih nailazaka P valova, za glavni potres serije potresa kraj Petrinje iz prosinca 2020. izračunat je žarišni mehanizam (Markušić, osobno priopćenje) prikazan na slici 4.3 čiji su parametri prikazani u tablici 4.1. Iz prikaza žarišnog mehanizma jasno se vidi da se glavni potres dogodio na *strike-slip* rasjedu, s čistim pomakom po pružanju. Prema prostornoj pojavnosti potresa da se zaključiti da je od ove dvije rasjedne ravnine seizmogeni rasjed bio onaj u tablici 4.1 definiran kao Rasjed1 što će se kasnije i vidjeti u prikazu podataka te u strukturnom modeliranju. Seizmogeni rasjed subvertikalalan je te je približnog pružanja SZ-JI s desnim pomakom po pružanju.

Aktivirani rasjedni sustav knjiški je primjer stijenske deformacije pod utjecajem kompresije kojoj je os u smjeru sjever-jug što se može vidjeti i iz žarišnog mehanizma. Uz os najvećeg tektonskog tlaka  $P$  gotovo u smjeru S-J, izračunato je i da je os najvećeg tektonskog vlaka  $T$  bila gotovo horizontalna i u smjeru približno I-Z.

Prema automatski generiranim žarišnim mehanizmima sa stranica CSEM-a predstavljenima u Markušić i sur. (2021), vidljivo je da su, uz glavni potres, i najjači prethodni potres te najjači naknadni potres generirani na istom rasjedu.



Slika 4.3. Žarišni mehanizam izračunat za glavni potres od 29. prosinca 2020. kraj Petrinje (Markušić, osobno priopćenje). Žarišne sfere prikazane su u stereografskoj projekciji.

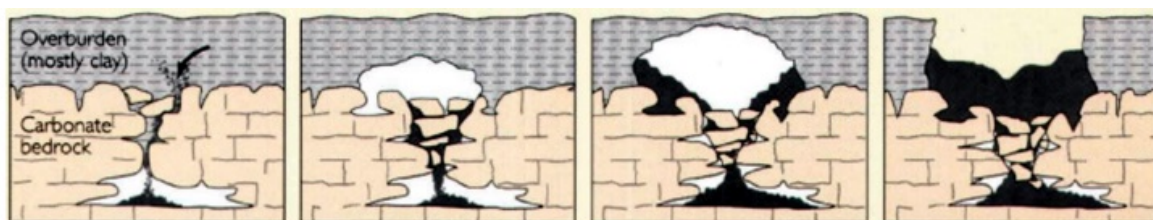
Tablica 4.1. Parametri izračunatog žarišnog mehanizma za glavni potres od 29. prosinca 2020. kraj Petrinje (Markušić, osobno priopćenje).

	Smjer pružanja [°]	Nagib [°]	Kut relativnog pomaka [°]
Rasjed1:	130	84	-168
Rasjed2:	39	78	-6
P os:	175	-13	
T os:	264	4	

#### 4.3.2. Utjecaj na okoliš, opis štete i karakteristike građevina

Jaki potresi Petrinjske serije potresa, a pogotovo glavni potres magnitude 6.2, ostavili su brojne posljedice na imovinu i okoliš, dok je zbog posljedica urušavanja od glavnog potresa, sedmero ljudi poginulo u Petrinji, Glini i Žažini te ih je nekoliko desetaka ozlijeđeno. Zbog vrlo velike količine energije oslobođene tijekom lateralnih pomaka rasjednih blokova tijekom glavnog potresa, koja je mjerljiva s energijom oslobođenom tijekom eksplozije atomske bombe u Hiroshimi (USGS, 2021), i relativno plitkog žarišta, došlo je do mnogo stijenskih puknuća na površini. Uz rupturu na površini koje uglavnom prate pružanje Pokupskog rasjeda, glavni potres je prouzrokovao brojne sekundarne koseizmičke efekte u blizini epicentra kao što su likvefakcija, stvaranje urušnih vrtača, klizišta te odroni.

Na površini od oko 600 m<sup>2</sup> zamijećena je pojava likvefakcije i to na vodom zasićenim prostorima uz tokove rijeka Kupe i Save. Ova pojava lako je prepoznatljiva po sivom pijesku koji se po boji i sastavu razlikuje od tamnosmeđeg tla ili ga se lako može primijetiti na zelenoj travnatoj površini (Tomljenović i sur., 2021). Sama likvefakcija na ovim područjima manifestirala se u nekoliko oblika, primjerice kao duge pješćane pukotine iz kojih je tekla voda ili kao pješćani vulkani stožastog oblika iz kojih je muljevita voda pod pritiskom izlazila visoko u zrak. Nadalje, potres je potaknuo i pojavu urušnih vrtača, ponajviše u selu Mečenčani gdje je i prije samih potresa već postojala nekolicina manjih vrtača. Ovakve vrtače (Slika 4.4), potaknute dodatnom trešnjom tijekom potresa, nastaju urušavanjem svoda kaverni nastalih podzemnom sufozijom u deluvijalno-proluvijalnim naslagama (Tomljenović i sur., 2021). Proces urušavanja nastavio se i mjesecima nakon potresa, tj. poneke stare vrtače su se nastavile urušavati i proširivati, dok su se neke tek pojavljivale. Prema opažanjima i dodatnim informacijama na terenu u lipnju 2021., otkriveno je preko 130 urušnih vrtača veličine od nekoliko cm do one najveće približnog promjera 30 m i dubine 10 m. Također, na užem epicentralnom području zamijećeno je oko 36 klizišta i 4 odrona koji su se većinom reaktivirali na lokacijama gdje su se klizišta i odroni već prije događali. Uz rupturu na površini svakako treba spomenuti brojna puknuća i pomake na asfaltu i nasipima koji se približno pružaju kao i Pokupski rasjed zbog čega je i došlo do rasprava o površinskim manifestacijama ovog rasjeda.



Slika 4.4. Nastanak urušne vrtače podzemnom sufozijom u terenu koji na površini i plitko pod površinom izgrađuju pokrovne klastične naslage ispod kojih je okršena vapnenačka podloga (iz Tomljenović i sur. (2021) preuzeto sa <http://www.geohazards.com/are-there-different-types-of-sinkholes/cover-subsidence-sinkhole-graphic/>).

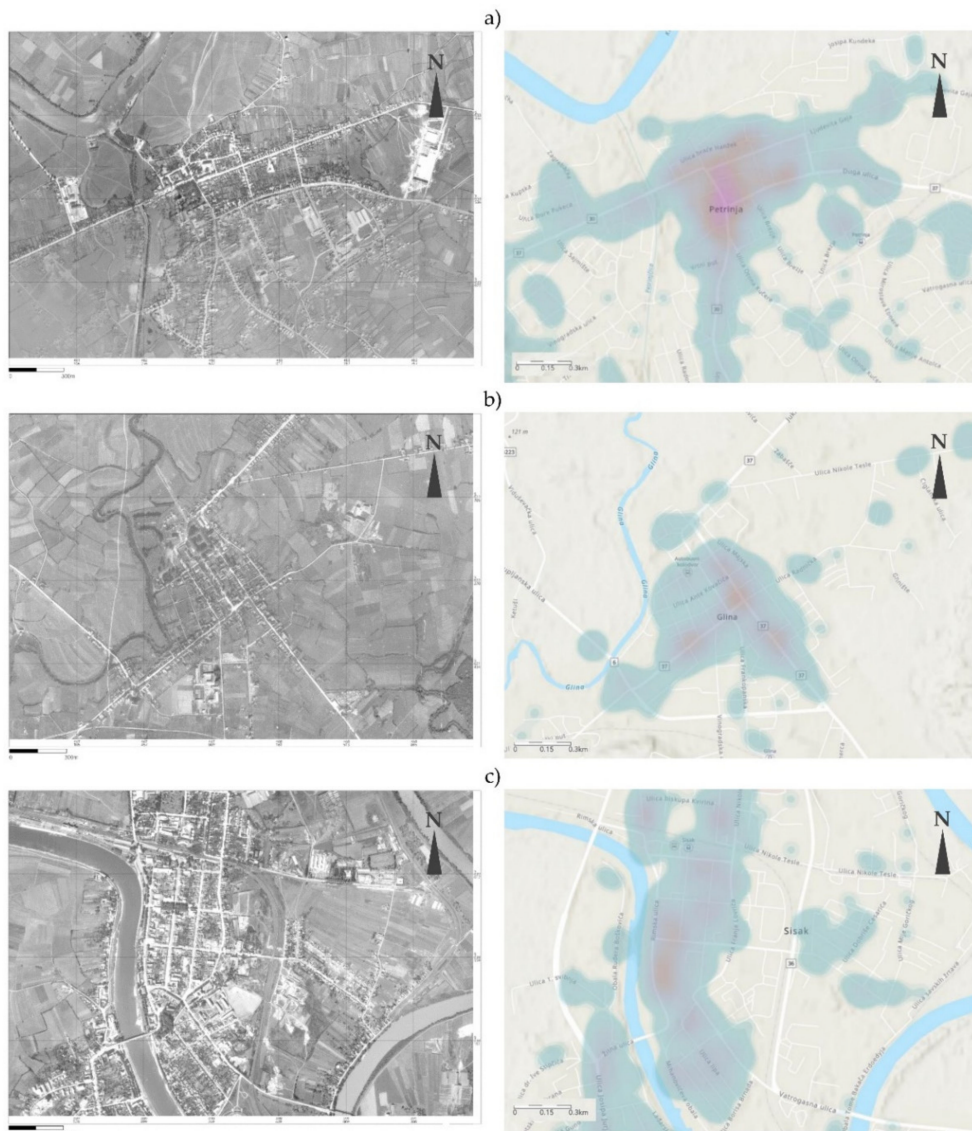
S obzirom na stariju i strukturno slabiju gradnju, građevine na epicentralnom području su pretrpile velike štete. Kao i u slučaju zagrebačkog epicentralnog područja i tamo opisane gradacije oštećenja (DG1 - DG5), građevine ovog područja moguće je raspodijeliti u razrede prema periodu gradnje (u odnosu na aktualne norme gradnje), a time uglavnom i prema stupnju oštećenja.

Prema službenim izvješćima (SMŽ, 2021), na temelju terenskih inspekcija, s danom 16. srpnja 2021. ukupno je na području Sisačko-moslavačke županije prijavljeno 39891 oštećenih objekata od kojih je 4663 potpuno neupotrebljivo, a njih 4522 traži hitne intervencije. U Markušić i sur. (2021) prikazana je statistika oštećenja koja kaže da je od prijavljenih građevina s oštećenjima čak njih 13% stupnja 4 ili 5 (DG4 - vrlo teško oštećeno; DG5 - potpuno uništeno), njih oko 22% stupnja 3 (DG3 - znatna do teška šteta) te preostalih oko 65% ih je stupnja 2 ili 1 (DG2 - osrednja oštećenja; DG1 - neznatna do slaba šteta). Većina građevina koje su pretrpila oštećenja stupnja 4 ili 5, izgrađena je prije 1964., odnosno prije nego su postojale ikakve norme o protupotresnoj gradnji. Većina takvih građevina bila je s 2 ili 3 kata, građena bez ojačanja te s drvenim podovima. Na slici 4.5 vidljiva je prostorna distribucija građevina sa stupnjem oštećenja 4 ili 5 građenih do potresa u Skopju 1963. No nisu teška oštećenja pretrpile samo građevine izgrađene prije 1964., nego i nekolicina onih izgrađenih u periodu između 1964. i 1998. Oštećenja stupnja 3 do 5 za građevine građene u tom periodu posljedica su propusta prilikom gradnje. Građevine građene prema standardnim normama protupotresne gradnje pretrpile su ili nikakva, vrlo slaba ili osrednja oštećenja (do DG2).

U ovom potresu su velika oštećenja pretrpile i zgrade vrlo važnog povijesnog i kulturnog značaja, ali i javni objekti od visoke važnosti. Tako su se urušile ili postale potpuno neupotrebljive crkve Svetog Nikole i crkva Svetog Vida u Žažini. Katedrali Uzvišenja Sv. Križa u Sisku je zbog sigurnosnih razloga skinut drveni zvonik, dok su neki dijelovi sisačke bolnice potpuno neupotrebljivi. Najveću štetu pretrpio je centar Petrinje, tj. stara jezgra, u kojoj gotovo niti jedna zgrada više nije upotrebljiva, uključujući škole i vijećnicu.

Konačno, troškovi sanacije nastale štete i obnove su nepojmljivi. Brojni objekti će morati biti potpuno srušeni dok proces tzv. retrofittinga, kao i u slučaju potresa iz ožujka 2020. kraj Zagreba, ima smisla samo za one građevine od najveće povijesne i kulturne važnosti.





Slika 4.5. Prostorna distribucija građevina s oštećenjem stupnja 4 (jako teško oštećene) ili stupnja 5 (srušene građevine) na području: a) Petrinje; b) Gline; c) Siska (Markušić i sur., 2021).

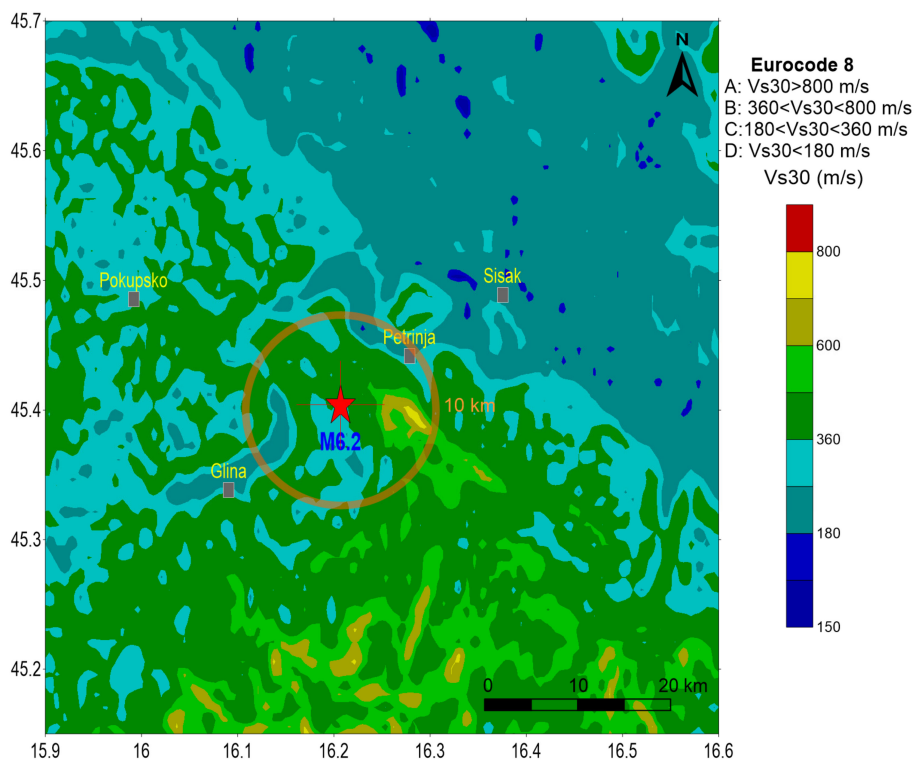
#### 4.3.3. Amplifikacija i lokalni uvjeti tla

Najjači zabilježeni povijesni potres na širem petrinjskom i pokupskom području bio je potres iz 1909. intenziteta VIII °MSC i magnitude 5.8 zbog čega je procijenjeni seizmički hazard ovog područja, u slučaju potresa iz prosinca 2020., podcijenjen. Prema karti seizmičkog hazarda Republike Hrvatske za povratni period od 475 godina (Herak i sur., 2011), procijenjeni  $PGA_{ROCK}$ , tj. vršno ubrzanuje na osnovnoj stijeni, na području Sisačko-Moslavačke županije iznosi 0.16 g. Međutim, u Markušić i sur. (2021) pokazano je da je glavni potres magnitude 6.2 iz prosinca 2020. ostvario  $PGA_{ROCK}$  približno 0.3 g, što je skoro dvostruko više od procijenjene vrijednosti.

Prema zabilježenim pomacima tla (USGS ShakeMap, 2021) procijenjeno je da je vršno ubrzanje tla iznosilo oko 0.5 g u krugu od 5 km od epicentra, 0.2 g na udaljenosti

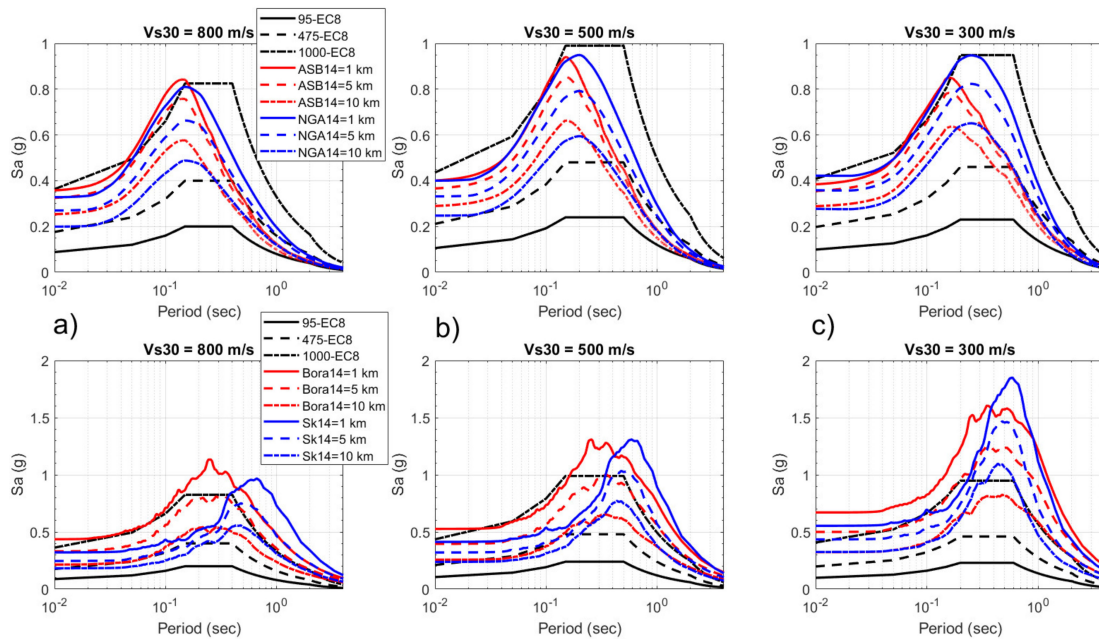


od 20-30 km te oko 0.1  $g$  na udaljenosti od 50 km. Ovi rezultati generirani na stranici USGS-a testirani su i uspoređeni s rezultatima nekoliko modela u Markušić i sur. (2021). Preliminarne analize za glavni potres pokazale su za epicentralno područje u krugu od 1 km relativno dobro slaganje rezultata modela i rezultata iz ShakeMap USGS-a. Prema hrvatskoj atenuacijskoj relaciji  $PGA_{ROCK}$  je procijenjen kao 0.327  $g$ , GMPE modeli su dali 0.317  $g$  (ASB14 model) i 0.298  $g$  (NGA14), dok su RVT modeli za  $PGA_{ROCK}$  dali približno 0.436  $g$  (Bora14) i 0.321  $g$  (Sk20).



Slika 4.6. Prostorna distribucija  $V_{S30}$  aproksimirana na temelju nagiba topografije za šire petrinjsko područje. Zvezdicom je označena lokacija glavnog potresa magnitude 6.2, a narančasta kružnica označava 10 km udaljenosti od epicentra (materijal iz članka Markušić i sur. (2021) preuzet sa stranica USGS-a).

Lokalni amplifikacijski faktor može se procijeniti koristeći linearne i nelinearne amplifikacijske komponente već od prije definirane u GMPE modelima za plitke i aktivne tektonske regije kao funkcije referentnog  $PGA_{ROCK}$  i lokalnog  $V_{S30}$ . Očito je da je prilikom trešnje ovalikih razmjera došlo i do nelinearnih efekata pa se u razmatranju trebaju i oni uzeti u obzir. Prema opažanjima s terena i prema podacima iz bušotina, pokazano je da su gline dominantne u višim slojevima tla ovog područja. Srednje do jako plastične gline se za vrlo jake  $PGA_{ROCK}$  ponašaju linearno te mogu biti barem dvostruko amplificirani, dok je nelinearnost najizraženija u mekšim tlima s dubokim naslagama pijeska i šljunka (Stanko i sur., 2019). Međutim, neki od korištenih modela u članku Markušić i sur. (2021) (Bora14, Sk20) nisu u obzir uzimali nelinearne efekte, nego su pokazali linearnu amplifikaciju pomoću  $V_{S30}$  uključenog u formulaciju modela. Tlo šireg petrinjskog područja procijenjeno je, na osnovu razdiobe  $V_{S30}$  prikazane na slici 4.6, kao tip B i C, definiranih prema Eurokodu-8. Na slici 4.7 prikazana je usporedba EC8-Tip 1 (faktor važnosti 1 označava obične građevine) spektra odziva sa spektrima odziva drugih modela za tri tipa tla kategoriziranih prema Eurokodu-8.



Slika 4.7. Usporedba EC8-Tip 1 spektra baziranog na hrvatskim kartama seizmičkog hazarda za povratne periode od 95 (0.08  $g$ )-, 475 (0.16  $g$ )- i 1000 (0.33  $g$ ) godina sa spektrima odziva GMPE-a iz ASB14 i NGA14 globalnih modela (gornji red) te s RVT spektrom iz Bora14 i Sk20 modela (donji red). Razmatrale su se sljedeće kategorije tla: a) 800 m/s (EC8-A), b) 500 m/s (EC8-B) i c) 300 m/s (EC8-C) na udaljenostima od po 1 km, 5 km i 10 km od epicentra (Markušić i sur., 2021).

Na slici 4.7 jasno se vidi da spektri odziva bazirani na RVT modelima pokazuju značajno više spektralne akceleracije u usporedbi s GMPE i EC8 spektrima za srednje do duge periode te sa sličnim ponašanjem unutar povratnog perioda od 1000 i 475 godina. Za meka tla kategorije C prema EC8 GMPE spektri za povratna razdoblja od 475 i 1000 godina pokazuju nelinearnost tla za periode između 0.1 i 0.4 s. Upravo ova usporedba prikazana na slici 4.7 ukazuje na veliku važnost korištenja Eurokod-8 normi pri protupotresnoj gradnji kako bi se šteta pri jakim potresima minimalizirala.

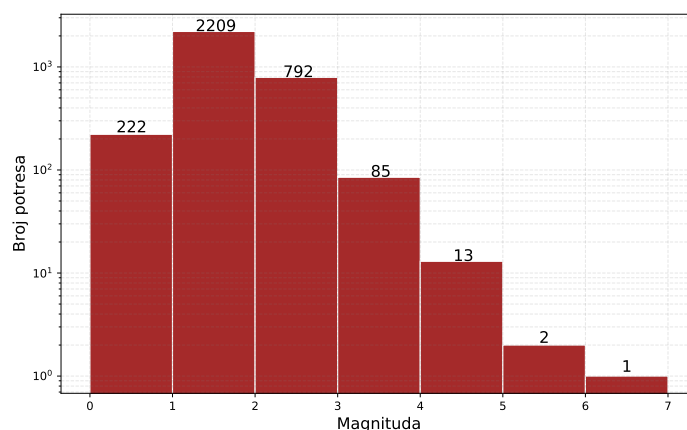
Kako prije glavnog potresa nije postojao niti jedan akcelerograf u blizini epicentra, ne može se odrediti točan omjer  $PGA$  na osnovnoj stijeni i  $PGA$  lokalnog tla, no amplifikacija se ipak procijenila iz modela. Prema nelinearnim GMPE modelima amplifikacija je bila između 1.1 i 1.3, dok je u linearnim modelima procijenjena između 1.2 i 1.8. Na osnovu dostupnih podataka, u Markušić i sur. (2021) je zaključeno da su konačne vrijenosti  $PGA$  lokalnog tla bile između 0.4 i 0.6  $g$ , ovisno o karakteristikama lokalnog tla i udaljenosti od epicentra. Kao i u slučaju potresa iz ožujka 2020. kraj Zagreba, pomoću empirijske jednadžbe koja povezuje vlastiti period s visinom objekta ( $T = 0.016H$ ), u Markušić i sur. (2021) je izračunata visina objekata kojima je rezonancija bila najizraženija tijekom trešnje 29. prosinca 2020. Tako je pokazano da je do rezonantnih efekata došlo za građevine i obiteljske kuće s jednim do tri kata, dok je prilikom Zagrebačkog potresa to slučaj bio za tri do četiri kata na tlu tipa B1, odnosno četiri do petnaest katova na tlu tipa C1.

#### 4.4. Podaci i metode

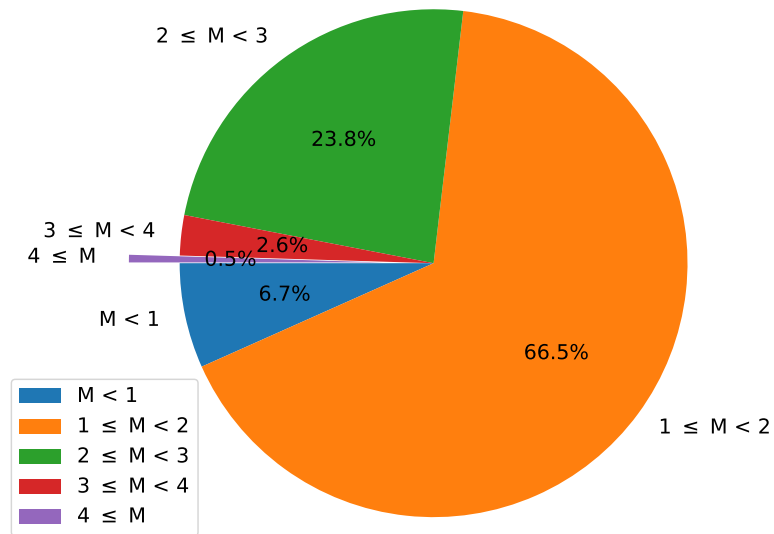
Za potrebe analize serije potresa kraj Petrinje koja je započela u prosincu 2020. korišten je katalog od 28. prosinca 2020. do 14. veljače 2021. S obzirom na broj potresa i opsežnost posla potpunjavanja kataloga, potresi u katalogu do 31. prosinca očitani su ručno, uključujući i one potrese od 4. siječnja 2021. Većina ostalih potresa očitana je automatski te se korekcija tih podataka još čeka. Jedan od problema automatski lociranih potresa jest dubina, s obzirom da se, u ovom slučaju, većinom dubina hipocentra postavi na 10 km, što treba uzeti s rezervom i kao vrlo vjerojatno netočnu informaciju.

Također, kao i u slučaju serije potresa iz ožujka 2020. kraj Zagreba, u daljnju analizu se nisu uzimali oni potresi kojima je dubina 0 km ili preko 20 km. Potresi na površini, ili neposredno ispod, vjerojatno su posljedica neprecizno lociranih pogrešaka, na primjer za one potrese manjih magnituda čiji se signal teže razaznaje u šumi potresa značajnijih magnituda. Oni plići i puno raspršeniji potresi naknadno su se uklanjali u analizi. Ako se uzme okvirna pretpostavka da je termalni gradijent oko  $30\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  (Tomljenović, osobno priopćenje - prema podacima iz bušotine *Sisak-1*), stijene su na dubini od oko 20 km (ili čak od 18 km), pa nadalje, već duktilne. Iako postoji veliki broj hipocentara na dubinama ispod 20 km, velika većina potresa je ipak s hipocentrima do 20 km, što je onda tako i uzeto za daljnju analizu.

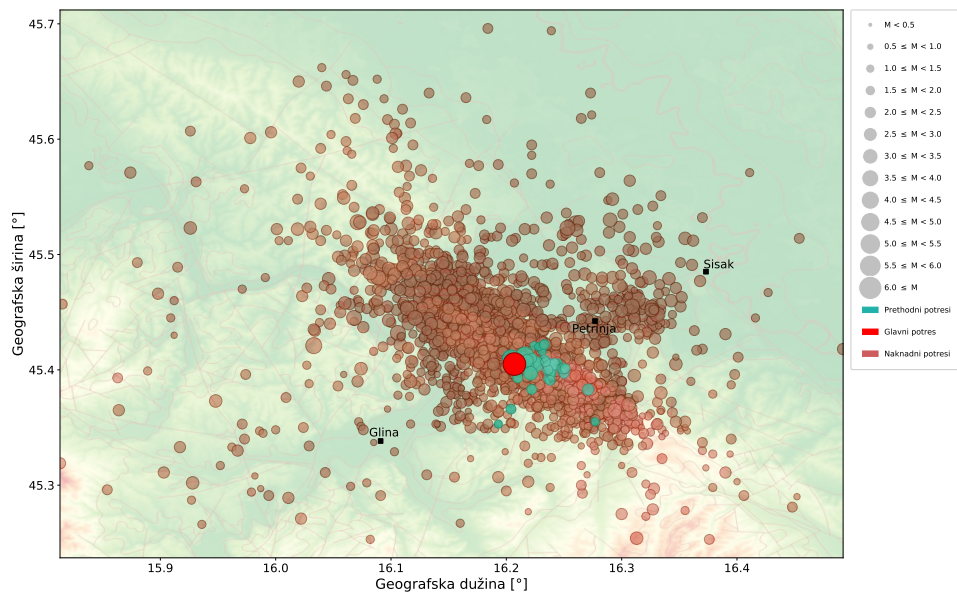
Osim dubinskih ograničenja, u analizi ove serije potresa ograničilo se na one potrese čiji su se epicentri nalazili u prozoru veličine približno  $55\text{ km} \times 50\text{ km}$  ( $\phi_{max} = 45.7\text{ }^{\circ}\text{N}$ ;  $\phi_{min} = 45.25\text{ }^{\circ}\text{N}$ ;  $\lambda_{max} = 16.5\text{ }^{\circ}\text{E}$ ;  $\lambda_{min} = 15.8\text{ }^{\circ}\text{E}$ ). Od 3917 potresa u korištenom katalogu za navedeno razdoblje, 3256 ispunjavaju gornje uvjete. Na slici 4.8 prikazana je raspodjela tih potresa prema intervalima magnituda, a na slici 4.9 prikazan je udio potresa određenih intervala magnituda u ukupnom broju potresa. Prostorna razdioba epicentara prikazana je na slici 4.10. Treba imati na umu da ovaj katalog još uvijek nije potpun i da je, primjerice, potresa magnitude ispod 1 bilo puno više nego što je ovdje prikazano (automatski locirani potresi su potresi magnituda preko 1). Sve daljnje analize provodit će se nad ovim skupom podataka.



Slika 4.8. Broj potresa po intervalima magnituda za korišteni preliminarni katalog Petrinjske serije potresa od 28. prosinca 2020. do 14. veljače 2021. godine.

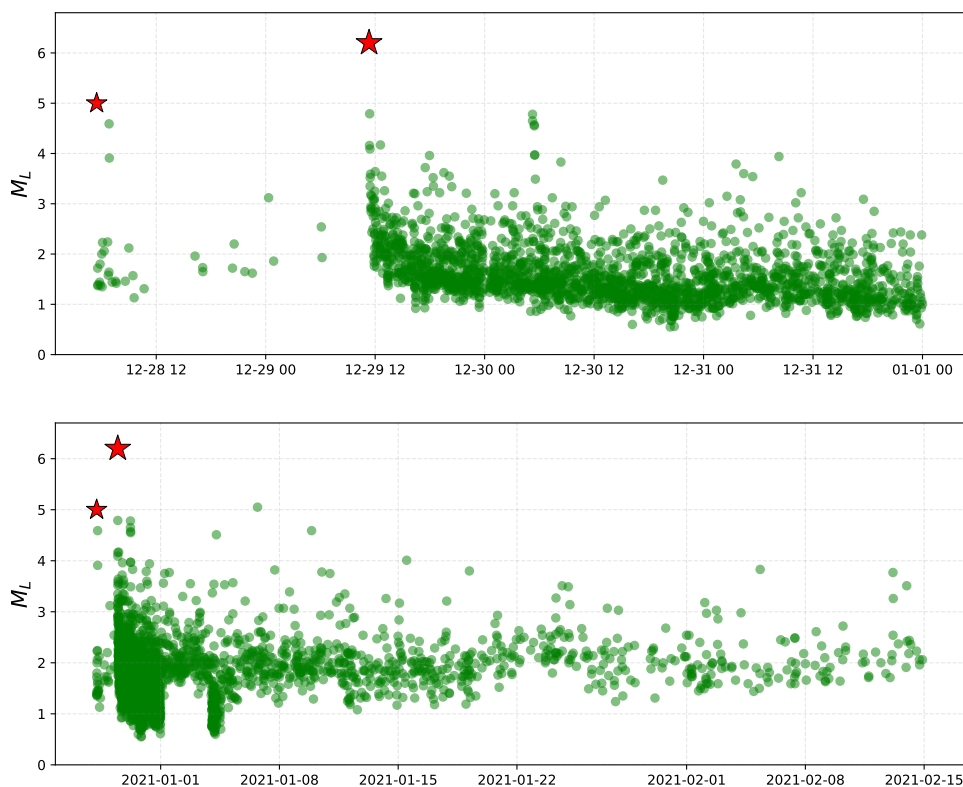


Slika 4.9. Postotak potresa po intervalima magnituda za korišteni preliminarini katalog Petrinjske serije potresa od 28. prosinca 2020. do 14. veljače 2021. godine.



Slika 4.10. Prostorna razdioba epicentara potresa iz preliminarinog kataloga Petrinjske serije potresa od 28. prosinca 2020. do 14. veljače 2021. godine.

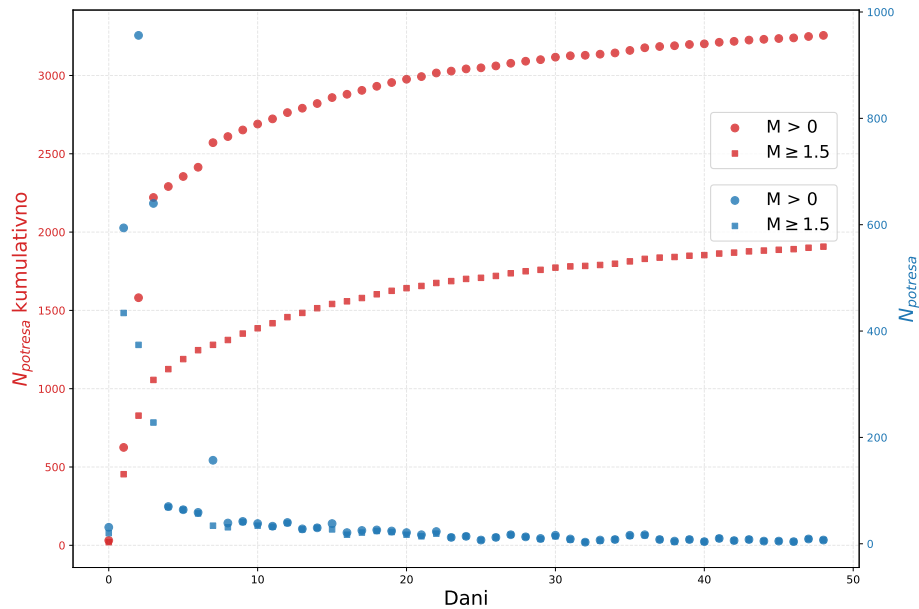
Pokazalo se da su scenariji u kojem sa aktivira više rasjeda puno češći od onog da se aktivira samo jedan. S obzirom na složenosti problema, a i neznanja koliki dio akumulirane elastične energije se doista oslobodio tijekom jačih potresa ove serije, pojava naknadnih potresa je česta i očekivana. Kao i u slučaju Zagrebačke serije potresa, i za Petrinjsku seriju potresa želimo vidjeti koji rasjedi i u kojoj mjeri su se aktivirali.



Slika 4.11. Magnitude potresa po danima od početka serije 28. prosinca 2020. Manjom crvenom zvijezdom označen je prvi prethodni potres ( $M_{5.0}$ ), a većom crvenom zvijezdom označen je glavni potres ( $M_{6.2}$ ). Gore: sekvenca do 31. prosinca 2020. koja je u potpunosti ručno očitana; Dolje: potresi do 14. veljače 2021. među kojima su i potresi očitani automatski.

Na slici 4.11 prikazane su magnitude potresa od 28. prosinca 2020. do 14. veljače 2021. Kako je zbog opsežnosti posla ručnog lociranja potresa katalog upotpunjen automatski lociranim potresima, katalog nakon 1. siječnja 2021. prikazuje samo potrese magnitude veće od 1. Svi slabiji potresi tek će se kasnije očitati i uvrstiti u katalog. Na gornjoj slici prikazan je samo period do 31. prosinca 2020., jer je taj period potpuniji te sadrži sve ručno locirane potrese. Iako slika još uvijek ne prikazuje sve potrese, posebice one slabije, lijepo se vidi kako magnitude potresa s vremenom opadaju. U nadopunu ovome grafu valja promotriti i graf na slici 4.12 koja prikazuje broj potresa

po danima, ali i njihov kumulativni broj. Na ovome grafu prikazani su svi potresi iz kataloga, ali i samo oni potresi kojima je magnituda preko 1.5. Iz grafa se može lijepo uočiti da broj potresa u danu s vremenom opada kao i otupljivanje kumulativne krivulje, tj. njen monotoni i više ne toliko strmi rast. Ovi prikazi mogu ukazati na ustabiljavanje aktiviranog rasjeda iako će seizmičnost na tom području potrajati još mjesecima, ako ne i godinama.



Slika 4.12. Ovisnost broja potresa u danima nakon glavnog potresa 29. prosinca 2020. Crveno su kumulativne vrijednosti (crvena skala na lijevoj ordinati), a plavo su brojevi potresa po danima (plava skala na desnoj ordinati). Kružićima su prikazani svi potresi iz kataloga (magnituda preko 0), dok su kvadratićima prikazani samo oni potresi magnituda preko 1.5.

Potresi Pokupske serije do 14. veljače 2021. selektirani su i statistički obrađeni u programskom jeziku *Python* u kojem je i izrađen *time-lapse* epicentara. Za strukturno modeliranje rasjeda koristio se softver MOVE pod akademskom, nekomercijalnom licencom. Za rad u MOVE-u podaci su prilagođeni u besplatnom softveru QGIS. Samo modeliranje provelo se pomoću IDW (engl. *Inverse Distance Weight*) determinističke metode interpolacije za odabrani skup hipocentara, gdje težina pojedinog ovisi o recipročnoj udaljenosti od inicijalno pretpostavljene rasjedne ravnine.

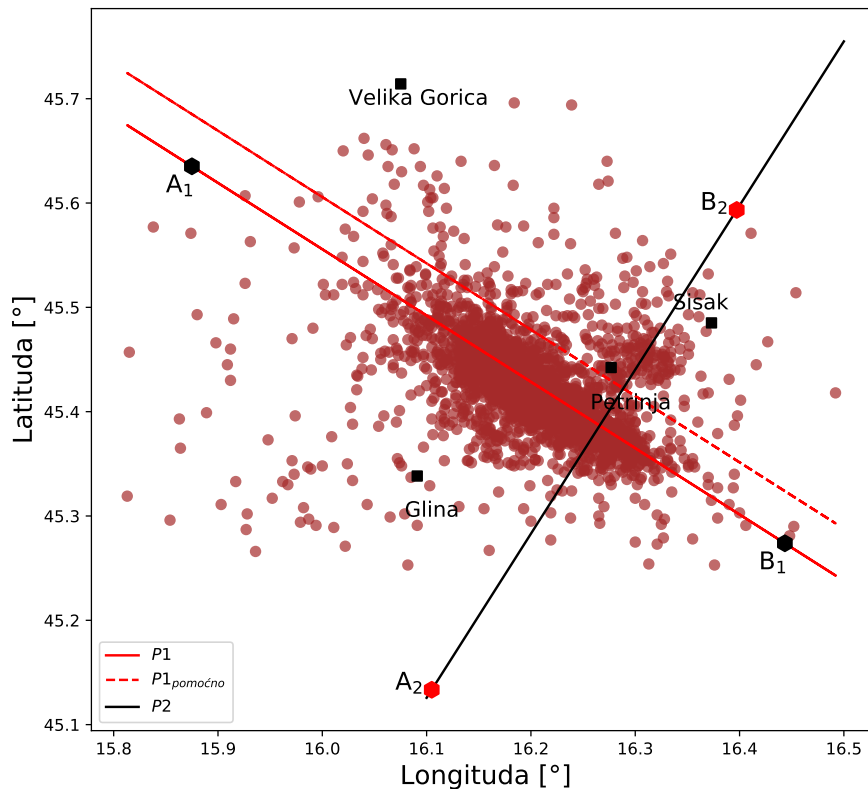
## 4.5. Rezultati i diskusija

Petrinjska serija potresa započeta 28. prosinca 2020. po mnogočemu je zanimljiva: od samog režima glavnog seizmogenog rasjeda koji mijenja poimanje rasjednog sustava ovog područja pa do vremenske evolucije potresa. U ovom potpoglavlju prikazat će se rezultati strukturnog modeliranja aktiviranih rasjeda, ali će se razmotriti i vremenska evolucija potresa koja bi trebala dati bolji uvid u prirodu ove serije potresa.

Epicentri potresa koji su se dogodili između 28. prosinca 2020. i 14. veljače 2021. prikazani su na *time-lapseu* s korakom od 2 sata (Dodatak E), no kako se glavnina potresa zapravo dogodila u prva dva dana serije, izrađen je i *time-lapse* za prva dva dana s korakom od 10 minuta (Dodatak F). Iz ovog potonjeg se vidi nastanak prvog prethodnog potresa koji je popraćen s manjom seizmičkom aktivnošću do glavnog potresa koji je zatim pokrenuo puno veću seizmičku aktivnost, puno većih prostornih razmjera. Iz animacije se vidi da se prvo potresna aktivnost nakon glavnog potresa proširila sjeverozapadno od glavnog potresa, a zatim jugoistočno što je zanimljivo jer je glavnina prethodnih potresa bila upravo jugoistočno od epicentra glavnog. Također, iz ove animacije se može primijetiti da rasjedanje nije u istom smjeru prije i nakon glavnog potresa. Drugim riječima, prije glavnog potresa se nazire rasjedanje u smjeru SI-JZ, dok je rasjedanje nakon glavnog potresa u smjeru SZ-JI što može ukazati na to da je aktivnost Pokupskog rasjeda bila potaknuta aktivnošću nekog sekundarnog rasjeda (vjerojatno Petrinjskog). Imajući na umu ovu teoriju, potresna aktivnost prethodnih potresa ne ukazuje na postojanje barijere na Pokupskom rasjedu, koja je u prvom danu serije predstavljala otpor značajnije rasjedanju, nego upravo aktivnost, vrlo vjerojatno, Petrinjskog rasjeda.

Epicentri potresa iz dostupnog kataloga prikazani su na slici 4.13. Već na prvi pogled se lako može primijetiti dvije grupe epicentara koje približno upućuju na lokaciju rasjeda. Kroz epicentralno područje povučena su dva profila: *Profil 1* (*P1* na slici označen crveno) i *Profil 2* (*P2* na slici označen crno). *Profil 1* povučen je tako da približno prati pružanje rasjeda na kojem je nastala glavnina potresa te su na njega projicirani svi epicentri tako da je s *A1* označen najsjeverniji epicentar na profilu, a s *B1* najjužniji. Analogno tome, kroz manju grupu epicentara povučen je *Profil 2* tako da siječe *Profil 1* okomito. Na *Profil 2* su također projicirani isti epicentri tako da je sad početna i najjužnija točka *A2*, a konačna i najsjevernija točka *B2*. Na slici je povučen i pomoćni profil označen crvenom isprekidanom linijom, tako da je paralelan s *Profilom 1* te da približno odvaja ove dvije grupe epicentara. Kako bi se pokušao otkriti karakter sporedno aktiviranog rasjeda, koji je pobudio ovu manju sjeveroistočniju grupu epicentara, razmatra se *time-lapse* (Dodatak G) hipocentara potresa koji su se dogodili do 1. siječnja. Ovi hipocentri projicirani su na oba profila te je animirana njihova pojavnost kroz navedeno vrijeme s vremenskim korakom od 10 minuta. Pomoćnim profilom sa slike 4.13 potresi su razdvojeni tako da su crvenom bojom označeni potresi na glavnom, a plavom bojom oni na sporednom rasjedu. U prikazu su isključeni automatski očitani potresi kojima je dubina fiksirana na 10 km.

Na desnom prikazu animacije, koji predstavlja projekciju hipocentara na *Profil 2* približno okomit na pružanje Pokupskog rasjeda, može se jasnije uočiti grupacija, no u usporedbi s prikazom na lijevoj strani teže se odlučiti radi li se o sporednom rasjedu okomitom na Pokupski ili paralelno njime.



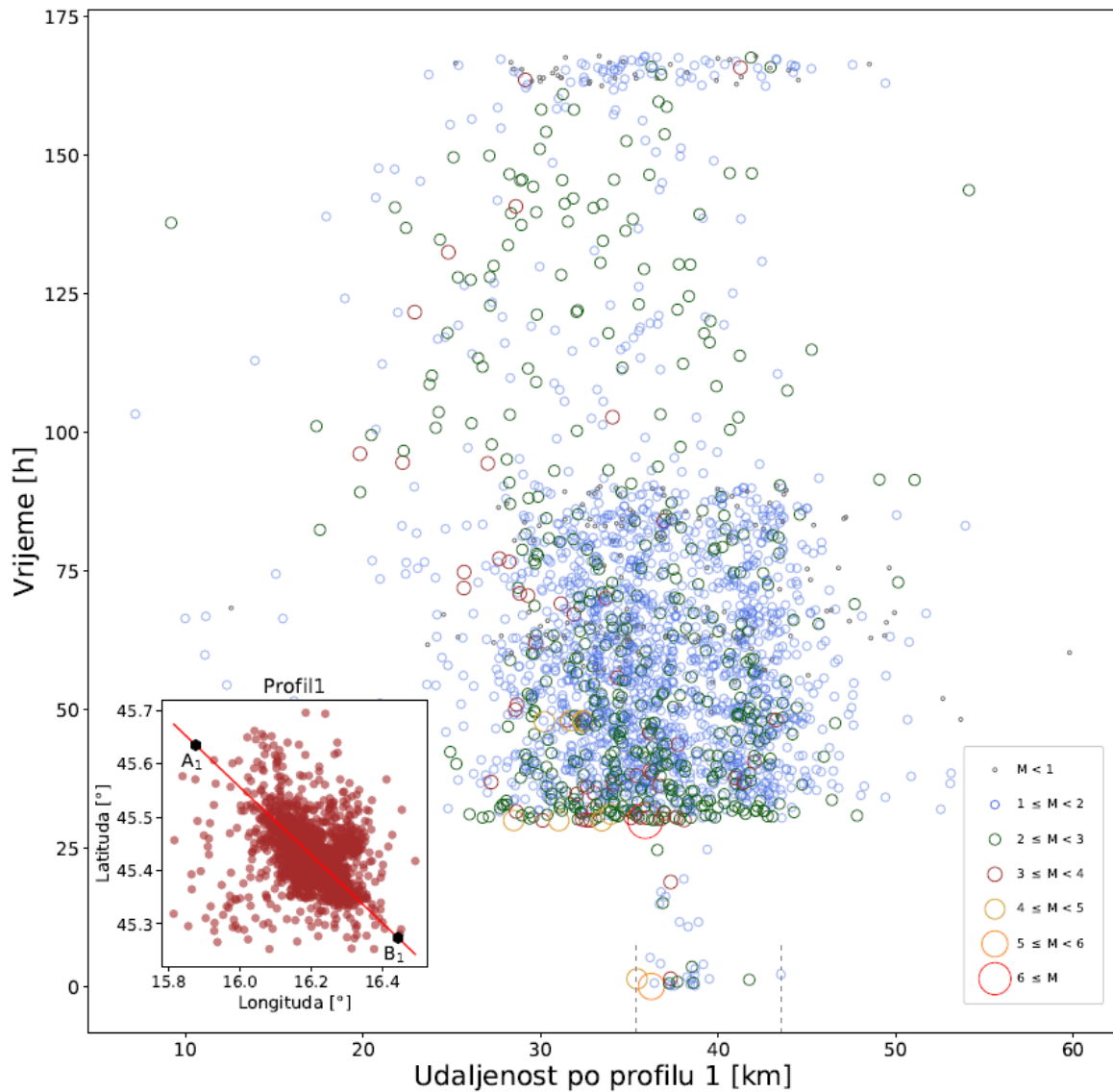
Slika 4.13. *Profil 1* (puna crvena linija) povučen je tako da približno prati Pokupski rasjed; *Profil 2* (puna crna linija) povučen okomito na *Profil 1* tako da prolazi kroz grupu epicentara koji odstupaju od Pokupskog rasjeda. Crvenom isprekidanom linijom prikazan je pomoćni profil paralelan *Profilu 1* tako da približno odvađa ove dvije grupe epicentara.

Nadalje, s obzirom da *Profil 1* približno prati glavni rasjed, na isti su projicirani epicentri kako bi se razmotrila njihova vremenska evolucija duž profila, tj. njihova pojavnost u vremenu. Po profilu su se računale udaljenosti između projekcija epicentara na profil počevši od najsjevernije točke prema najjužnijoj. Na slici 4.14 prikazana je vremenska evolucija epicentara po profilu po satima u prvih 7 dana serije. Iz slike se može zaključiti da se na početku serije potresom magnitude 5 aktiviralo područje približno 7 km duljine. Neposredno nakon prvog potresa je uslijedio manji broj slabijih potresa uključujući i potres magnitude 4.6 nakon čega se aktivnost rasjeda naizgled smanjila. Nakon približno 30 sati je uslijedio glavni potres koji je značajno pobudio aktivnost na oko 25 km duž rasjeda (profila). Epicentar glavnog potresa gotovo je na istom mjestu gdje je epicentar prvog potresa magnitude 5.0, na udaljenosti manje od 7 km od Petrinje. Razrjeđivanje događaja na otprilike 90 sati (skoro 4 dana) nakon prvog potresa serije posljedica je na prelazak s ručno na manji broj automatski očitanih potresa u dostupnom katalogu.

Ono što je zapravo čudno jest slabija potresna aktivnost nakon vrlo jakog prvog potresa, a prije glavnog potresa. Postoji pretpostavka da je postojala barijera koja



je priječila daljnje rasjedanje, no onda bi bilo za očekivati da će ipak biti više slabijih potresa. Druga pretpostavka (potkrijepljena zaključcima iz animacije za prva dva dana serije) jest da je upravo aktivnost na sekundarnom rasjedu potaknula aktivnost Pokupskog rasjeda na kojem se dogodio glavni potres. Dalje će se prikazati strukturno modeliranje rasjeda te će se probati argumentirati postojanje pojedinog rasjeda u modelu.

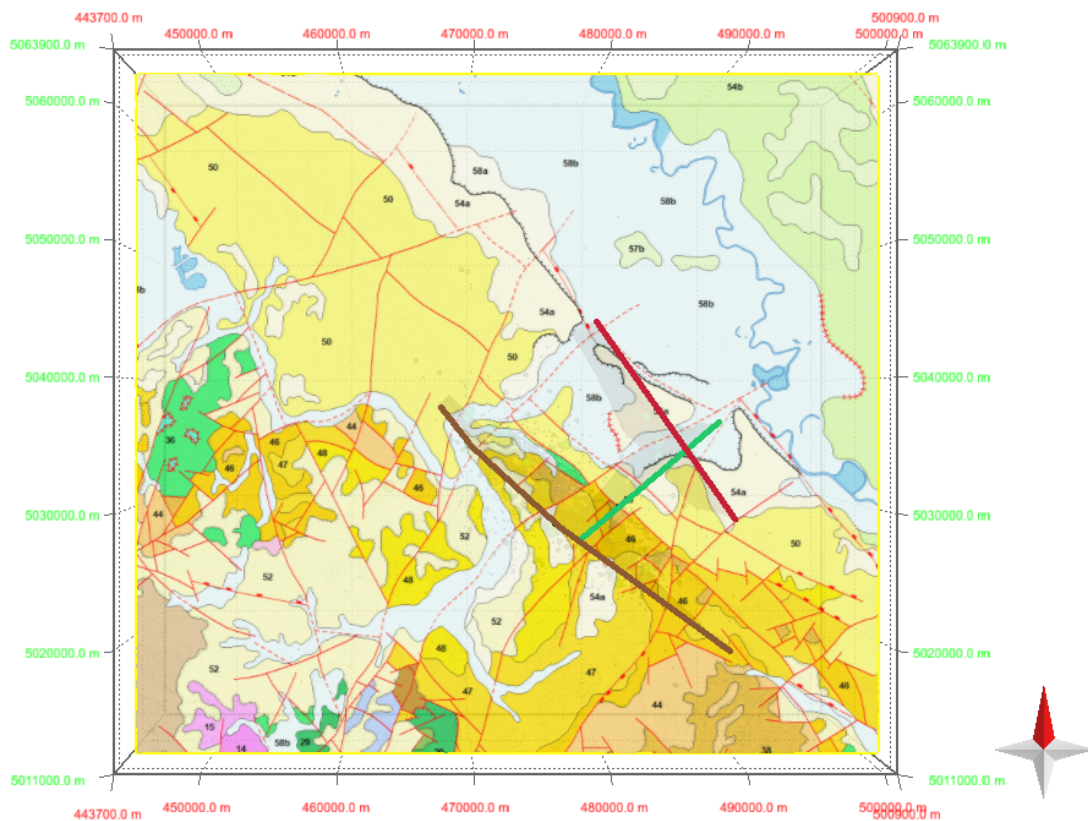


Slika 4.14. Vremenska evolucija potresa projiciranih na *Profil 1* u prvih tjedan dana serije.  $A_1$  početna je i najsjevernija projekcija epicentra,  $B_1$  je krajnja u najjužnija projekcija epicentra na *Profil 1*. Veličina kružnica odražava magnitudu potresa.

#### 4.5.1. Strukturno modeliranje Pokupske serije potresa

Iz prostorne razdiobe hipocentara potresa Petrinjske serije s kraja 2020. godine, u periodu između 28. prosinca 2020. i 14. veljače 2021., strukturno su modelirane rasjedne ravnine koje približno opisuju aktivirane rasjede, odnosno aktivne dionice rasjeda i

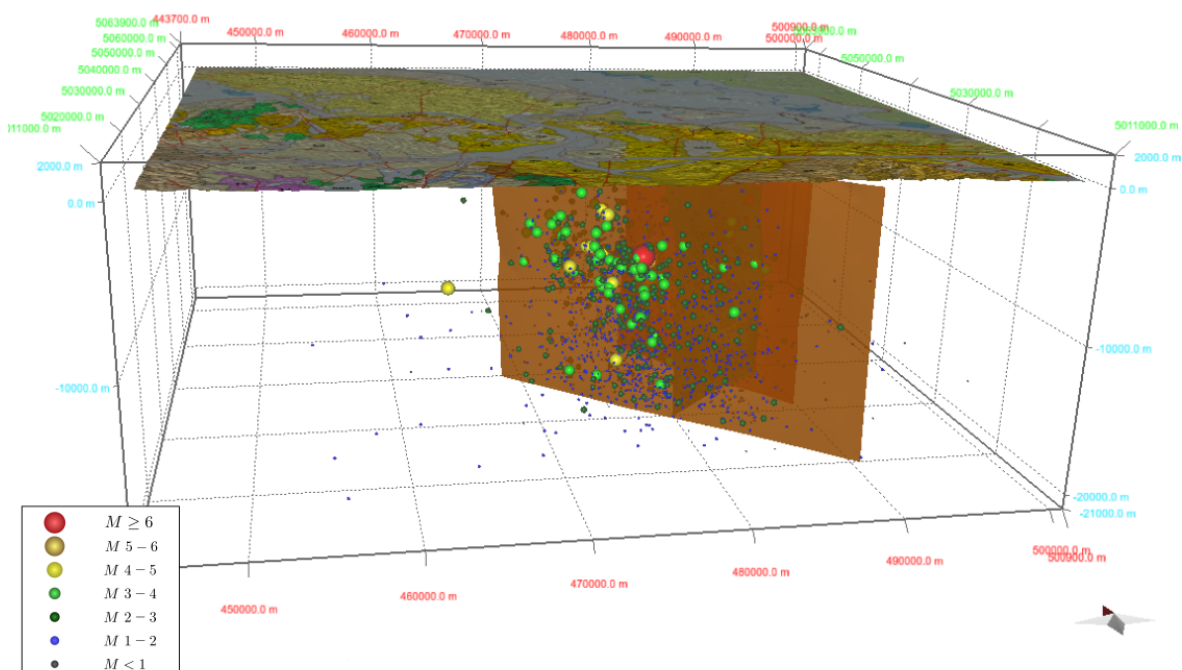
manjih struktura (Dodatak D). U analizi su zanemareni hipocentri potresa lociranih automatski zbog njihove fiksirane dubine na 10 km što može biti zavaravajuće. Zadržani su samo oni automatski očitani potresi koji se nalaze unutar uže grupiranih hipocentara s pretpostavkom da im je površinska projekcija, odnosno epicentar, korektan. Na slici 4.15 prikazane su površinske projekcije modeliranih rasjeda.



Slika 4.15. Projekcija modeliranih slijepih rasjeda na površinu. Smeđe označen je *Rasjed 1 - Pokupski*, zeleno *Rasjed 2 - vjerojatno Petrinjski*, crveno *Rasjed 3*. U pozadini slike geološka je karta (GK 1:300000) čiji su elementi opisani na slici 3.1.

*Rasjed 1* na slici 4.16 označen smeđom bojom jest rasjed koji akomodira glavninu hipocentara ove serije potresa uključujući i one potrese najvećih magnituda. Ovaj rasjed modeliran je na osnovu 231 hipocentara. Modelirani rasjed (prikazan na slici ispod) prati pružanje Hrastovičke gore s azimutom pružanja  $132^{\circ}$  (SZ-JI) te je subvertikalna s nagibom od  $85^{\circ}$ . S obzirom da ovaj rasjed akomodira i glavni potres magnitude 6.2, modelirani parametri mogu se usporediti sa žarišnim mehanizmom izračunatim na temelju prvih nailazaka P valova ovog potresa. Prema žarišnom mehanizmu za glavni potres seizmogeni rasjed je azimuta pružanja  $130^{\circ}$  i nagiba  $84^{\circ}$  što se vrlo dobro slaže s parametrima dobivenim u strukturnom modelu. U sjeverozapadnom dijelu rasjeda, gdje se ipak dogodio nešto manji broj potresa čini se da ti hipocentri počinju blago naginjati prema jugozapadu što može uputiti na izmjenu karaktera rasjeda u tom dijelu. Kako u tom dijelu postoji samo nekolicina hipocentara koji su mahom manjih magnituda (do 3), nije se pokazalo značajnim za daljnje modeliranje. Dakle, upotpunjeno žarišnim mehanizmom, može se zaključiti da je glavni seizmogeni rasjed ove serije potresa upravo subvertikalni rasjed s desnim pomakom po pružanju. Također, iz *time-lapsea* (Dodatak F), koji obuhvaća prva dva dana serije, može se zaključiti da

se nakon glavnog potresa rasjedanje prvo pokrenulo prema sjeverozapadu, a tek onda prema jugoistoku.

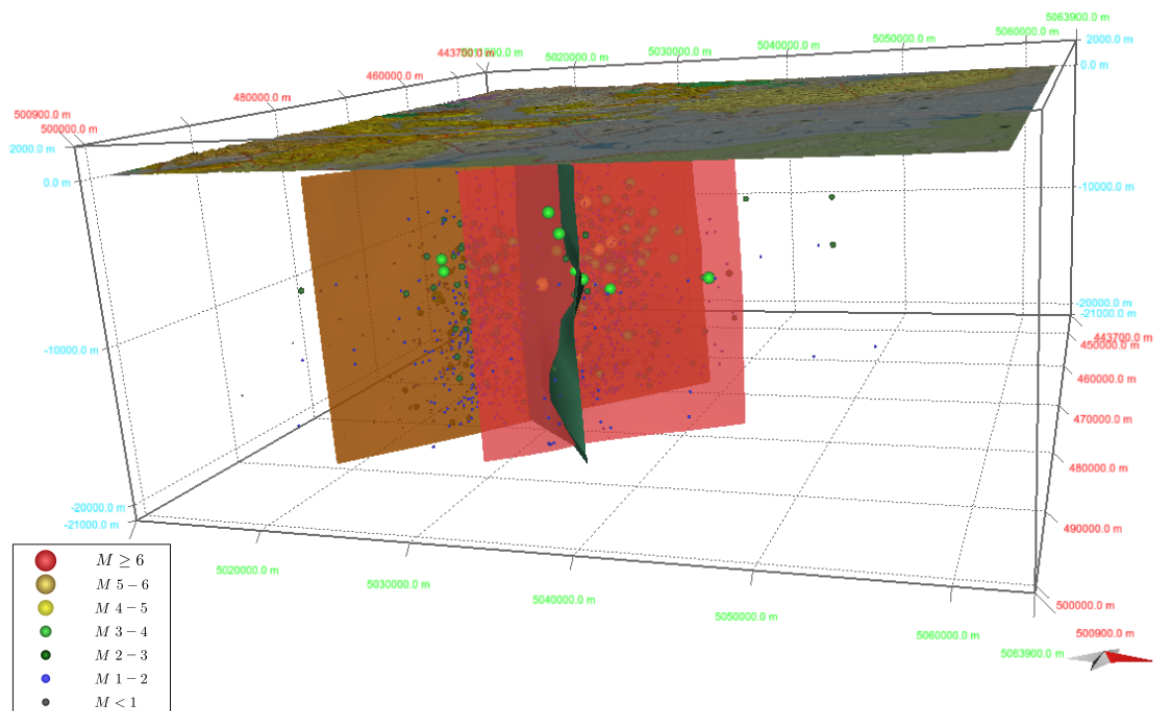


Slika 4.16. *Rasjed 1 - Pokupski* (smeđe) modeliran na osnovu 231 hipocentara. Azimut pružanja je  $132^\circ$ , a nagib  $85^\circ$ . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

Ono što se može primijetiti jest to da se površinska projekcija ovog rasjeda ne poklapa s oštrom granicom između pliocenskih glina i pijesaka te miocenskih vapnenaca i lapora što se na geološkoj karti interpretiralo kao Pokupski rasjed. Odstupanje modeliranog rasjeda od prikazanog Pokupskog rasjeda može imati nekoliko tumačenja. Prvo jest to da je geološka karta vrlo pojednostavljena te ne mora nužno točno pratiti strukture kakve one u stvarnosti i jesu. Geološka karta izrađena je na osnovu opažanja na površini ili na osnovu istraživanja plićih slojeva, a rasjed koji se nalazi na većoj dubini vjerojatno postoji u sasvim drugačijem i krućem materijalu. Čim se spomene dubina rasjeda, prirodno se nastavlja i na diskusiju izdanjuje li taj rasjed na površinu ili je on pak slijep. Postoje različita mišljenja o spornim površinskim manifestacijama ovog rasjeda. U području krućih miocenskih vapnenaca duž pružanja rasjeda opažene su površinske rupture, dijelom na cestama i nasipima, ali dijelom i na zabačenim lokacijama (npr. šumama), gdje ne postoji infrastruktura. U sjeverozapadnom dijelu rasjeda, gdje su tlo većinom već plastični i vodom zasićeni pliocenski pijesci i gline, nisu zapažene nikakve značajne površinske rupture. U prilog površinskoj manifestaciji rasjeda dakako idu površinske rupture u područjima gdje se rasjedni sustav zaista prostire, dok s druge strane u prilog tome da rasjed ne doseže do površine ide to da su te rupture ipak lokalizirane. Ovaj problem će svakako i dalje biti predmet rasprave u geološkoj struci. Nadalje, drugi razlog nepoklapanja geološki ucrtanog i modeliranog rasjeda može biti to što se zapravo do ove serije potresa smatralo da je Pokupski rasjed

reversni. U Herak i Herak (2010) je izračunat žarišni mehanizam potresa kraj Pokupskog iz 1909. koji upućuje na strmi reversni rasjed s desnim pomakom. S obzirom na seizmogramе onog doba, samo računanje žarišnog mehanizma iz prvih nailazaka P valova bio je dosta zahtjevan i skoro nemoguć posao tako da je vrlo moguće da se zapravo i tadašnji potres dogodio na desnom *strike-slip* rasjedu. S obzirom da je potres od 29. prosinca 2020. najjači zabilježen potres ovog područja koji se k tome dogodio i na *strike-slip* rasjedu za koji se smatralo da ne postoji na ovim područjima, a drugi po jačini poznati potres (iz 1909.) je bio na samim počecima instrumentalnih mjerenja, zbog nedostatka drugih događaja moglo se vrlo lako krivo interpretirati rasjede ovih područja.

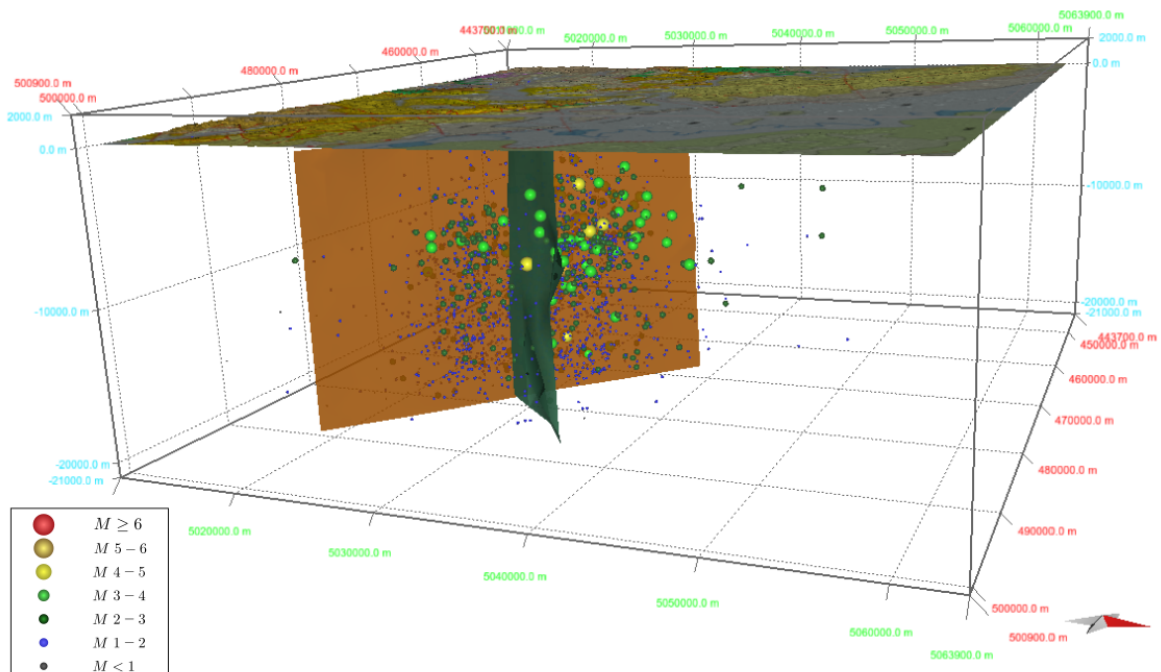
Čak i iz prostorne razdiobe epicentara se može lijepo vidjeti da se, uz epicentre koji prate glavni rasjed, pojavila mala grupa epicentara sjeveroistočno od glavnog potresa i Pokupskog rasjeda što upućuje na aktivaciju još jednog, vrlo vjerojatno vertikalnog rasjeda. Za tu grupu potresa modelirane su dvije rasjedne ravnine koje bi mogle akomodirati hipocentre tih potresa, a kroz diskusiju će se pokušati argumentirati postojanje pojedinog. Na slici 4.17 prikazana su modelirana ta dva sporedna rasjeda od kojih se jedan (zeleno označen *Rasjed 2*) približno okomit na glavni Pokupski rasjed, dok mu je drugi (crveno označen *Rasjed 3*) približno paralelan. S obzirom da nemamo žarišne mehanizme ovih izmaknutih potresa, pitanje je koji od ta dva rasjeda zapravo opisuje pravi aktivirani sporedni rasjed.



Slika 4.17. *Rasjed 2* (zeleno) moguće *Petrinjski* približno okomit na Pokupski i *Rasjed 3* (crveno) približno paralelan Pokupskom rasjedu. Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

Prisjetimo li se *time-lapseova* i prikaza vremenske evolucije prostorne pojavnosti potresa po povučenom *Profilu 1* između *A1* i *B1*, vidi se zapravo neobičan scenarij

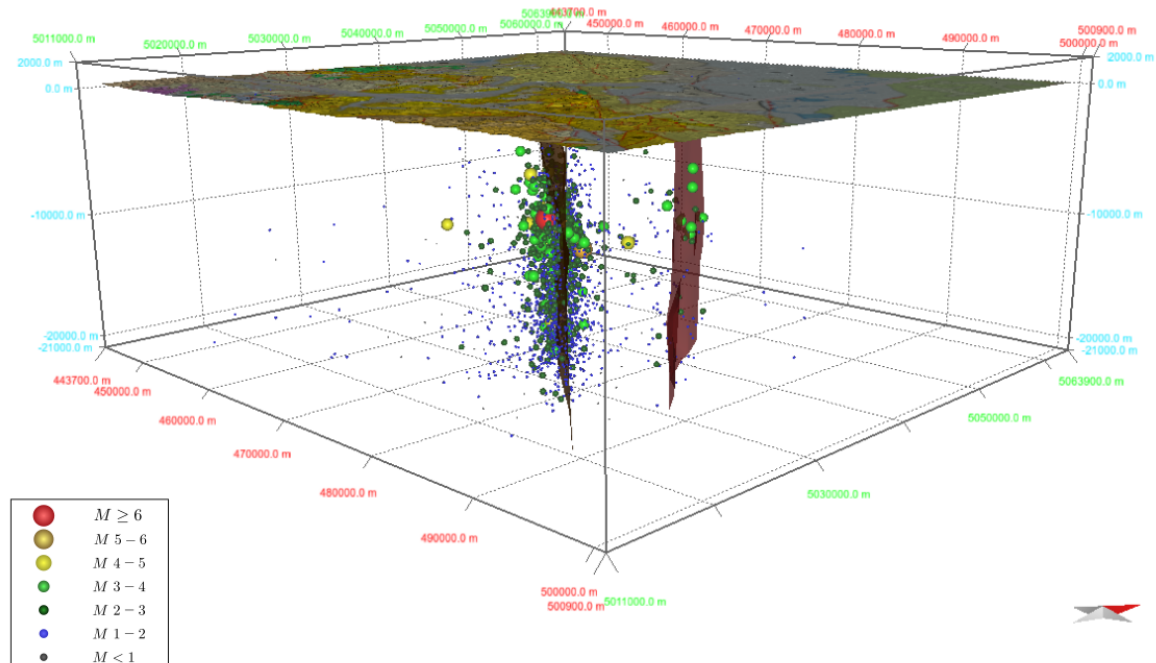
za ovakav tip serije potresa. Kako je i opisano u Ross i sur. (2019), scenariji u kojem se posljedično aktivira više rasjeda puno su češći od onoga u kojem se aktivira samo jedan. Konkretno u seriji potresa kraj Ridgecresta opisano u (Ross i sur., 2019) aktivirao se rasjed okomit na Little lake rasjedni sustav potresom momentne magnitude 6.4. Nakon 34 sata uslijedio je glavni potres momentne magnitude 7.1 koji se dogodio sada na okomitom Little lake rasjednom sustavu. Očito je da je u ovom slučaju aktivnost manjeg rasjeda pobudila aktivnost većeg, njemu okomitog rasjeda. U vidu toga možemo pokušati razmatrati i našu, Petrinjsku seriju potresa. Nije neuobičajeno da prije glavnog potresa prethodi niz slabijih prethodnih potresa, ali kada se dogodi prethodni potres koji je k tome i jak (magnitude 5.0 u slučaju Petrinjske serije potresa) očekuje se da će on biti popraćen s dodatnom seizmičkom aktivnosti kao što je to primjerice bilo kraj Ridgecresta (Kalifornija, SAD). Nakon prvog i izrazito jakog prethodnog potresa, u periodu od približno 30 sati do glavnog potresa dogodilo se samo oko 40 potresa. U slučaju da je doista postojala nekakva barijera koja je predstavljala otpor daljnjem rasjedanju, svejedno bi ipak bilo više slabijih potresa zbog proklizavanja po rasjednim asperitima. Zbog toga postoji ideja da je možda aktivnost glavnog Pokupskog rasjeda upravo prouzrokovala prethodna aktivnost njemu okomitog, vjerojatno Petrinjskog rasjeda. Zbog toga se modelirao na slici 4.18 zeleno prikazan *Rasjed 2*. S obzirom da je Pokupski rasjed desni, ovaj Petrinjski *Rasjed 2* je lijevi kao konjugirani par Pokupskom rasjedu. Rasjed je modeliran na osnovu 34 hipocentara, azimuta je pružanja  $48^\circ$  zbog lijevog pomaka te je nagiba  $89^\circ$ . Ovaj rasjed prolazi kroz sjeveroistočno dislociranu grupu hipocentara te gotovo okomito dolazi na Pokupski rasjed neposredno kraj mjesta gdje su se dogodili prvi prethodni i glavni potres.



Slika 4.18. *Rasjed 2* (zeleno) modeliran na osnovu 34 hipocentara. Azimut pružanja je  $48^\circ$ , a nagib  $89^\circ$ . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

S druge strane, iz prikaza epicentara jasno se vidi da je za tu manju grupu epicentara upravo duža os, što implicira na smjer pružanja rasjeda, skoro paralelna Pokupskom rasjedu. Imajući to na umu, na osnovu 51 hipocentra modeliran je, na slici 4.19, crveno prikazan *Rasjed 3* azimuta pružanja  $143^\circ$  i nagiba  $89^\circ$ . Prema *time-lapseovima* (Dodatak G) i prema prostornoj razdiobi bi se prije zaključilo da je upravo *Rasjed 3* seizmogeni rasjed ove druge skupine potresa. Logično se na tu pretpostavku nameće pitanje kako objasniti slabu seizmičku aktivnost prije glavnog potresa (bez direktne interakcije dva veća rasjeda), ali i to kako se aktivirao taj dislocirani rasjed. U prikazu je teško prepoznati neke manje strukture koje bi možda mogle povezivati Pokupski i ovaj paralelni *Rasjed 3* i time aktivirati i ovaj sporedni rasjed. S obzirom na prostornu razdiobu epicentara, ali i dvodnevni *time-lapse* (Dodatak F), možda se iapak ne može isključiti i mogućnost da su se zapravo aktivirala sva tri rasjeda modelirana u ovom radu. U svakom slučaju se može zaključiti da se ipak radi o dosta kompleksnom sustavu rasjeda nad kojim će biti potrebe raditi daljnja istraživanja kako bi se došlo do preciznijih zaključaka. Od izrazite važnosti je što bolje razumijevanje geodinamike tog područja kako bi se korektnije procijenio seizmički hazard.

Potresi korišteni u analizi preliminarno su analizirani te su time još podložni promjenama. Zanimljivo bi bilo sličnu strukturnu analizu provesti nad dužim i konačnim nizom podataka te također u istraživanje uključiti više disciplina s kojima bismo se možda više primakli odgovoru na problem ovih prostora.



Slika 4.19. *Rasjed 3* (crveno) modeliran na osnovu 51 hipocentara. Azimut pružanja je  $143^\circ$ , a nagib  $89^\circ$ . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

## 5. Zaključak

U ovom radu su u softveru MOVE, pomoću IDW metode, modelirani sustavi rasjeda aktivirani u serijama potresa kraj Zagreba i Petrinje. Serija potresa na području Zagreba započela je 22. ožujka 2020. u 6:24 potresom magnitude 5.3 s epicentrom nedaleko od Markuševca i Čučerja, 7 km od centra Zagreba. Petrinjska serija potresa započela je vrlo jakim potresom magnitude 5.0 28. prosinca 2020. u 6:28, a nakon malo više od jednog dana uslijedio je glavni potres magnitude 6.2 u 12:19. Epicentri glavnog i najjačeg prethodnog potresa ove serije na udaljenosti su manje od 7 km jugozapadno od Petrinje, dok su im hipocentri bili na dubini od približno 9 km. Glavni potres kraj Zagreba intenziteta VII-VIII °MSK te glavni potres kraj Petrinje intenziteta VIII-IX °EMS uzrokovali su velike materijalne štete, puno veće nego bi se potrese ovih magnituda trebali učiniti što je posljedica stare, strukturno slabe gradnje i propusta prilikom izvođenja radova.

Za Zagrebačku seriju potresa modelirana su tri rasjeda koji akomodiraju većinu žarišta potresa, a koji su se dogodili između 22. ožujka i 7. lipnja 2020. Sva tri rasjeda su duboko ukopana, tzv. slijepi rasjedi, koji nemaju manifestacija na površini. *Rasjed 1* ili *primarni* rasjed azimuta smjera pružanja  $243^\circ$  i nagiba  $45^\circ$  modeliran je na temelju 50 žarišta među kojima su i glavni potres i najjači naknadni potresi. Ovaj rasjed dobro se slaže s parametrima dobivenim u računu žarišnog mehanizma za glavni potres koji je i pokazao da se potres dogodio na reversnom rasjedu nagiba prema jug-jugoistoku te on najbliže opisuje Sjeverni rubni medvednički rasjed. *Rasjed 2* vrlo vjerojatno je također reversni rasjed azimuta  $247^\circ$  i nagiba  $62^\circ$  modeliran na temelju 40 hipocentara potresa srednje jačine. Ovaj rasjed približno prati vrhove Medvednice. Posljednje modeliran, pomoću 18 hipocentara, *Rasjed 3* azimuta  $317^\circ$  i nagiba  $55^\circ$  približno je paralelan Kašinskom rasjedu. Na postojanje ovog rasjeda mogu ukazivati i anomalije u prostornoj razdiobi parametra  $V_{S30}$  za B i C tipove tla. Aktivnost ovog rasjeda može ukazati na to da je i Kašinski rasjed još uvijek seizmogen. Zbog samog položaja bi se glavni potres mogao "pripisati" svim trima ravninama, ali analizirani žarišni mehanizam ide u prilog *Rasjedu 1*. Slučajevi u kojima se aktivira više od jednog rasjeda značajno otežavaju procjenu seizmičkog hazarda.

Prema vremenskim prikazima može se zaključiti da se nakon 14. travnja 2020. nisu aktivirali nikakvi novi rasjedi, nego su se svi naknadni potresi događali na već aktiviranim rasjedima. S obzirom da se u prosjeku magnitude naknadnih potresa do 7. lipnja značajno smanjile, za očekivati je da se neki dodatni rasjedi neće ni aktivirati.

Slično kao u Zagrebačkoj seriji, i u Petrinjskoj seriji se aktiviralo barem dva (a moguće i tri), vrlo vjerojatno slijepa, rasjeda. Modeliran je *Rasjed 1* koji akomodira glavninu hipocentara potresa iz kataloga (28. prosinca 2020. - 14. veljače 2021.), uključujući i potrese najvećih magnituda. Ovaj *Rasjed 1*, koji opisuje Pokupski rasjed, azimuta pružanja je  $132^\circ$  (SZ-JI) i nagiba  $85^\circ$  te se po tim parametrima gotovo savršeno slaže s izračunatim žarišnim mehanizmom koji je dao subvertikalni rasjed s desnim pomakom po pružanju. U ovoj seriji se aktivirala i grupa potresa s epicentrima sjeveroistočno od Pokupskog rasjeda te su kroz tu grupu modelirana dva rasjeda. *Rasjed 2* vrlo vjerojatno je Petrinjski rasjed približno okomit na Pokupski, azimuta  $48^\circ$  i nagiba  $89^\circ$ . *Rasjed 3* je rasjed približno paralelan Pokupskom s azimutom pružanja  $143^\circ$  te s nagibom  $89^\circ$ . S obzirom na prostornu razdiobu prethodnih potresa u odnosu na nak-

nadne, može se uočiti inicijalno rasjedanje u smjeru Petrinjskog rasjeda što ukazuje na mogućnost da je upravo aktivnost na sekundarnom rasjedu (Petrinjskom) potaknula aktivnost na Pokupskom. Također, zbog prostorne razdiobe epicentara približno paralelnih Pokupskom rasjedu, ne može se isključiti i mogućnost da su se zapravo aktivirala sva tri rasjeda.

Korišteni katalozi potresa sadrže preliminarne lokacije potresa koji su podložni promjenama pa tako ni rezultati ovog rada nisu konačni, ali su dovoljno dobri da se stekne bolji uvid u kompleksni Zagrebački i Petrinjski sustav rasjeda te da se omogući daljnje preciznije određivanje seizmičkog hazarda ovih područja.



## Literatura

- Beresnev, I. A. i K.-L. Wen (1996). Nonlinear soil response—A reality? *Bulletin of the Seismological Society of America* 86(6), 1964–1978.
- Brune, J. N. (1970). Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research* 75(26), 4997–5009.
- Code, P. (2005). Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance-part 1: general rules, seismic actions and rules for buildings. *Brussels: European Committee for Standardization*.
- Dasović, I. (2015). *Attenuation of seismic waves beneath the Dinarides*. Ph. D. thesis, PhD dissertation, University of Zagreb, Faculty of Science, Zagreb, Croatia.
- Dasović, I., D. Herak, M. Herak, H. Latečki, M. Mustać, i B. Tomljenović (2020). O potresima u Hrvatskoj. *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva* 57(1), 4–27.
- Gallipoli, M. R., M. Mucciarelli, B. Šket-Motnikar, P. Zupančić, A. Gosar, S. Prevolnik, M. Herak, J. Stipčević, D. Herak, Z. Milutinović, i sur. (2010). Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bulletin of earthquake engineering* 8(3), 593–607.
- Grünthal, G. (1998). European macroseismic scale 1998. Technical report, European Seismological Commission (ESC).
- Herak, D. i M. Herak (2010). The Kupa Valley (Croatia) Earthquake of 8 October 1909—100 Years Later. *Seismological research letters* 81(1), 30–36.
- Herak, M. (2012). Hrvatska karta potresne opasnosti—kako je nastala i kako dalje?
- Herak, M., I. Allegretti, D. Herak, I. Ivančić, V. Kuk, K. Marić, S. Markušić, i I. Sović (2011). Karta potresnih područja Republike Hrvatske, <http://seizkarta.gfz.hr>. *Zagreb: Državna geodetska uprava*.
- Herak, M., D. Herak, i S. Markušić (1996). Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992. *Terra Nova* 8(1), 86–94.
- Kovačić, M., O. Mandić, B. Tomljenović, O. Mandić, D. Pavelić, M. Kovačić, K. Sant, N. Andrić, i H. Hrvatović (2016). Miocene paleo-lakes of the southwestern Pannonian Basin. In *Field Trip Guidebook. Lake-Basin-Evolution, RCMNS Interim Colloquium 2016 & Croatian Geological Society Limnogeology Workshop, Zagreb (Croatian Geological Society)*, pp. 11–31.
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India.
- Markušić, S. (2008). Seismicity of Croatia. In *Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries*, pp. 81–98. Springer.
- Markušić, S., D. Stanko, T. Korbar, N. Belić, D. Penava, i B. Kordić (2020). The Zagreb (Croatia) M5. 5 Earthquake on 22 March 2020. *Geosciences* 10(7), 252.

- Markušić, S., D. Stanko, D. Penava, I. Ivančić, O. Bjelotomić Oršulić, T. Korbar, i V. Sarhosis (2021). Destructive M6. 2 Petrinja Earthquake (Croatia) in 2020—Preliminary Multidisciplinary Research. *Remote Sensing* 13(6), 1095.
- Márton, E., D. Pavelić, B. Tomljenović, R. Avanić, J. Pamić, i P. Márton (2002). In the wake of a counterclockwise rotating Adriatic microplate: Neogene paleomagnetic results from northern Croatia. *International Journal of Earth Sciences* 91(3), 514–523.
- Ministarstvo unutarnjih poslova republike Hrvatske (2020). Ravnateljstvo civilne zaštite. <https://civilna-zastita.gov.hr>. [Pristupljeno 10. lipnja 2020.].
- NASA (2020). Croatia Earthquake March 2020—NASA Disaster Mapping Portal—Earthquakes. <https://maps.disasters.nasa.gov/arcgis/home/item.html?id=db20d487cee24810bd7b8cc96ccbcf3b>. [Pristupljeno 1. travnja 2020.].
- Petrovski, J. T. (2004). Damaging effects of July 26, 1963 Skopje earthquake. In *Middle East Seismological Forum, Cyber Journal of Geoscience Volume Two*.
- Ross, Z. E., B. Idini, Z. Jia, O. L. Stephenson, M. Zhong, X. Wang, Z. Zhan, M. Simons, E. J. Fielding, S.-H. Yun, i sur. (2019). Hierarchical interlocked orthogonal faulting in the 2019 Ridgecrest earthquake sequence. *Science* 366(6463), 346–351.
- Schmid, S. M., D. Bernoulli, B. Fügenschuh, L. Matenco, S. Schefer, R. Schuster, M. Tischler, i K. Ustaszewski (2008). The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences* 101(1), 139–183.
- Shearer, P. M. (2009). Introduction to Seismology, Cambridge University Press.
- SMŽ (2021). Oštećeni stambeni objekti - Sisačko-Moslavačka Županija. <https://www.smz.hr/osteceni>. [Pristupljeno 18. srpnja 2021.].
- Sović, I., Latečki, H. (2021). Preliminarna karta intenziteta potresa magnitude 6.2 od 29. prosinca 2020. [https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska\\_sluzba/potresi\\_kod\\_petrinje](https://www.pmf.unizg.hr/geof/seizmoloska_sluzba/potresi_kod_petrinje). [Pristupljeno 4. srpnja 2021.].
- Stanko, D. (2018). *Analysis of the local site effects on the amplification of seismic ground motion in Croatia*. Ph. D. thesis, University of Zagreb. Faculty of Science. Department of Geophysics.
- Stanko, D., Z. Gülerce, S. Markušić, i R. Šalić (2019). Evaluation of the site amplification factors estimated by equivalent linear site response analysis using time series and random vibration theory based approaches. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 117, 16–29.
- Stein, S. i M. Wyssession (2009). *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure*. John Wiley & Sons.
- Tomljenović i sur. (2021). Tomljenović, B., Stipčević, J., Sećanj, M. Izvješće o zabilježenim pojavama koseizmičkih površinskih deformacija na području Pokuplja i Banovine nastalih potresnom serijom od 28.12. 2020 do 5.01.2021. <https://www.rgn.unizg.hr/hr/izdvojeno>. [Pristupljeno 18. srpnja 2021.].

- Tomljenović, B., L. Csontos, E. Márton, i P. Márton (2008). Tectonic evolution of the northwestern Internal Dinarides as constrained by structures and rotation of Medvednica Mountains, North Croatia. *Geological Society, London, Special Publications* 298(1), 145–167.
- Torbar, J. (1882). *Izvešće o zagrebačkom potresu 9. studenoga 1880.* Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti.
- USGS (2020). M 5.3 - 2km WSW of Kasina, Croatia. <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008dx7/dyfi/intensity>. [Pristupljeno 19. lipnja 2021.].
- USGS (2021). EQ Magnitude, Energy Release, and Shaking Intensity. <https://www.usgs.gov/media/images/eq-magnitude-energy-release-and-shaking-intensity-5>. [Pristupljeno 18. srpnja 2021.].
- USGS ShakeMap (2021). M 6.4 - 2 km WSW of Petrinja, Croatia. <https://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us6000d3zh/shakemap/intensity>. [Pristupljeno 18. srpnja 2021.].
- Van Gelder, I., L. Matenco, E. Willingshofer, B. Tomljenović, P. Andriessen, M. N. Ducea, A. Beniest, i A. Gruić (2015). The tectonic evolution of a critical segment of the Dinarides-Alps connection: Kinematic and geochronological inferences from the Medvednica Mountains, NE Croatia. *Tectonics* 34(9), 1952–1978.
- Weber, J., M. Vrabec, P. Pavlovčić-Prešeren, T. Dixon, Y. Jiang, i B. Stopar (2010). GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics* 483(3-4), 214–222.

## Popis kratica

DG	engl. <i>Damage Grade</i>
EC8	Eurokod-8
EMS	Europska makroseizmička ljestvica intenziteta potresa
GMPE	engl. <i>Ground Motion Prediction Equation</i> - relacije predviđanja gibanja tla
HGI	Hrvatski geološki institut
IDW	engl. <i>Inverse distance weight</i>
$M_L$	lokalna magnituda
MSK	Medvedev-Sponheuer-Karnik ljestvica intenziteta potresa
$M_W$	momentna magnituda
PGA	engl. <i>Peak Ground Acceleration</i> - vršno ubrzanje tla
$PGA_{ROCK}$	PGA na osnovnoj stijeni
RVT	engl. <i>Random Vibration Theory</i> - teorija nasumične trešnje
USGS	U.S. Geological Survey
$V_{S30}$	prosječna brzina S valova u prvih 30 m tla

## **Dodatak A 3D prikaz modeliranih rasjeda Zagrebačke serije potresa**

Na CD-u priloženom uz ovaj rad nalazi se PDF dokument s trodimenzionalnim prikazom modeliranih rasjednih ravnina Zagrebačke serije potresa pod imenom *ILoncar\_Zagreb\_3Dmodel1.pdf*.\*

## **Dodatak B *Time-lapse* Zagrebačke serije potresa**

*Time-lapse* epicentara potresa iz Zagrebačke serije između 22. ožujka i 7. lipnja 2020. nalazi se na CD-u pod nazivom *Zagreb\_IL\_timelapse.mp4*. Vremenski korak u videu je 1 sat. U pozadini prikaza nalazi se digitalni elevacijski model (DEM) Medvednice i šireg zagrebačkog područja preuzet sa stranica *Copernicus* projekta te oznake geoloških struktura koje je ustupio HGI.

## **Dodatak C 3D vremenski prikaz hipocentara Zagrebačke serije potresa**

Na CD-u priloženom uz ovaj rad nalazi se PDF dokument s trodimenzionalnim prikazom hipocentara Zagrebačke serije, ali bez rasjeda zbog bolje preglednosti. Veličina kuglica reprezentira magnitudu potresa. Smeđom bojom su označeni hipocentri potresa koji su se dogodili do 14. travnja, dok su plavom bojom označeni hipocentri potresa koji su se dogodili nakon 14. travnja, a prije 7. lipnja 2020. Ime dokumenta je *ILoncar\_Zagreb\_3Dmodel2.pdf*.\*

## **Dodatak D 3D prikaz modeliranih rasjeda Petrinjske serije potresa**

Na CD-u priloženom uz ovaj rad nalazi se PDF dokument s trodimenzionalnim prikazom modeliranih rasjednih ravnina Petrinjske serije potresa pod imenom *ILoncar\_Petrinja\_3Dmodel.pdf*.\*

## **Dodatak E *Time-lapse* Petrinjske serije potresa**

*Time-lapse* epicentara potresa iz Petrinjske serije između 28. prosinca 2020. i 14. veljače 2021. nalazi se na CD-u pod nazivom *Petrinja\_IL\_timelapse.mp4*. Vremenski korak u videu je 2 sata. U pozadini prikaza nalazi se digitalni elevacijski model (DEM) područja Banovine preuzet sa stranica *Copernicus* projekta te oznake geoloških struktura koje je ustupio HGI.

---

\*Potrebno duže vremena za učitavanje jer je datoteka velika.

## **Dodatak F**    *Time-lapse* prva dva dana Petrinjske serije potresa

*Time-lapse* epicentara potresa prva dva dana petrinjske serije između 28. i 30. prosinca 2020. nalazi se na CD-u pod nazivom *Petrinja\_IL\_2dana.mp4*. Vremenski korak u videu je 10 minuta. U pozadini prikaza nalazi se digitalni elevacijski model (DEM) područja Banovine preuzet sa stranica *Copernicus* projekta te oznake geoloških struktura koje je ustupio HGI.

## **Dodatak G**    *Time-lapse* hipocentara Petrinjske serije potresa projiciranih na profile

*Time-lapse* hipocentara potresa Petrinjske serije do 1. siječnja 2021. projiciranih na *Profil 1* (Lijevo) koji približno prati Pokupski rasjed i na *Profil 2* (Desno) okomit na *Profil 2*. Plavom bojom su označeni oni potresi koji su sjeveroistočno od pomoćnog profila povučen paralelno *Profilu 1*. Zvezdicom je označen glavni potres serije.