

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Iva Lončar

Geodinamika Zagrebačkog rasjednog sustava

Zagreb, 2021.

Ovaj rad izrađen je na Geofizičkom odsjeku Prirodoslovno-matematičkog fakulteta Sveučilišta u Zagrebu pod vodstvom mentorice izv. prof. dr. sc. Snježane Markušić i predan je na natječaj za dodjelu Rektorove nagrade u akademskoj godini 2020./2021.

Popis kratica

DG	engl. <i>Damage Grade</i>
HGD	Hrvatsko geološko društvo
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
USGS	U.S. Geological Survey
V_{S30}	prosječna brzina S valova u prvih 30 m tla

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Teorijska podloga zagrebačkog potresnog područja	3
2.1. <i>Geološki i seizmotektonski pregled zagrebačke seizmogene zone</i>	5
2.2. <i>Seizmička povijest šireg zagrebačkog područja</i>	7
3. Zagrebački potres 22. ožujka 2020.	9
3.1. Žarišni mehanizam	10
3.2. Opis štete i karakteristike građevina	12
3.3. Amplifikacija i lokalni uvjeti tla	14
4. Podaci i metode	20
5. Rezultati i diskusija	22
5.1. Statistička obrada potresa	22
5.2. Strukturno modeliranje Zagrebačke serije potresa	25
6. Zaključak	31
Zahvale	33
Literatura	34
Sažetak	37
Summary	39
Dodatak A 3D prikaz modeliranih rasjeda	41
Dodatak B <i>Time-lapse</i>	41
Dodatak C 3D vremenski prikaz hipocentara	41

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 rezultatnih 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 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 pa, tako 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 serija potresa koja je započela 22. ožujka 2020. godine 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

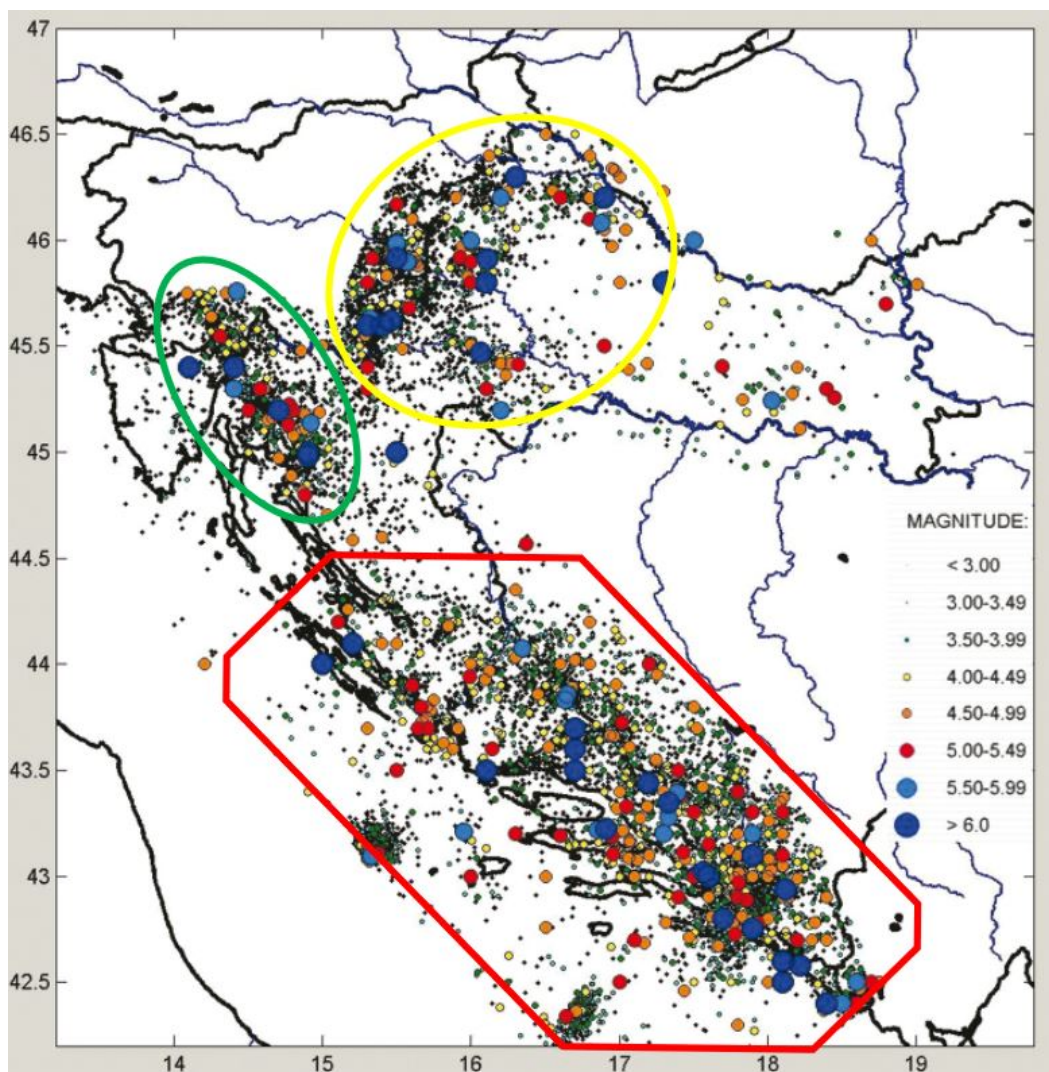
radu će se razmotriti duži niz podataka, odnosno naknadni potresi do 7. lipnja 2020. godine. Cilj je uočiti jesu li se u kasnijoj fazi aktivirali neki drugi rasjedi ili neki manji fragmenti. Treba imati na umu da je u trenutku analiza naknadnih potresa za ovaj rad korišten preliminarni katalog potresa 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.

Nadalje, razmotrit će se vremenska karakteristika ove serije 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 seizmičkog područja te bolji uvid u Zagrebačku seriju potresa koja je započela u ožujku 2020. kako bi se doprinijelo daljnjoj procjeni seizmičkog hazarda ovog područja.

2. Teorijska podloga zagrebačkog potresnog područja

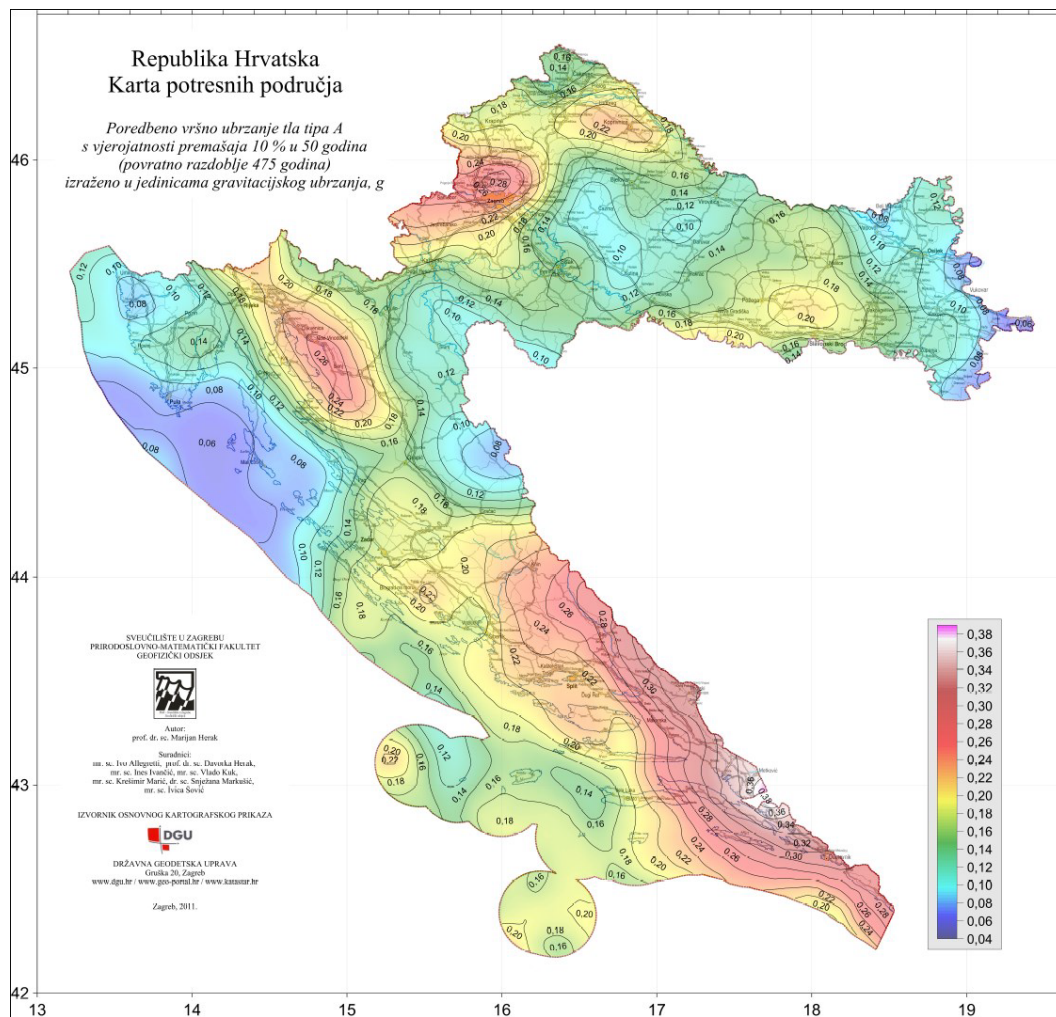
Prema podacima o potresima iz *Hrvatskog kataloga potresa* mogu se uočiti tri veće regije u kojima je seizmička aktivnost pojačana u odnosu na ostala područja (Slika 2.1). Na slici se može primijetiti da se šire zagrebačko područje nalazi u seizmički aktivnijem području (sjeverozapadna regija Hrvatske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

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.



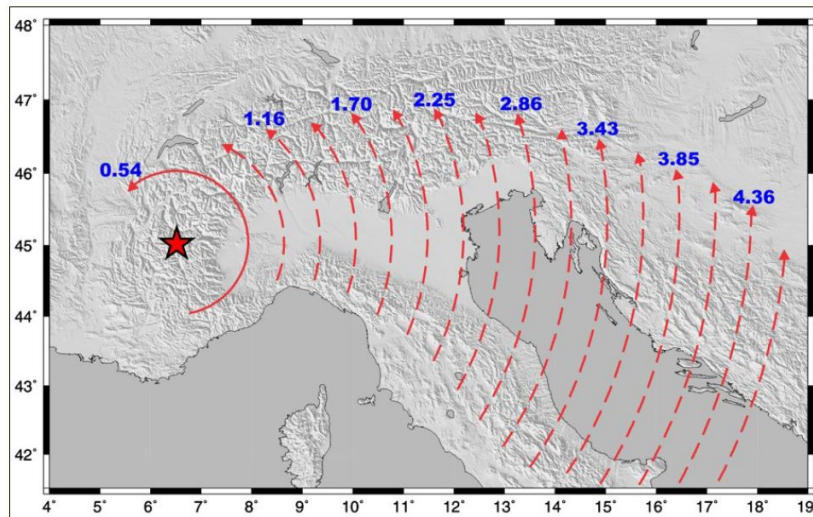
Slika 2.2. Karta seizmičkog hazarda za područje Hrvatske na razini osnovne stijene uz povratno razdoblje 475 godina (Herak i sur., 2011).

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 područje, možemo raspoznati i na ovoj slici (crveno i žuto). U tim područjima su veća ubrzanja osnovne stijene s vjerojatnošću premašaja od 10% u 50 godina gdje je povratno razdoblje 475 godina.

2.1. Geološki i seizmotektonski pregled zagrebačke seizmogene zone

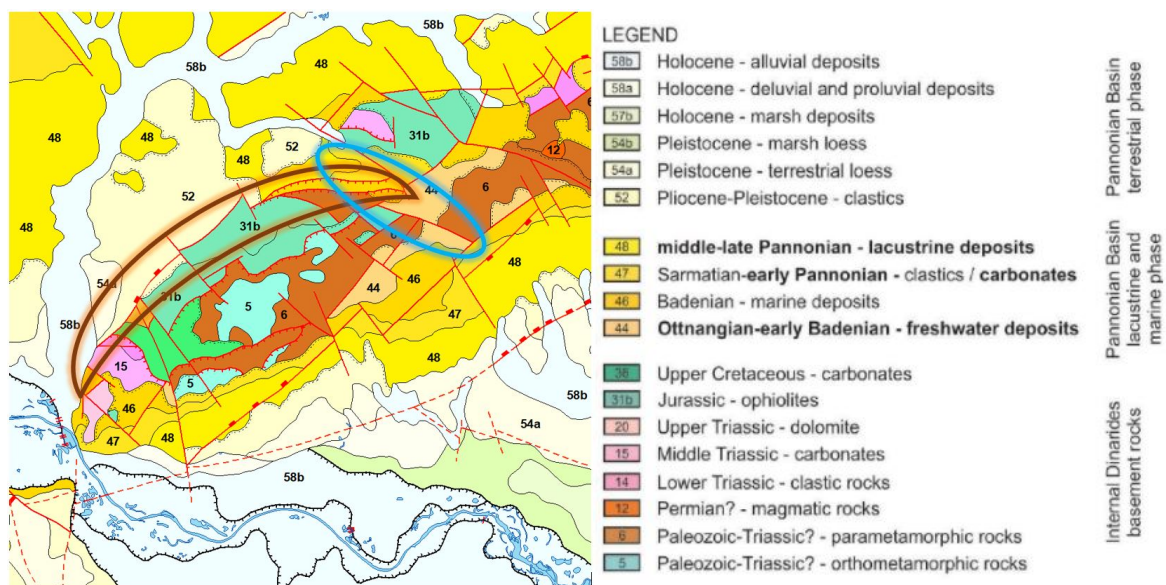
Središnjim dijelom šireg zagrebačkog područja dominira planina Medvednica. Ona je dio Unutarnjih Dinarida te se proteže u smjeru SI-JZ. Nalazi se na vrlo zanimljivoj granici tri geotektonski različite regije: Panonski bazen na istoku, Alpe na sjeverozapadu te Dinaridi na jugu. Potresi na ovom području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

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 2.4. Lijevo: geološka karta (ustupilo HGD) M 1:300000 izrezana za Medvednicu i okolno područje. Desno: Legenda geoloških oznaka (Kovačić i sur., 2016).

Geološka struktura Medvednice je vrlo zanimljiva i kompleksna (Slika 2.4). Na slici su s 5 i 6 prikazane stare paleozojske stijene, tj. stijene metamorfnog kompleksa jezgre Medvednice (Kovačić i sur., 2016). Te starije paleozojske stijene na površini izdaju 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.

2.2. Seizmička povijest šireg zagrebačkog područja

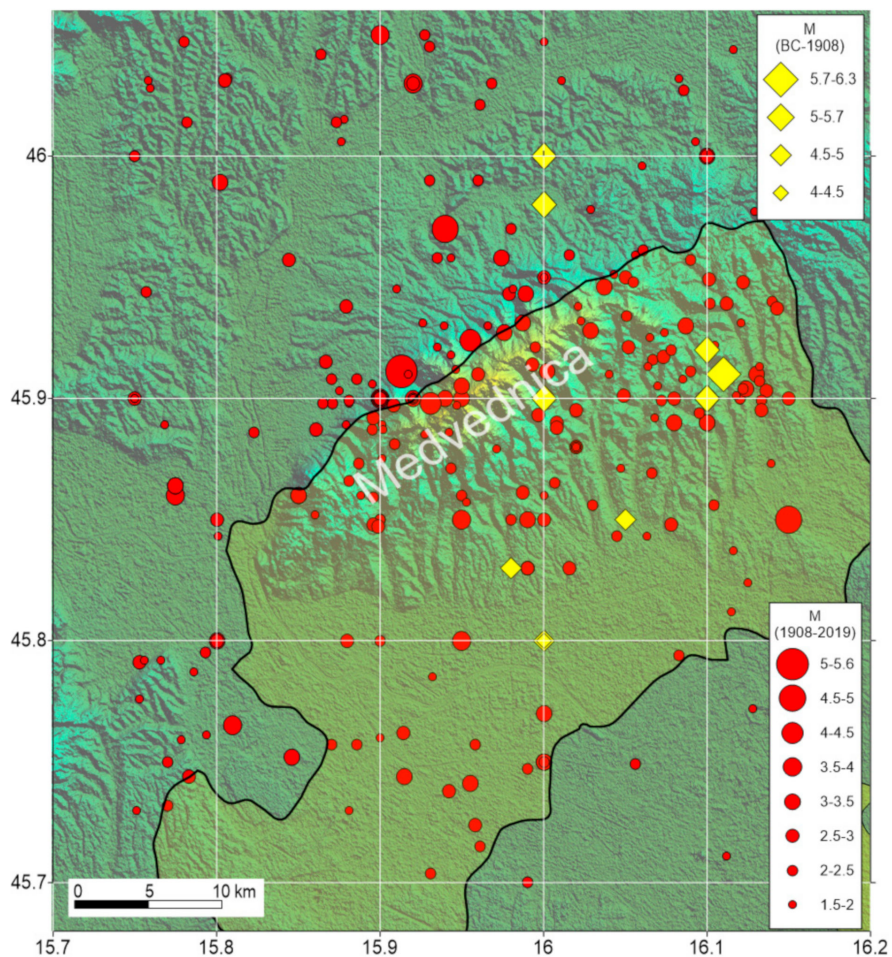
U području Zagreba i okolice kroz povijest se dogodio velik broj potresa (Slika 2.5), no njihovo sistematsko zapisivanje započelo je tek nakon 1872. godine. Prema makroseizmičkim istraživanjima hrvatskog geofizičara Josipa Mokrovića, između 1502. i 1883. godine u širem zagrebačkom području se osjetio 661 potres.

Poticaaj na sistematsko izučavanje potresa, označio je *Veliki zagrebački potres* 9.

studenog 1880. (u 07:03 UTC) koji je s magnitudom 6.3 ujedno i najjači dokumentirani potres u zagrebačkom epicentralnom području (Herak M., Herak D. i Markušić, 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, još dva vrlo jaka potresa su se dogodila 17. prosinca 1905. i 2. siječnja 1906. godine.

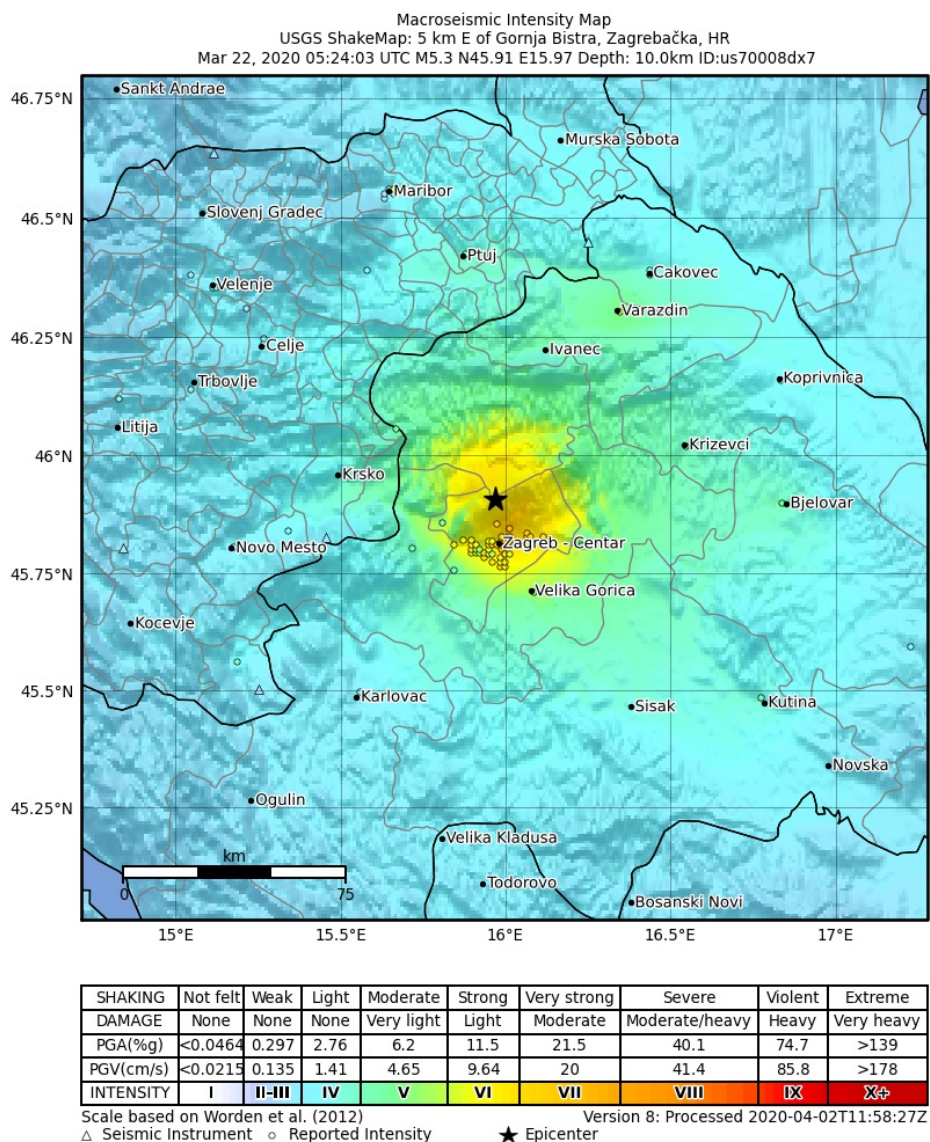
Vrlo jaki potres, magnitude 5, dogodio se 3. rujna 1990. s epicentrom kraj Kraljevog Vrha te je on posljednji jaki potres u ovom području prije potresa 2020. godine.



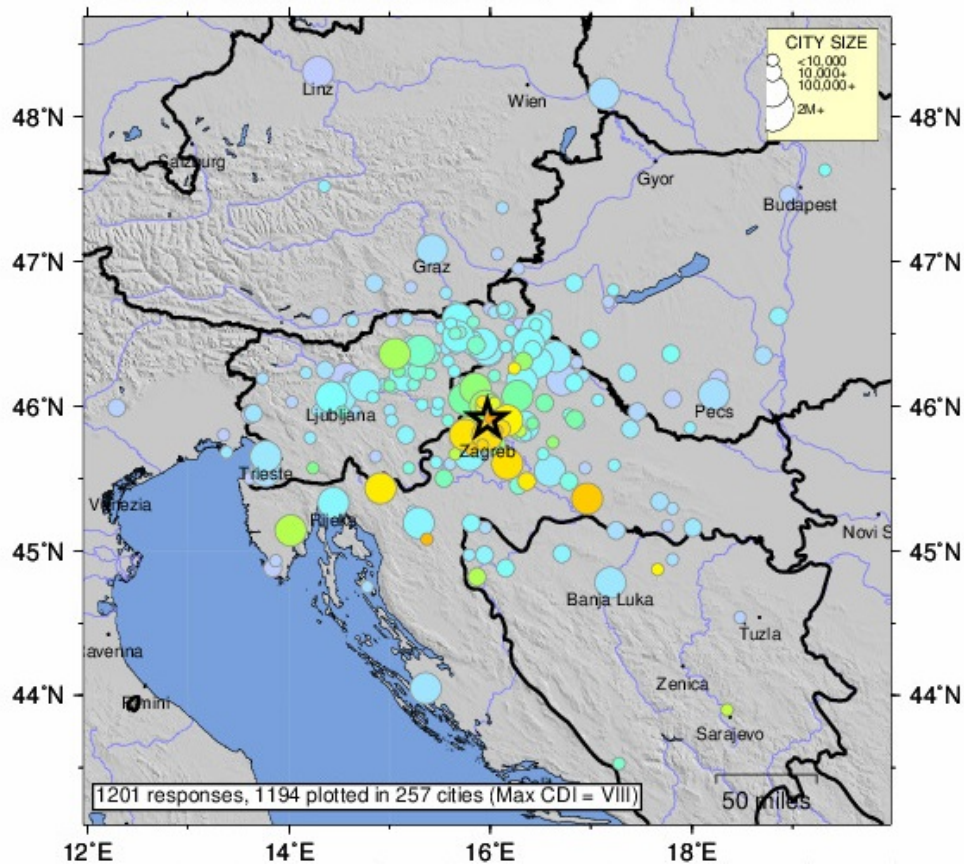
Slika 2.5. Prostorna razdioba potresa šireg zagrebačkog epicentralnog područja od vremena BC do 2019. (Herak M., Herak D. i Markušić, 1996). Žuto je naglašen prostor urbaniziranog Zagreba.

3. Zagrebački potres 22. ožujka 2020.

U nedjelju 22. ožujka 2020. godine, Zagreb i okolicu je u 06:64 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 3.1), a osjetio se po cijeloj Hrvatskoj, ali i u Sloveniji, Italiji, Austriji, Češkoj, Bosni i Hercegovini te u Srbiji, tj. osjetio se i na epicentralnim udaljenostima čak većim od 1000 km (Slika 3.2).



Slika 3.1. Karta intenziteta potresa (USGS, 2020).



Slika 3.2. 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 07:01 prema lokalnom vremenu, dok se treći najjači naknadni potres magnitude M_L 3.5 dogodio u 07:41. U prvih 24 sata od glavnog potresa, dogodilo se 100 naknadnih potresa magnitude preko 1.5.

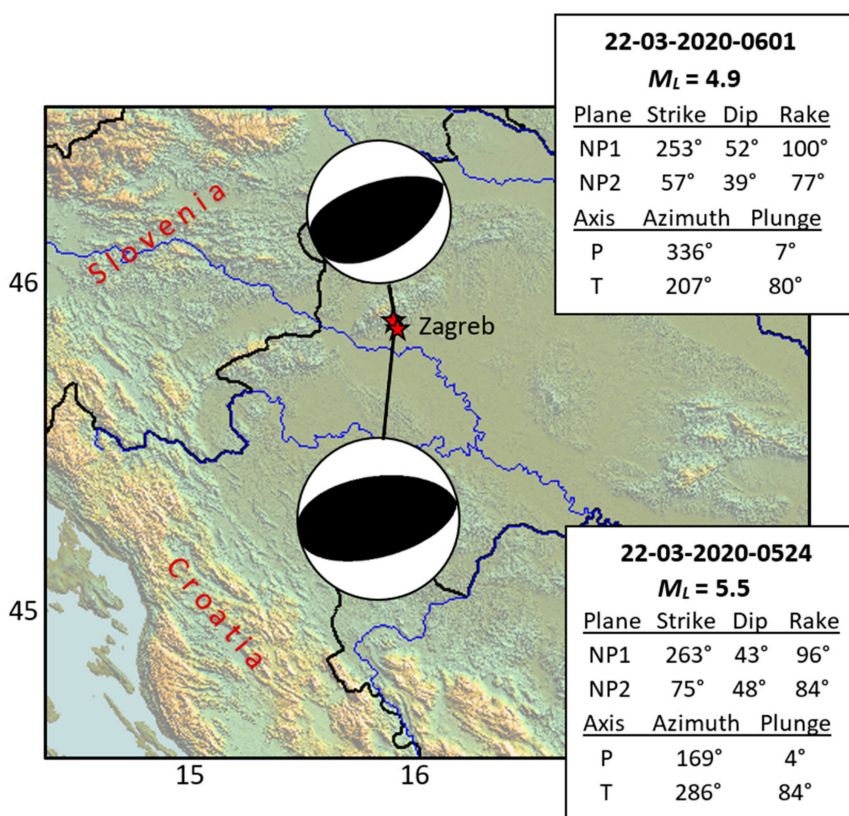
Prema opažanjima koseizmičkih deformacija *Sentinel-1* misije od 17. ožujka i 23. ožujka 2020. godine, opaženo je da je došlo do uzdizanja epicentralnog područja, površine približno 20 km², za oko 3 cm (Markušić i sur., 2020).

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 3.3. Žarišni mehanizam izračunat za glavni i najjači naknadni potres. Žarišne sfere prikazane su u stereografskoj projekciji.

Žarišni mehanizmi u Markušić i sur. (2020) izračunati su za glavni i najjači naknadni potres (Slika 3.3). Za oba ova potresa žarišni mehanizam ukazuje da su se dogodili na reversnim rasjedima. Jedna rasjedna ravnina glavnog potresa nagiba 43°

nagnuta je prema jug-jugoistoku, a druga ravnina nagiba 48° nagnuta je prema sjever-sjeverozapadu. Najjači naknadni potres dogodio se na reversnom rasjedu nagiba 52° prema jug-jugoistoku ili na rasjedu nagiba 39° prema sjever-sjeverozapadu.

Izračunato je i da je os najvećeg tektonskog tlaka P bila 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.

3.2. 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);MUP (2020)).

Većina građevina s 3-5 katova, sagrađenih u doba Austro-Ugarske monarhije pa do 1920., 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 $0.28g$. U gradnji između 1945. i 1964. 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, ranio 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* 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 (Eurokod-8, 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) 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.

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 intenziteta VII °MSK, ali i u velikom dijelu Zagreba.

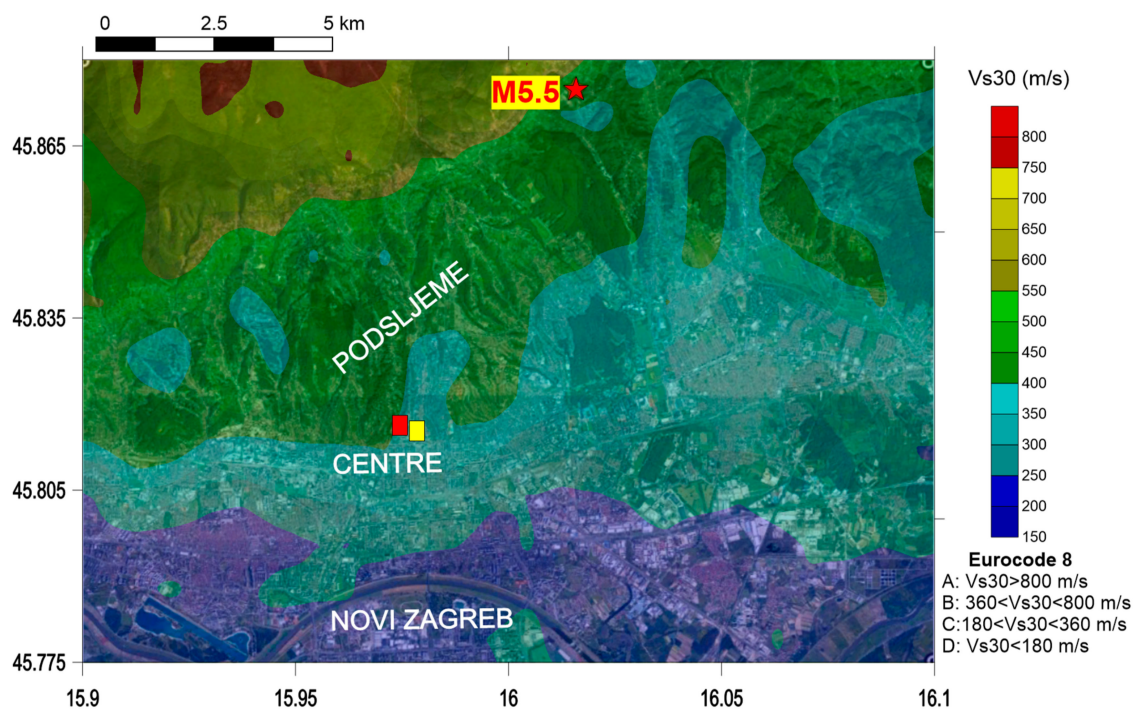
Uzimajući u obzir vremenski period i materijal gradnje, pregledane su i zgrade u neposrednoj blizini epicentra te se na temelju dostupnih podataka došlo do glavnog, i logičnog zaključka, da se uvažavanjem mjera o protupotresnoj gradnji značajno smanjuje moguća šteta na građevini.

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. 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 (Beresney i Wen, 1996).

Nakon zagrebačkog potresa 2020. godine, u 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 3.4). Na slici 3.4 bojama su označena područja određenih intervala brzina kojima se prema normi Eurokod-8 (2005) definiraju osnovni tipovi tla (Tablica 3.1).



Slika 3.4. Prostorna distribucija 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	≥ 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	≤ 100	Rastresiti do srednje zbijeni nevezani sedimenti (sa ili bez mekanih 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 3.4 zanimljivo je primjetiti granicu između plavog (tlo tipa C) i zelenog područja (tlo tipa B), odnosno vidljiva su "isprepletena" 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 ω^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/m².

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

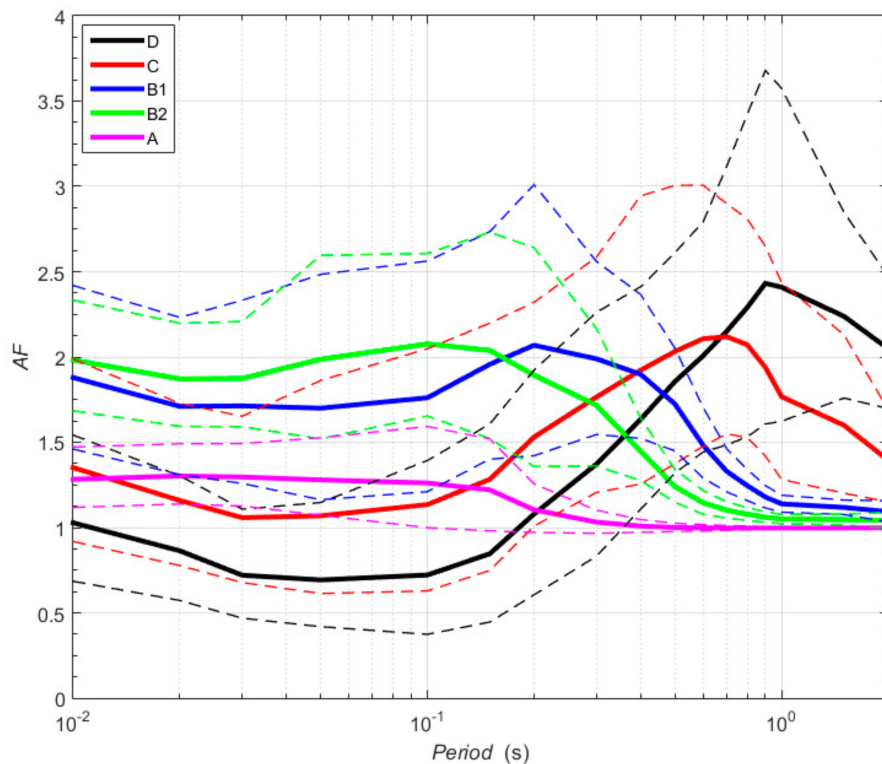
$$Q_c(f) = 78f_c^{0.69},$$

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 3.5). 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 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. Zbog toga 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 3.5 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 3.5. Medijan lokalnog amplifikacijskog faktora za V_{S30} klase tla bazirane na Eurokodu-8 sa ± 1 standardnom devijacijom (isprekidane linije) za PGA_{ROCK} u rasponu 0.159 - 0.185 g .

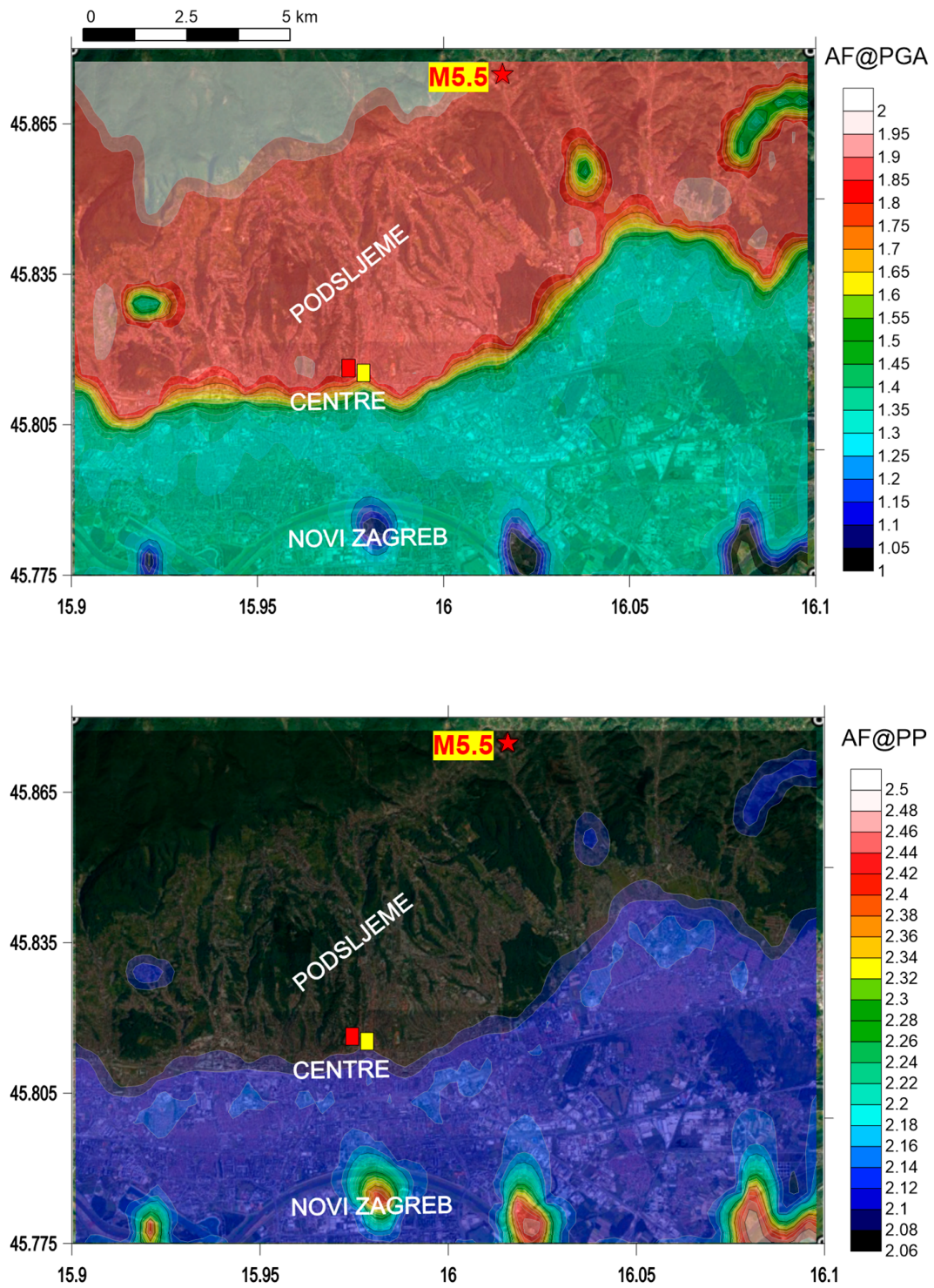
Efekti potresa M5.3 iz ožujka 2020. ipak su bili slični za sve građevine neovisno o njihovoj visini, ali pri jačim potresima (npr. magnitude preko 7) vidjele bi se razlike u utjecaju potresa. Niske obiteljske, betonske građevine kraćih perioda ($T < 0.2$ s), većinom su izgrađene nakon 1963. godine, ali su svejedno pretrpile veće štete nego što su trebale. Smatra se da veća šteta od očekivanog 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 građeno. Zbog toga je vrlo važno dobro odrediti strukturne značajke zgrada kako bi se nadalje učinci potresa mogli jasno razlikovati.

Na slici 3.6 gore prikazana je prostorna razdioba PGA na površini i dolje predomnanti vršni period amplifikacije za procijenjeni PGA_{ROCK} . Amplifikacijski faktor na površini (Slika 3.6 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 3.6 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).

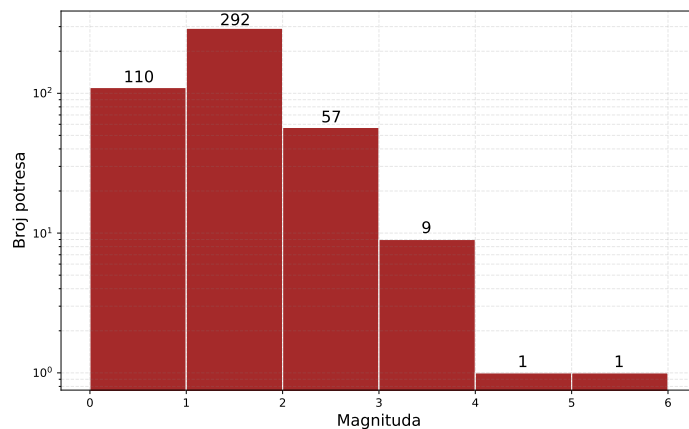
Konačno, valjano je iz opisanog zaključiti da poznavanje lokalne amplifikacije na nekom specifičnom spektralnom periodu treba biti uvaženo u dizajniranju protupotresnih građevina kako bi se izbjegla potencijalna rezonancija s tlom tijekom potresa. Nadalje, očito je da je dosta građevina pretrpilo veće štete zbog zanemarivanja i strukturalnih 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.



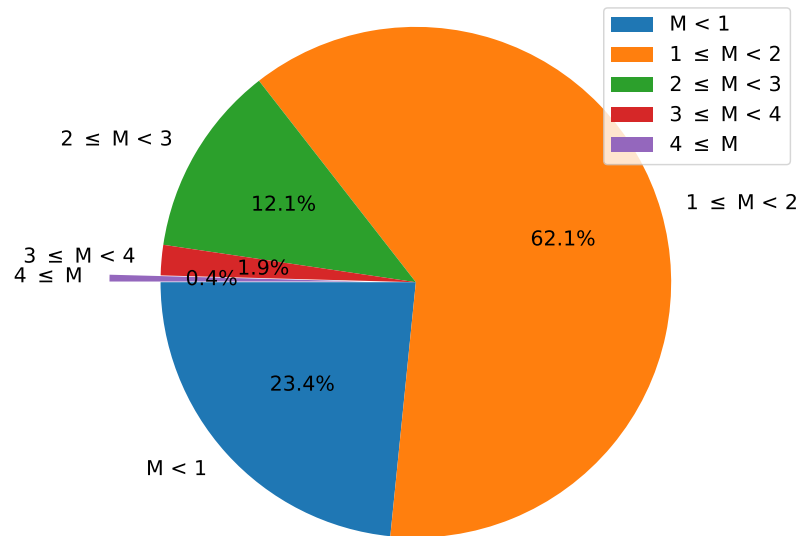
Slika 3.6. Gore: Karta lokalne amplifikacije za PGA na površini (AF@PGA); Dolje: Predominantni vršni period amplifikacije (AF@PP) za procijenjeni PGA_{ROCK} .

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 još 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 potres u korištenom katalogu za navedeno razdoblje, 464 ispunjavaju gornje uvjete, a na slici 4.1 prikazana je raspodjela tih potresa prema intervalima magnituda, a na slici 4.2 prikazan je udio potresa određenih intervala magnituda u ukupnom broju potresa. 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 4.1. Broj potresa po intervalima magnituda za korišteni preliminarni katalog Zagrebačke serije potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. godine.



Slika 4.2. Postotak potresa po intervalima magnituda za korišteni preliminarini katalog Zagrebačke serije potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. godine.

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.

5. Rezultati i diskusija

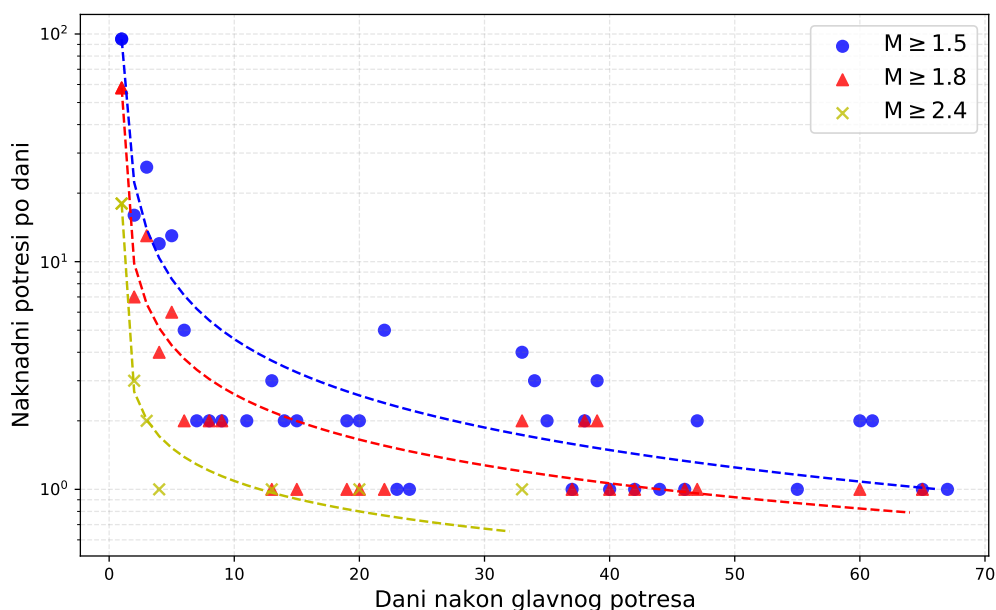
5.1. Statistička obrada potresa

U korištenom katalogu potresa zabilježeno je 464 potresa u periodu između 22. ožujka i 7. lipnja 2020. koji zadovoljavaju prostorne uvjete opisane u prošlom poglavlju. 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 dalje rasjede koji bi mogli svojom aktivnošću još produljiti trajanje ove serije potresa.

Serijski potres može trajati i mjesecima, ali i godinama nakon što se dogodio glavni potres, a okvirno vrijeme kada bi ona mogla završiti daje nam empirijski modificirani Omorijev zakon (Utsu i Ogata, 1995):

$$n(t) = \frac{K}{(t+c)^p}, \quad (5.1.)$$

gdje je t vrijeme nakon glavnog potresa, p eksponent koji je skoro najčešće ≈ 1 , c vremenski parametar koji ovisi od slučaja do slučaja, a K produktivnost koji ovisi o magnitudi glavnog potresa. Prema potresima iz ovog kataloga je i za ovaj potres računata krivulja Omorijevog zakona, tj. krivulja je prilagođavana s obzirom na broj potresa u danu. Treba imati na umu da katalog još nije potpun pa tako ni prikaz još uvijek nije konačan (velika odstupanja točaka od krivulje). Gledali su se potresi za tri približne magnitude potpunosti (Slika 5.1): $M_c = 1.5$, $M_c = 1.8$ i $M_c = 2.4$. Prema prilagođanim krivuljama, u tablici 5.1 se vidi da bi za otprilike 2 godine seizmičnost Zagrebačkog epicentralnog područja trebala biti na razini kao prije glavnog potresa u ožujku 2020.

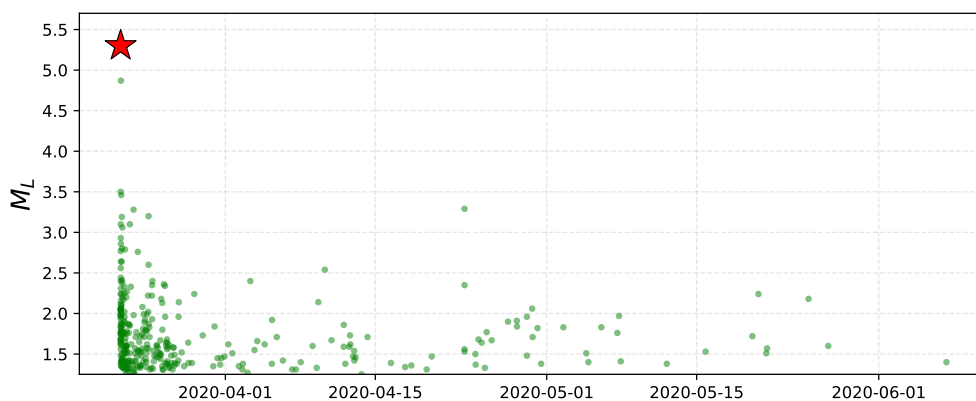


Slika 5.1. Omorijev zakon za tri različite magnitude potpunosti.

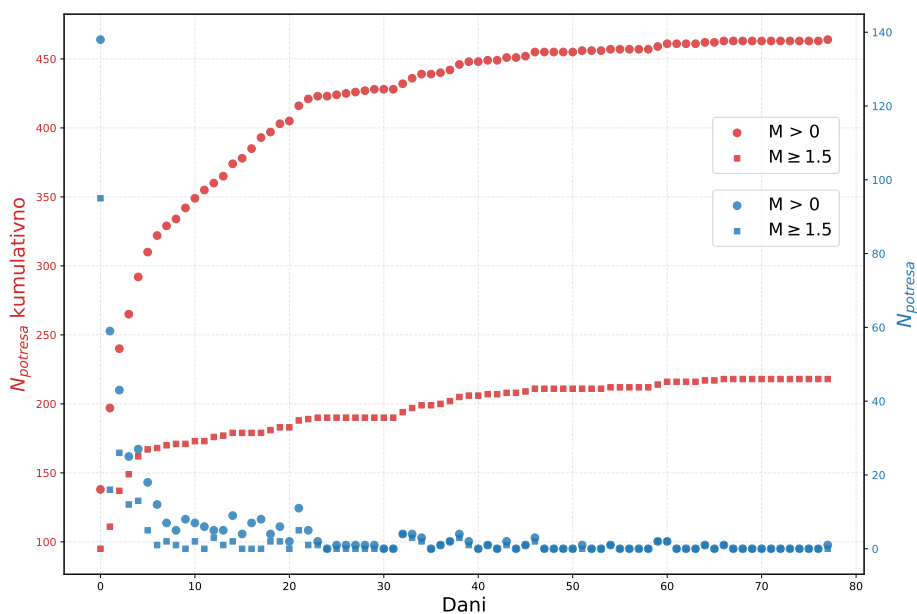
Tablica 5.1. Parametri modificiranog Omorijevog zakona za različite magnitude potpunosti.

M_c	Modificirani Omorijev zakon	Povratak seizmičnosti na razinu prije glavnog potresa izraženo u godinama nakon glavnog potresa
1.5	$\frac{25.382}{(-0.818+t)^{0.773}}$	1.96
1.8	$\frac{10.177}{(-0.941+t)^{0.616}}$	2.27
2.4	$\frac{2.697}{(-0.990+t)^{0.413}}$	2.31

Na slici 5.2 prikazane su magnitude potresa od 22. ožujka do 7. lipnja 2020. Iako slika prikazuje samo one potrese magnitude iznad 1.3, lijepo se vidi kako magnitude potresa s vremenom opadaju. U nadopunu ovome grafu valja promotriti i graf na slici 5.3 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 5.2. Magnitude potresa po danima nakon glavnog potresa. Graf prikazuje samo potrese magnitude preko 1.3. Crvenom zvjezdicom označen je glavni potres.



Slika 5.3. 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.

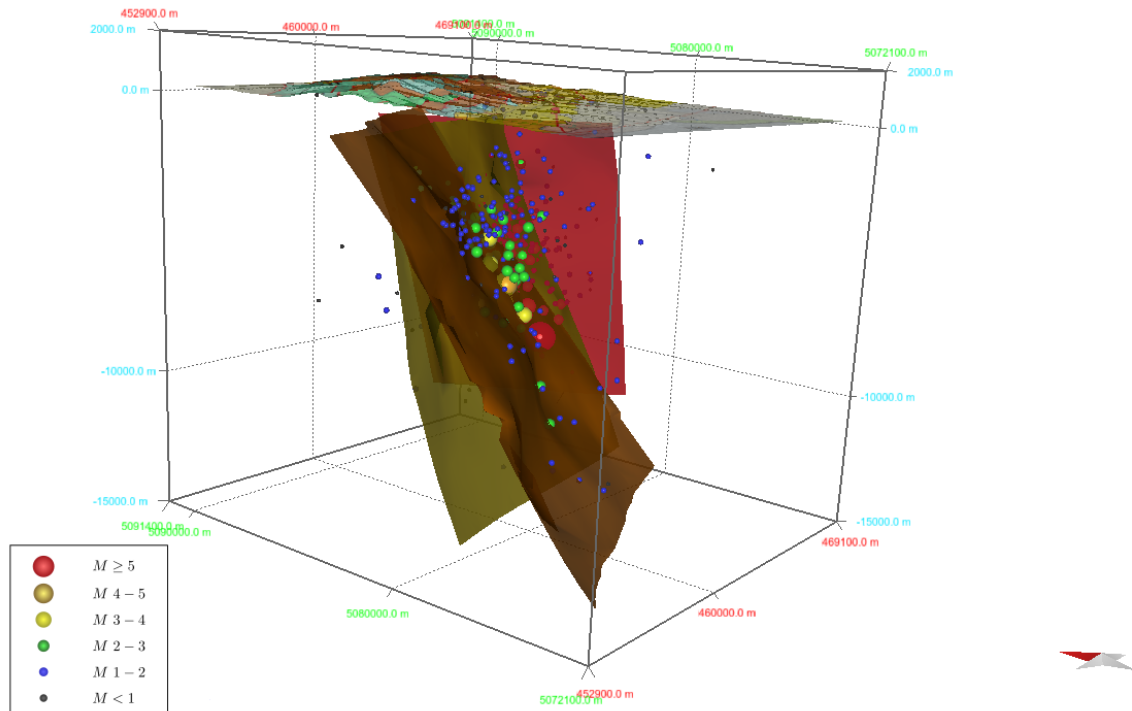
5.2. *Strukturno modeliranje Zagrebačke serije potresa*

Na osnovu položaja hipocentara iz kataloga potresa, modelirane su tri rasjedne ravnine u softveru za geološko strukturno modeliranje *MOVE* (Dodatak A). Uvaži li se 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. Ova vizualna analiza dio je geološke interpretacije koja zajedno sa žarišnim mehanizmom (Slika 3.3) daje jasniju sliku o onome što se nalazi ispod površine Zemlje.

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. Postojanje tih hipocentara vrlo vjerojatno su nedovoljno precizno očitani te su kao takvi zanemareni u analizi. Oni su mahom potresi magnituda ispod 1 te su u prvih nekoliko dana bili teži za prepoznati u velikom broju jačih potresa. Niti jedan od ova tri rasjeda se ne vidi na površini (modelirani su kao duboko ukopani rasjedi) što se može objasniti na dva načina. Prvo, zbog mladih, 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. Pogleda li 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 5.4. Ovak *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° , a nagib 45° što možemo usporediti s rasjednim parametrima dobivenim iz žarišnog mehanizma po kojem je azimut pružanja 263° , a nagib 43° . 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

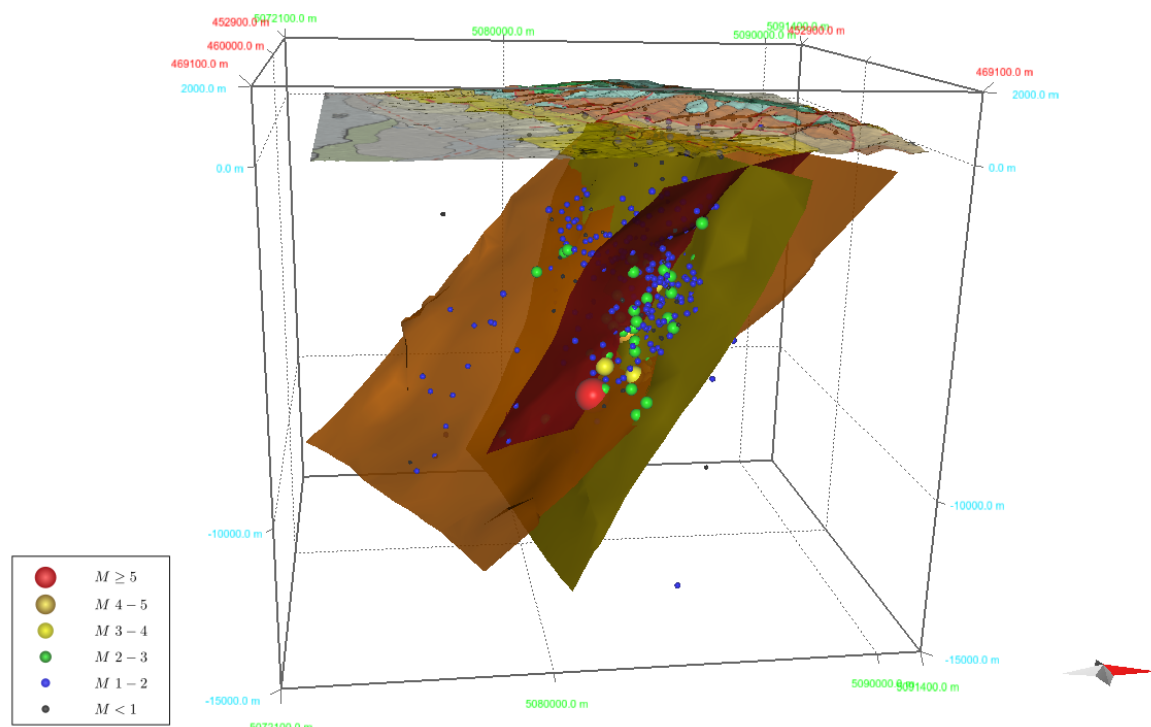
jurskim naslagama. Površinska projekcija ovog rasjeda prikazana je smeđe na slici 5.7. Iako projekcija ne prati savršeno geološke granice prikazane na karti, treba imati na umu da je ova geološka karta izrađena isključivo na osnovu površinskih obilježja te da ovaj rasjed ne mora biti ravan u svom plićem dijelu. Model je izrađen da dobro opisuje područje u kojem postoje hipocentri, ali izvan toga ne mora pratiti model. Od modeliranih rasjeda, ovaj *Rasjed 1* najbliže opisuje Sjeverni rubni medvednički rasjed. U radu Markušić i sur. (2020) ovaj rasjed modeliran je s azimutom smjera pružanja 215° i s blažim nagibom od 31° 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 su korišteni noviji podaci.



Slika 5.4. *Rasjed 1* (smeđe) modeliran na osnovu 50 hipocentara. Azimut pružanja je 243°, a nagib 45°. Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

Na slici 5.5 žuto je označen *Rasjed 2* modeliran na osnovu 40 hipocentara srednje jakih potresa. Prema modelu, ovaj rasjed je azimuta smjera pružanja 247° i strmog nagiba od 62°. Površinska projekcija mu je na slici 5.7 prikazana zelenom 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° i nagiba 57° koji ipak bolje prati hrbat Medvednice.

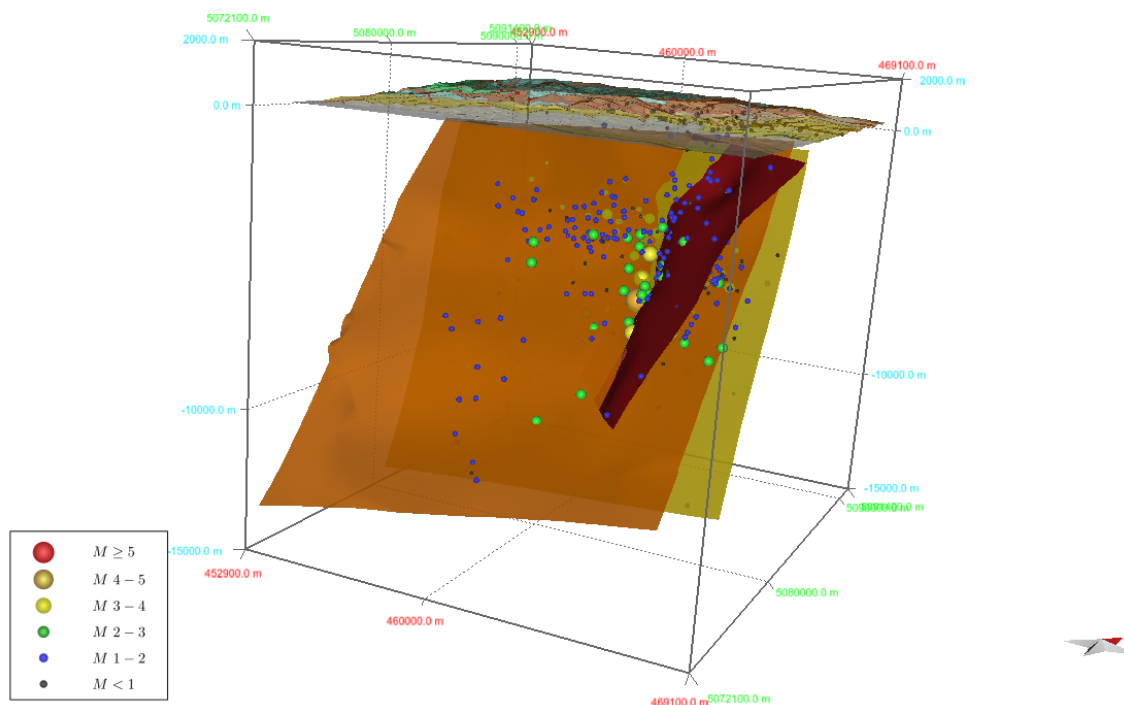


Slika 5.5. Rasjed 2 (žuto) modeliran na osnovu 40 hipocentara. Azimut pružanja je 247° , a nagib 62° . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

Ono što je vrlo zanimljivo jest crveno označeni rasjed na slici 5.6 azimuta smjera nagiba 317° i nagiba 55° 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 5.7 crveno označeno se vidi površinska projekcija ovog rasjeda. Iako rasjedi ovog pružanja nisu česti, na slici 3.4 se vidi ispreplitanje tla B i C tipa što može ukazivati na anomalije u strukturnoj građi 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

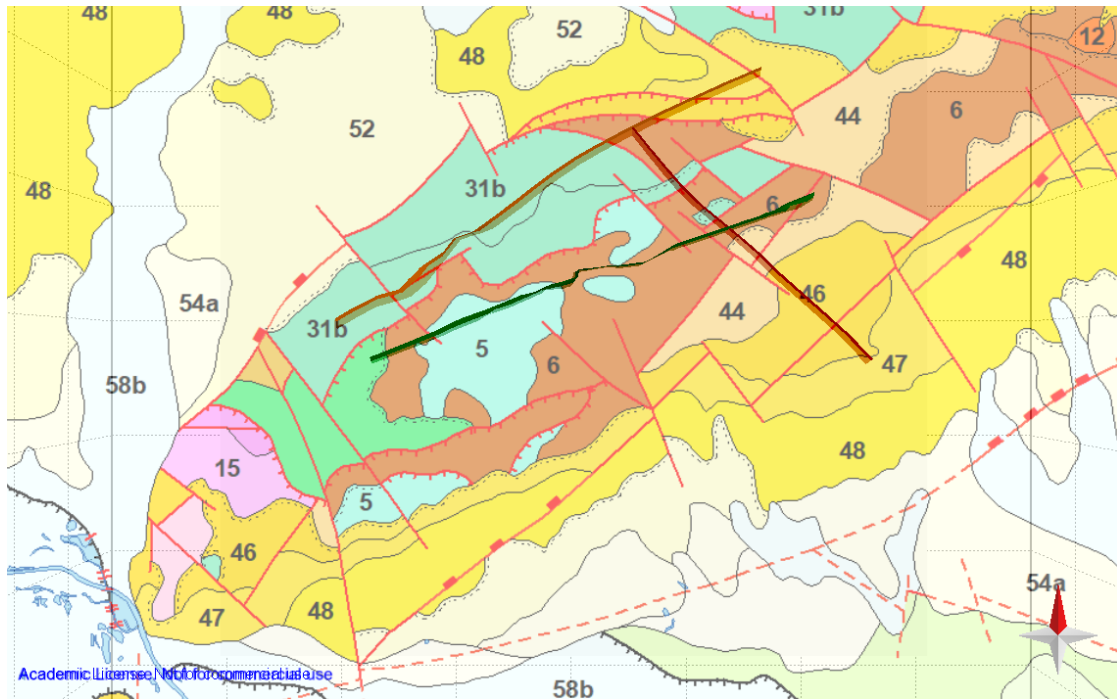
stotina metara.

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.).



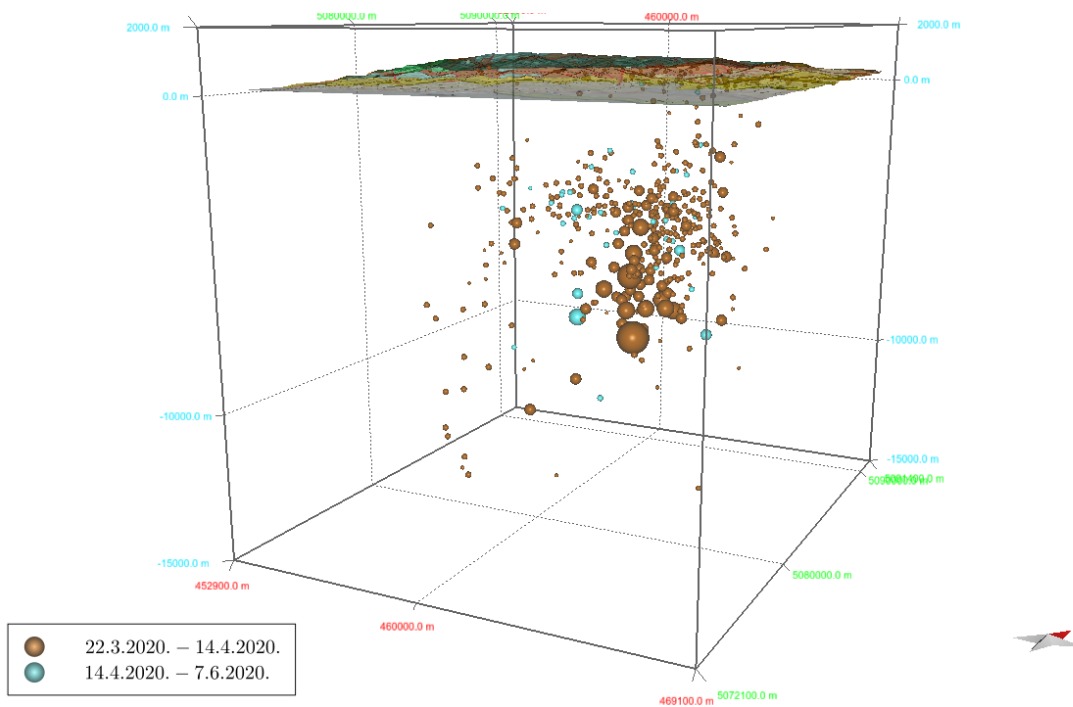
Slika 5.6. *Rasjed 3* (crveno) modeliran na osnovu 18 hipocentara. Azimut pružanja je 317° , a nagib 55° . Koordinate su prikazane u HTRS96/TM koordinatnom sustavu.

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.



Slika 5.7. 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 2.4.

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 kroz seriju aktivirale. Na slici 5.8 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 neki drugi rasjedi neće ni aktivirati. Konačno, možemo se ponovno pozvati na rezultate modificiranog Omorijevog zakona koji pretpostavljaju da bi se kroz aproksimativno 2 godine nakon glavnog potresa razina seizmičnosti trebala vratiti na onakvu kakva je bila prije početka ove serije potresa.



Slika 5.8. 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.

6. Zaključak

Serijski potres na području Zagreba započela je 22. ožujka 2020. u 06:24 potresom magnitude 5.3 s epicentrom nedaleko od Markuševca i Čučerja, 7 km od centra Zagreba. Potres je bio intenziteta VII-VIII °MSK te je uzrokovao velike materijalne štete, puno veće nego bi potres ove magnitude trebao učiniti.

U ovom radu su se u softveru *MOVE*, pomoću IDW metode, modelirala 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° i nagiba 45° 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° i nagiba 62° modeliran na temelju 40 hipocentara potresa srednje jačine. Ovaj rasjed približno prati vrhove Medvednice. Posljednje modeliran, pomoću 18 hipocentara, *Rasjed 3* azimuta 317° i nagiba 55° 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. Uz pretpostavku da će se magnitude potresa i dnevni broj potresa s vremenom smanjivati, što i modificirani Omorijev zakon pokazuje, približni povratak na razinu seizmičnosti kakva je bila prije 22. ožujka 2020. očekuje se za oko 2 godine nakon glavnog potresa.

Korišteni katalog sadrži 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 sustav rasjeda te da se omogući daljnje preciznije određivanje seizmičkog hazarda.

Zahvale

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.

Literatura

- Beresnev, I.A. and Wen, K.L., 1996. Nonlinear soil response—A reality?. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), pp.1964-1978.
- Brune, J.N., 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. *Journal of geophysical research*, 75(26), pp.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*.
- Croatia Earthquake March 2020—NASA Disaster Mapping Portal—Earthquakes.
<https://maps.disasters.nasa.gov/arcgis/home/item.html?id=db20d487cee24810bd7b8cc96ccbcbf3b>
- Dasović, I., 2015. *Attenuation of seismic waves beneath the Dinarides* (Doctoral dissertation, PhD dissertation, University of Zagreb, Faculty of Science, Zagreb, Croatia).
- Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Mustać, M. and Tomljenović, B., 2020. O potresima u Hrvatskoj. *Vijesti Hrvatskoga geološkog društva*, 57(1), pp.4-27.
- Gallipoli, M.R., Mucciarelli, M., Šket-Motnikar, B., Zupančić, P., Gosar, A., Prevolnik, S., Herak, M., Stipčević, J., Herak, D., Milutinović, Z. and Olumčeva, T., 2010. Empirical estimates of dynamic parameters on a large set of European buildings. *Bulletin of earthquake engineering*, 8(3), pp.593-607.
- Grünthal, G., 1998. *European macroseismic scale 1998*. European Seismological Commission (ESC).
- Herak, M., Herak, D. and Markušić, S., 1996. Revision of the earthquake catalogue and seismicity of Croatia, 1908–1992. *Terra Nova*, 8(1), pp.86-94.
- Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Ivančić, I., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Sović, I. (2011). Republika Hrvatska. Karta potresnih područja, <http://seizkarta.gfz.hr>.
- Herak, M.(2012.): Hrvatska karta potresne opasnosti—kako je nastala i kako dalje?.

- Kovačić, M., Mandić, O. and Tomljenović, B., 2016. Miocene paleo-lakes of the southwestern Pannonian Basin. *Field Trip Guidebook. Lake-Basin-Evolution*, pp.11-31.
- Kramer, S.L., 1996. *Geotechnical earthquake engineering*. Pearson Education India, pp. 654
- M 5.3 - 2km WSW of Kasina, Croatia
<http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eventpage/us70008dx7/dyfi/intensity>
- Markušić, S., 2008. Seismicity of Croatia. In *Earthquake Monitoring and Seismic Hazard Mitigation in Balkan Countries* (pp. 81-98). Springer, Dordrecht.
- Markušić, S., Stanko, D., Korbar, T., Belić, N., Penava, D. and Kordić, B., 2020. The Zagreb (Croatia) M5. 5 Earthquake on 22 March 2020. *Geosciences*, 10(7), p.252.
- Márton, E., Pavelić, D., Tomljenović, B., Avanić, R., Pamić, J. and Márton, P., 2002. In the wake of a counterclockwise rotating Adriatic microplate: Neogene paleomagnetic results from northern Croatia. *International Journal of Earth Sciences*, 91(3), pp.514-523.
- Ministarstvo unutarnjih poslova republike Hrvatske. Ravnateljstvo civilne zaštite.
<https://civilna-zastita.gov.hr>
- Petrovski, J.T., 2004, January. Damaging effects of July 26, 1963 Skopje earthquake. In *Middle East Seismological Forum, Cyber Journal of Geoscience Volume Two*.
- Schmid, S.M., Bernoulli, D., Fügenschuh, B., Matenco, L., Schefer, S., Schuster, R., Tischler, M. and Ustaszewski, K., 2008. The Alpine-Carpathian-Dinaridic orogenic system: correlation and evolution of tectonic units. *Swiss Journal of Geosciences*, 101(1), pp.139-183.
- Shearer, P.M., 2009. *Introduction to Seismology*, Cambridge University Press.
- Stanko, D., 2018. *Analysis of the local site effects on the amplification of seismic ground motion in Croatia* (Doctoral dissertation, University of Zagreb. Faculty of Science. Department of Geophysics.).
- Stanko, D., Gülerce, Z., Markušić, S. and Šalić, R., 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, pp.16-29.
- Stein, S. and Wysession, M., 2003. *An introduction to seismology, earthquakes, and earth structure* (No. 550.34 STE), 11.
- Tomljenović, B., Csontos, L., Márton, E. and Márton, P., 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), pp.145-167.
- Torbar, J., 1882. *Izvešće o zagrebačkom potresu 9. studenoga 1880*. Jugoslavenska akademija znanosti i umjetnosti.
- Utsu, T. and Ogata, Y., 1995. The centenary of the Omori formula for a decay law of aftershock activity. *Journal of Physics of the Earth*, 43(1), pp.1-33.
- Van Gelder, I.E., Matenco, L., Willingshofer, E., Tomljenović, B., Andriessen, P.A.M., Ducea, M.N., Beniest, A. and Gruić, A., 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), pp.1952-1978.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčić-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y. and Stopar, B., 2010. GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications. *Tectonophysics*, 483(3-4), pp.214-222.

Sažetak

Geodinamika Zagrebačkog rasjednog sustava

Iva Lončar

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 $M_{5.3}$ koji se dogodio u nedjelju 22. ožujka 2020. u 06:24 s epicentrom u blizini Markuševca i Čučerja, 7 km od Zagreba najjači je instrumentalno zabilježen 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. Iako je približno procijenjeno da je gibanje tla od 0.16 - 0.19 g barem dvostruko amplificirano, veliku ulogu u nastaloj šteti imaju nepropisna i strukturno neadekvatna gradnja.

Pomoću prostorne razdiobe žarišta glavnog i naknadnih potresa su se u softveru *MOVE* pomoću IDW metode modelirale tri rasjedne ravnine koje najbolje opisuju aktivirane rasjede. Sva tri rasjeda su duboko ukopana, 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 će se seizmičnost ovog područja, kako je određeno pomoću modificiranog Omorijevog zakona, vratiti na razinu prije glavnog potresa za otprilike 2 godine nakon glavnog potresa.

Katalog potresa sadrži 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, geodinamika, strukturno modeliranje, sustav rasjeda, seizmičnost

Summary

Geodynamics of Zagreb fault system

Iva Lončar

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 06:24, an earthquake 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. However, besides strong ground motion, the main reasons for a big material damage was improper construction of buildings.

In this research, spatial distribution of mainshock and aftershocks were analysed in structural geological modelling software *MOVE* using IDW metode. 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,

and parameters given in modified Omori law, it is expected that the seismicity of this epicentral area will be on the same level as before the mainshock 2 years after the mainshock happened.

Earthquake catalogue used in this research still contains preliminary analysed earthquakes that can still be changed and therefore results given in this research are preliminar. 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, geodynamics, structural modeling, fault system, seismicity

Dodatak A 3D prikaz modeliranih rasjeda

Na CD-u priloženom uz ovaj rad nalazi se PDF dokument s trodimenzionalnim prikazom modeliranih rasjednih ravnina pod imenom *ILoncar_3Dmodel1.pdf*.*

Dodatak B *Time-lapse*

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

Na CD-u priloženom uz ovaj rad nalazi se PDF dokument s trodimenzionalnim prikazom hipocentara, 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_3Dmodel2.pdf*.*

*Potrebno duže vremena za učitavanje jer je datoteka velika.