

0 potresima i seizmologiji – što bi jedan inženjer trebao znati

doc. dr. sc. Iva Dasović, prof. dr. sc. Marijan Herak

Geofizički odsjek Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, UniZg

mr. sc. Ines Ivančić, Snježan Prevolnik, dipl. ing.

Seizmološka služba Geofizičkog odsjeka Prirodoslovno-matematičkog fakulteta, UniZg

Što je seizmologija?

Seizmologija je znanstvena disciplina koja proučava nastajanje potresa, rasprostiranje seizmičkih valova, njihov učinak na površini Zemlje i samu građu Zemlje.

grč. *seismos* = potres + grč. *logos* = znanost

„... Zadatak je seizmologije, da prouči unutrašnjost zemlje i da nastavi ondje, gdje geolog prestaje, a ima u modernim seizmografima neku vrst dalekozora, kojim može posmatrati najveće dubine...” Andrija Mohorovičić



2016. Kaikoura, NZ, M7.8



1880. Remete - Zagreb

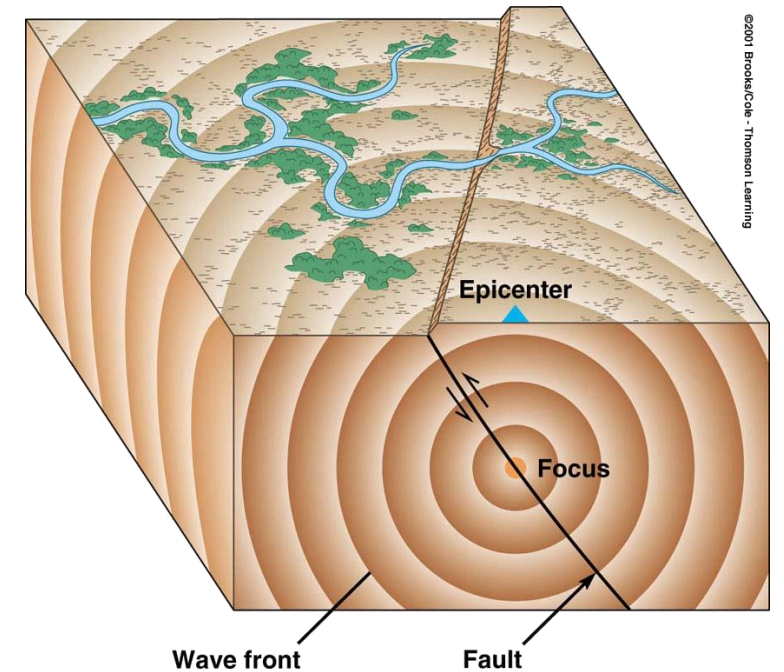
Što su potresi?

Potres je iznenadno otpuštanje nakupljene potencijalne elastičke energije u Zemljinoj unutrašnjosti (kori) u obliku elastičkih (seizmičkih) valova i topline.

Najčešće se događaju na **rasjedima* (tektonski potresi)** a mogu još biti **vulkanski, urušni, impaktni i umjetni** (npr. eksplozije, inducirani potresi).

Kvaziperiodični su, što znači da se **ponavljaju u nepravilnim razmacima**.

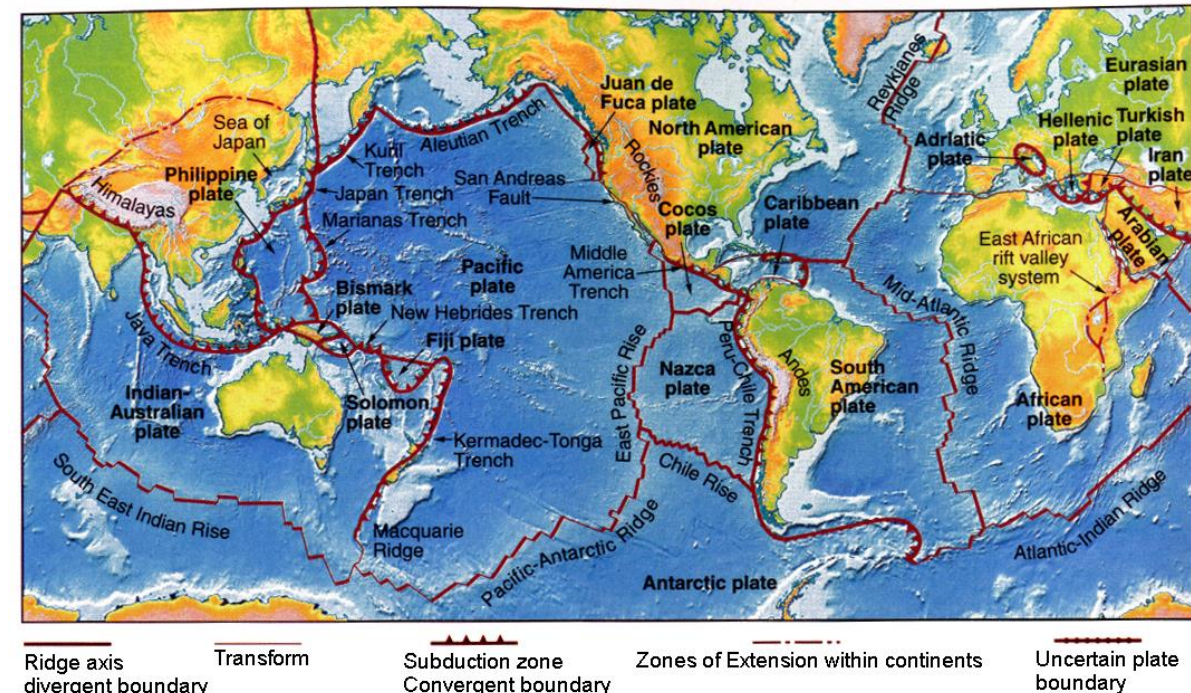
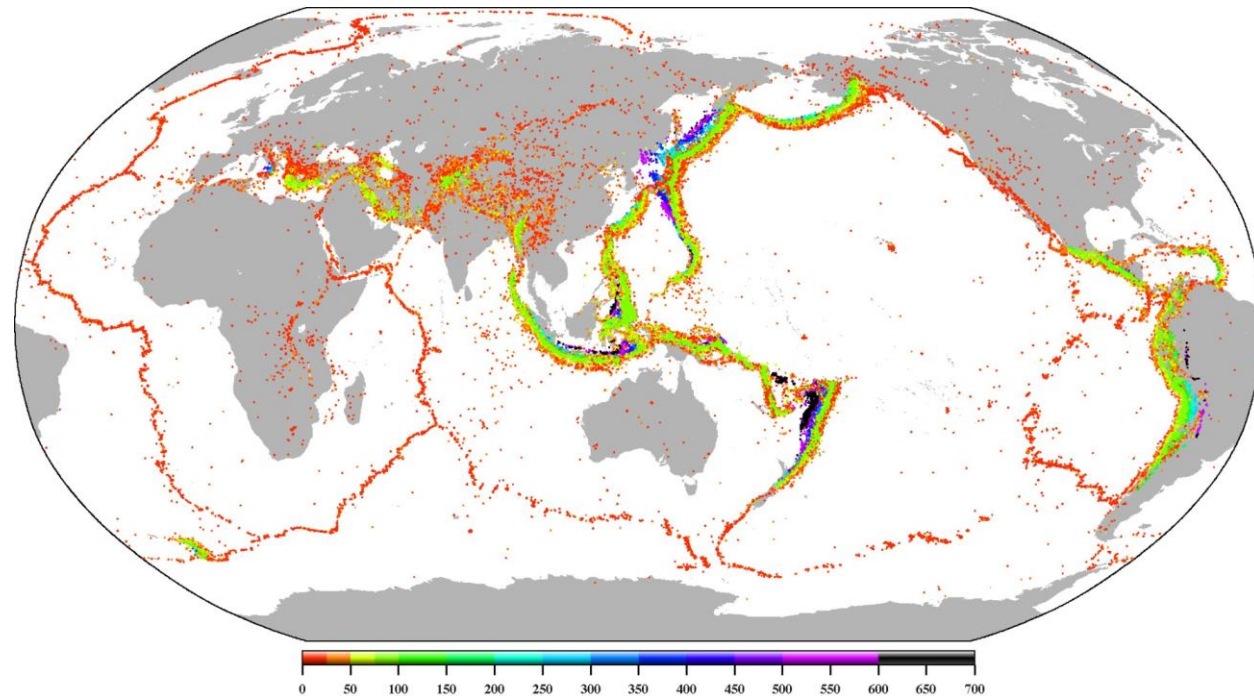
* Rasjed definiramo kao posmične pukotine po kojim je ostvaren vidljiv pomak stijenskih blokova.



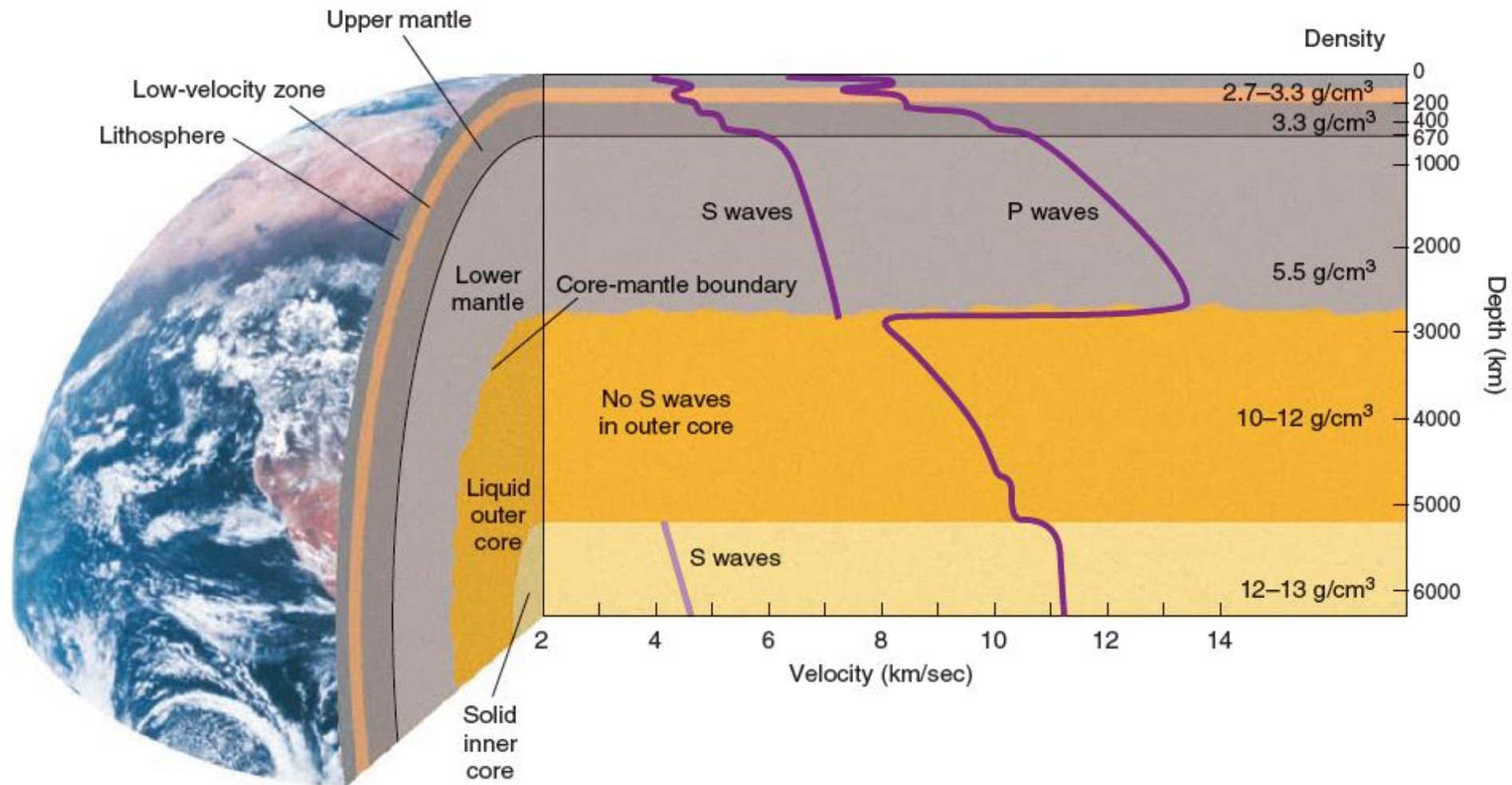
Zašto (i gdje) se događaju potresi?

Zemljina je litosfera razlomljena na ploče koje “plutaju” po krutom ali žitkijem Zemljinom plaštu. Na njihovim rubovima – gdje one nastaju ili se sudaraju ili pomiču jedna uz drugu – nastaju potresi.

Iako se najsnažniji potresi najčešće događaju u područjima njihovih sudara, pogotovo gdje se oceanska ploča podvlači pod kontinentsku, snažan potres može se dogoditi bilo gdje u tektonskoj ploči ali u pravilu rjeđe.



Zašto (i gdje) se događaju potresi? Građa Zemlje.



Kako nastaje potres?

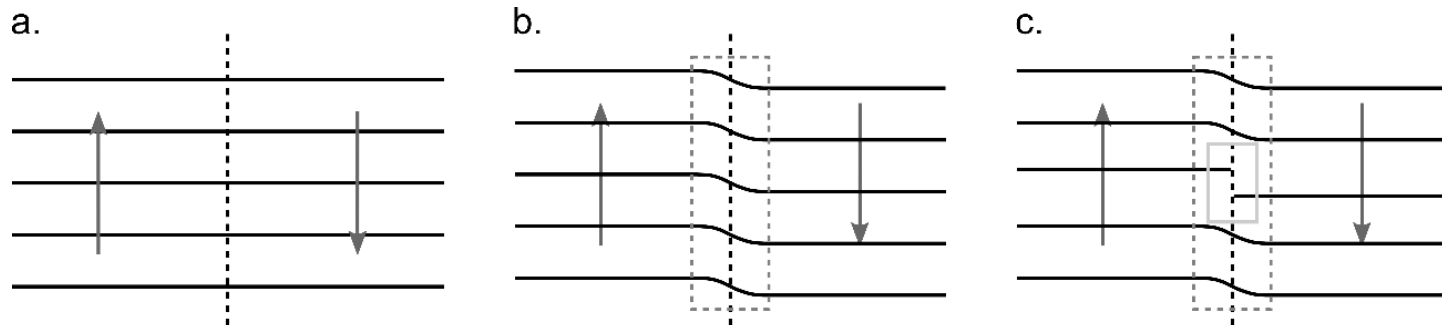
Harry F. Reid istraživao je posljedice snažnog potresa $M_W = 7.9$ koji se dogodio **18. travnja 1906. godine u San Franciscu.**

Reid je iskoristio geodetska mjerenja u San Franciscu i okolici koja su napravljena prije i poslije potresa.

Istraživanja su pokazala da su se dvije strane tla duž pukotine pomaknule do 6 m jedna u odnosu na drugu.

1910. godine objavio je **teoriju elastičkog odraza:**

**djelovanje sila suprotnog smjera → naprezanje i deformacija
→ pucanje i pomak → novo ravnotežno stanje → ...**



San Francisco: potres 1906. god.

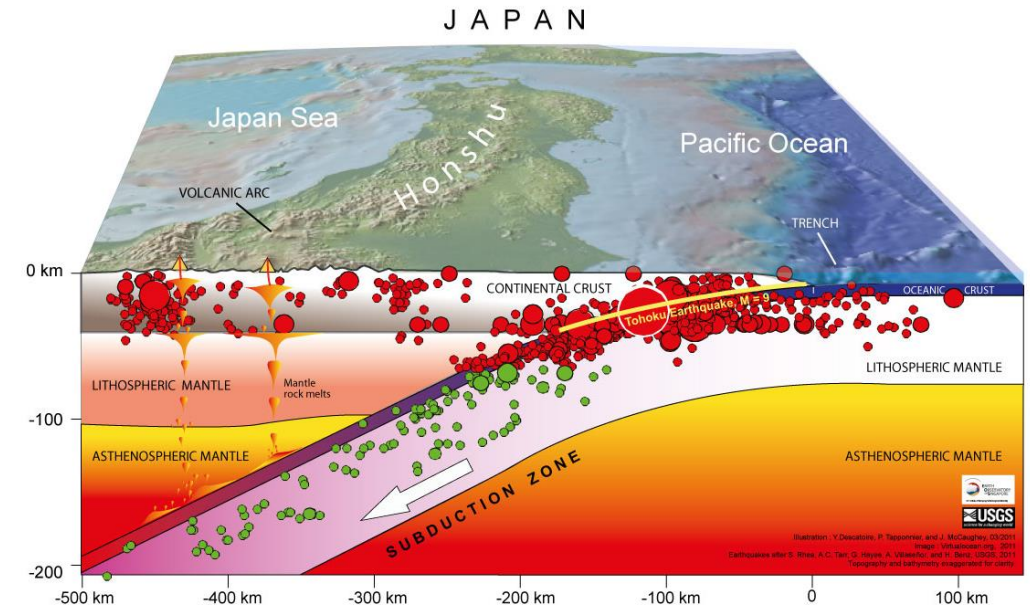
Prethodni i naknadni potresi

Sva akumulirana napetost neće se nužno osloboditi u jednom potresu! A neko vrijeme bit će potrebno da sustav pronađe novu ravnotežu.

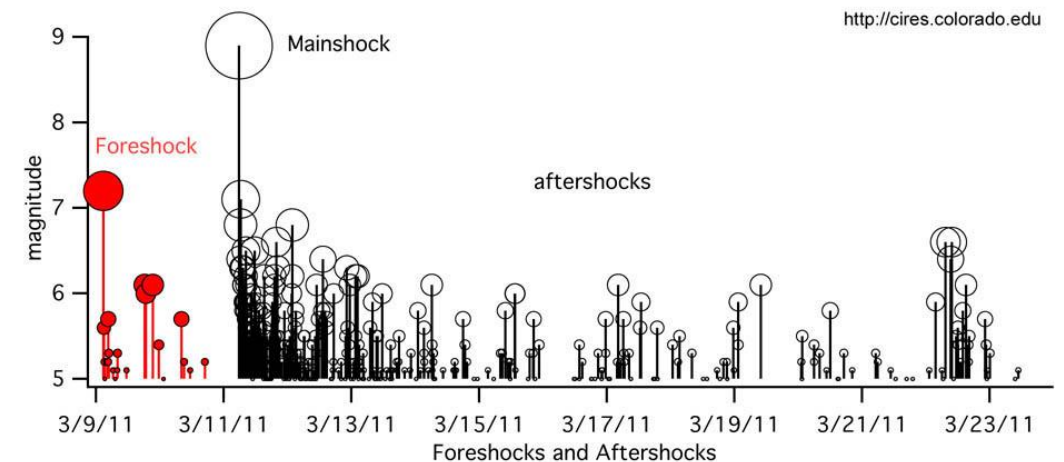
Iza svakog jakog potresa slijedi niz slabijih naknadnih potresa (*aftershocks*) a ponekad mu i prethode (*foreshocks*).

Snažniji potres → jači naknadni potresi, više naknadnih potresa i u duljem razdoblju!

Serijske naknadnih potresa nakon velikih glavnih potresa mogu trajati i više godina.



Tohoku – Sendai, Japan: 11. 3. 2011. M9.0



Statističko-empirijski zakoni o pojavnosti potresa

Gutenberg-Richterova relacija govori nam o raspodjeli broja potresa prema magnitudi.

$$\log N = a - bM$$

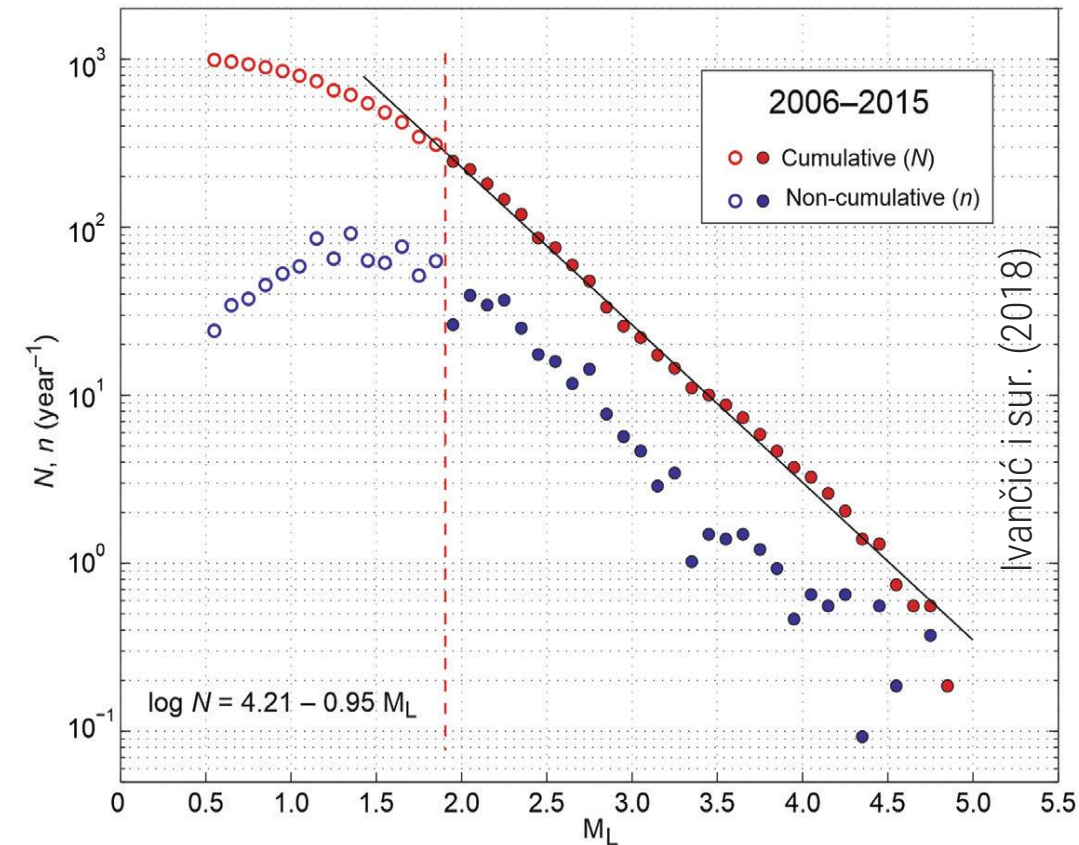
N = broj potresa s magnitudom $\geq M$

Ovakvu razdiobu imaju fraktali (svojstvo samosličnosti), a oni se vežu uz **kaotične pojave**. Takve je pojave teško predvidjeti jer mali uzrok može rezultirati velikom posljedicom (*efekt leptirovih krila*). Zato je i potrese jako teško (ako ne i nemoguće) predvidjeti!

Omorijev zakon (Omori-Utsuov zakon) kaže da se učestalost potresa n u nekoj seriji smanjuje s vremenom t .

$$n = \frac{c}{(k + t)^p}$$

Båthov zakon nam kaže da će najjači naknadni potres obično imati magnitudu manju od glavnoga za ≈ 1.1 .



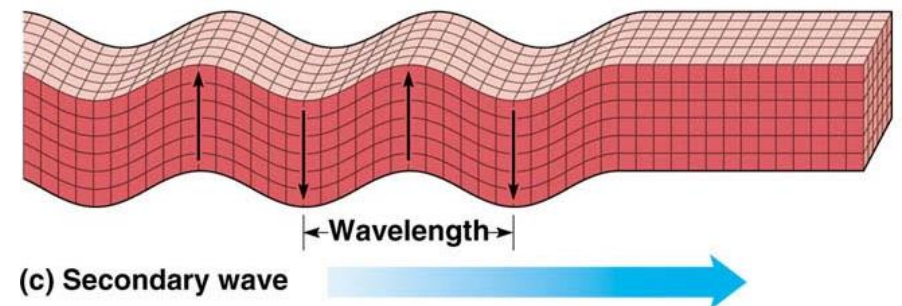
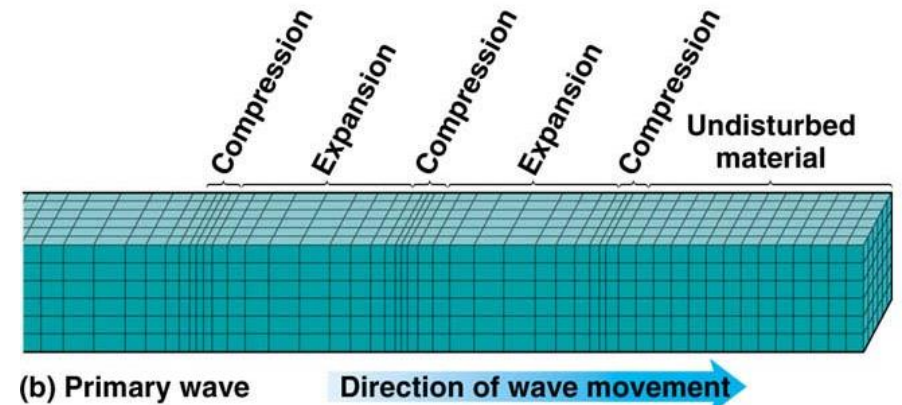
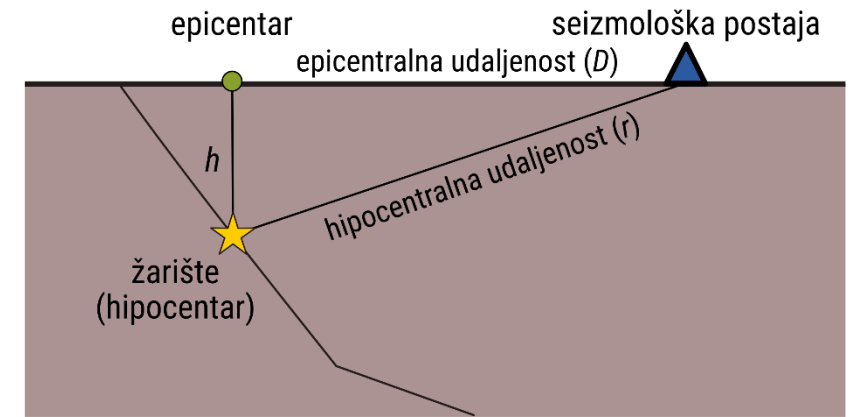
Koeficijent b uglavnom iznosi oko 1.0. Znači, za svaku jedinicu smanjenja magnitude potresa ima 10 puta više!

Seizmički valovi – prostorni valovi

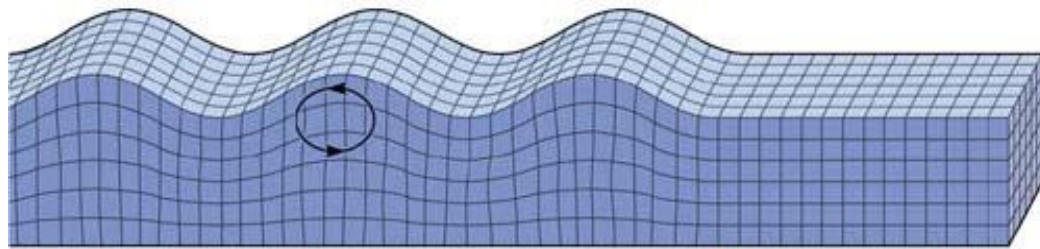
Pri pomaku rasjednih krila, u samom žarištu, nastaje **valni poremećaj** koji putuje Zemljom na sve strane u obliku dvije različite vrste prostornih valova.

Longitudinalni P-valovi su najbrži (≈ 6 km/s u kori) i imaju malene amplitude.

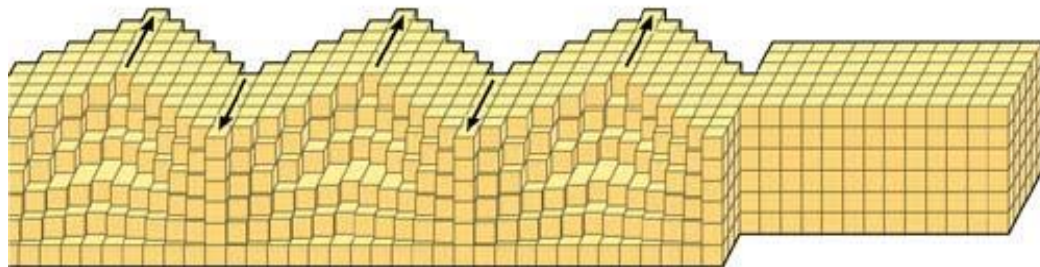
Transverzalni ili S-valovi nešto su sporiji (≈ 3.5 km/s u kori), ali imaju velike amplitude (i do pet puta veće od P-valova). S-valovi mogu uzrokovati štetu, ako je potres dovoljno jak i blizu.



Seizmički valovi – površinski valovi



(a) Rayleigh wave



(b) Love wave

Površinski valovi putuju površinom i njihova amplituda opada s dubinom. **Nastaju međudjelovanjem prostornih valova sa strukturom Zemlje, odnosno diskontinuitetima.**

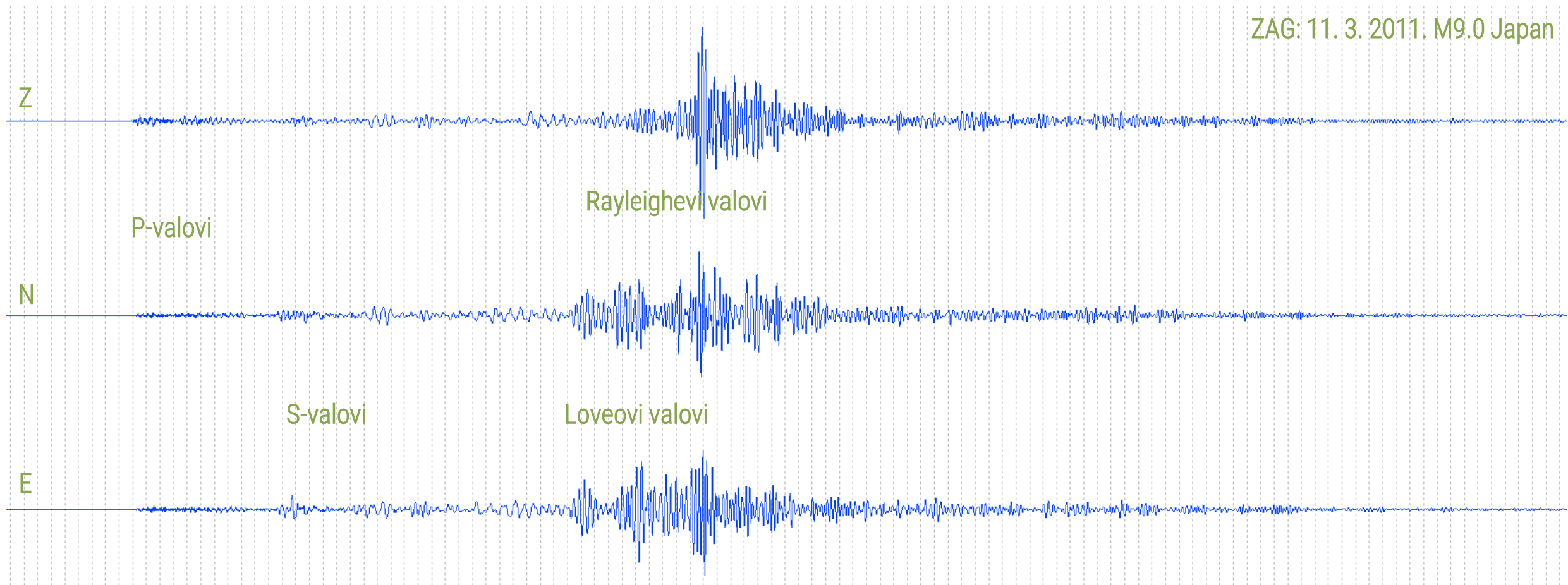
Loveovi valovi nastaju od reflektiranih i superponiranih horizontalnih SH-valova. Mogu postojati samo u slojevitoj Zemlji! Nešto su sporiji od S-valova.

Rayleighjevi valovi nastaju refleksijom P- i SV-valova na diskontinuitetima i njihovom superpozicijom.

Površinski valovi imaju najveće amplitude na seizmogramu.

Seizmički valovi

Površinski valovi bit će **izraženi kod snažnih i plitkih potresa** jer oslobađaju puno energije blizu površine i zato što sporije gube energiju. Površinski valovi mogu uzrokovati znatnu štetu.

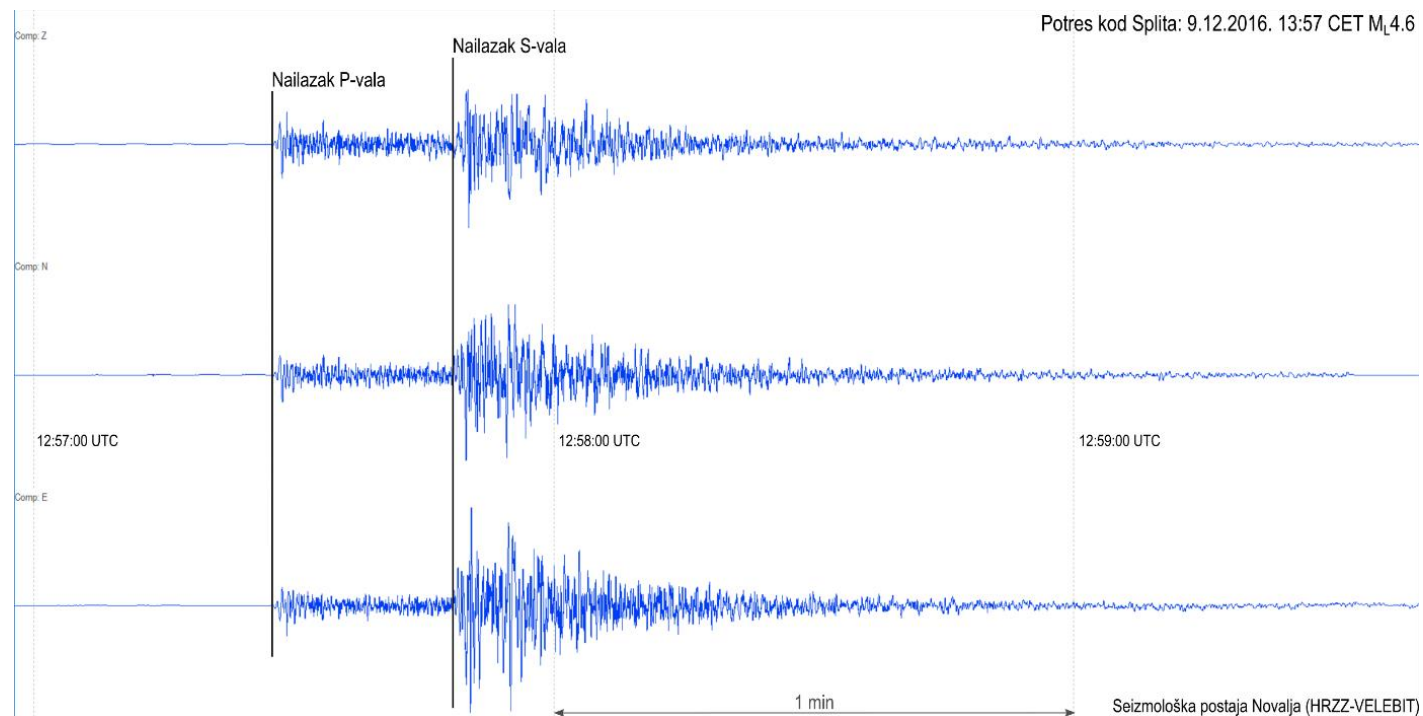


Bilježenje potresa – seizmograf

Seizmograf je uređaj koji konstantno bilježi gibanje Zemljine površine, uglavnom na principu njihala ili elastične opruge i elektromagnetske indukcije, a može bilježiti: pomak, **brzinu** i ubrzanje (akcelerograf).

Seizmogram je zapis gibanja tla, a može prikazivati seizmički nemir, eksploziju, urušavanje, potres...

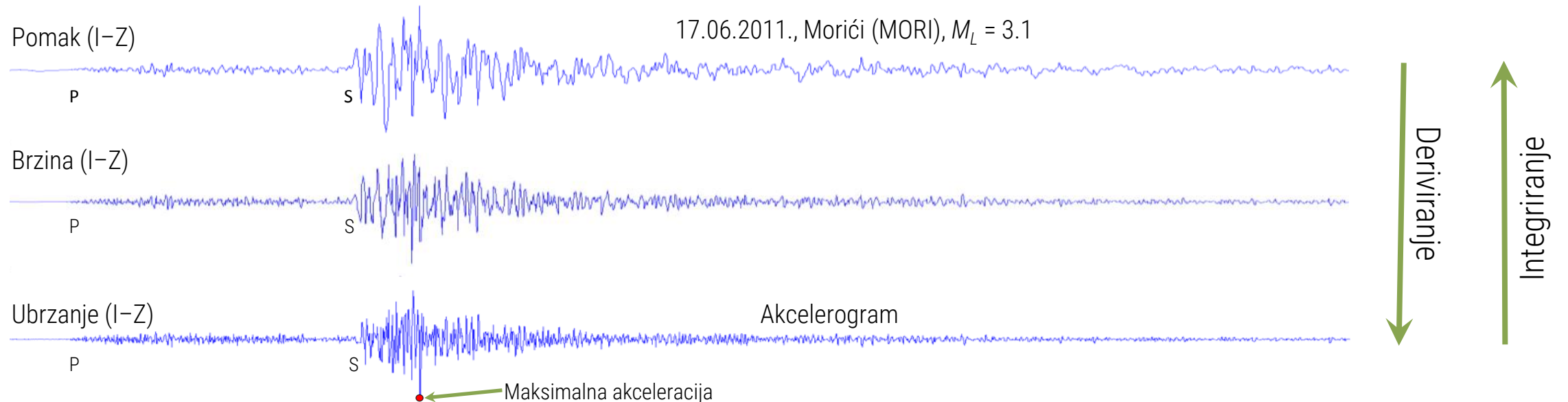
Seizmološka postaja je mjesto na kojem se instrumentima kontinuirano bilježi gibanje Zemljine površine, pa i ono izazvano potresom.



Seizmograf vs. akcelerograf

Kao i svako gibanje, i gibanje površine tla može se promatrati kao vremensku ovisnost pomaka tla D [m], **brzine** gibanja tla V [m/s], ili **ubrzanja** tla A [m/s²]. U ovisnosti o konstrukcijskim detaljima seizmografa, neki će seizmogrami biti proporcionalni s D (mehanički seizmografi), neki s V (elektromehanički seizmografi, praktički svi seizmografi danas), a neki s A (akcelerografi).

Digitalni instrumenti omogućuju jednostavno preračunavanje $D \rightarrow V \rightarrow A$ (i obrnuto)!



Seizmograf vs. akcelerograf

Obje vrste instrumenata bilježe sve tri komponentne gibanja tla, širokopojasni su i rade na principu naponske vage. Razlikuju se po razini gibanja koje se želi zabilježiti, uvjetima postavljanja i cilju istraživanja.

Seizmograf

- *weak motion instrument* → slabi do umjereni potresi
- visokoosjetljivi → vrlo niska razina unutarnjeg šuma
- osjetljivi na promjene T i p + EM smetnje → zaštitna kutija
- istraživanje lokalne i regionalne seizmičnosti te rasjednih sustava



Streckeisen STS-2



Güralp 3ESPC



Güralp 5TD

Akcelerograf

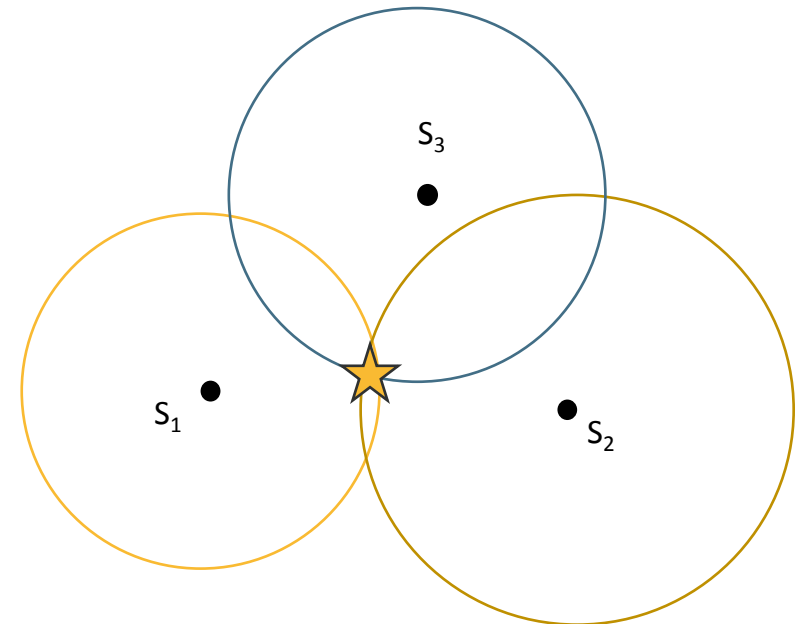
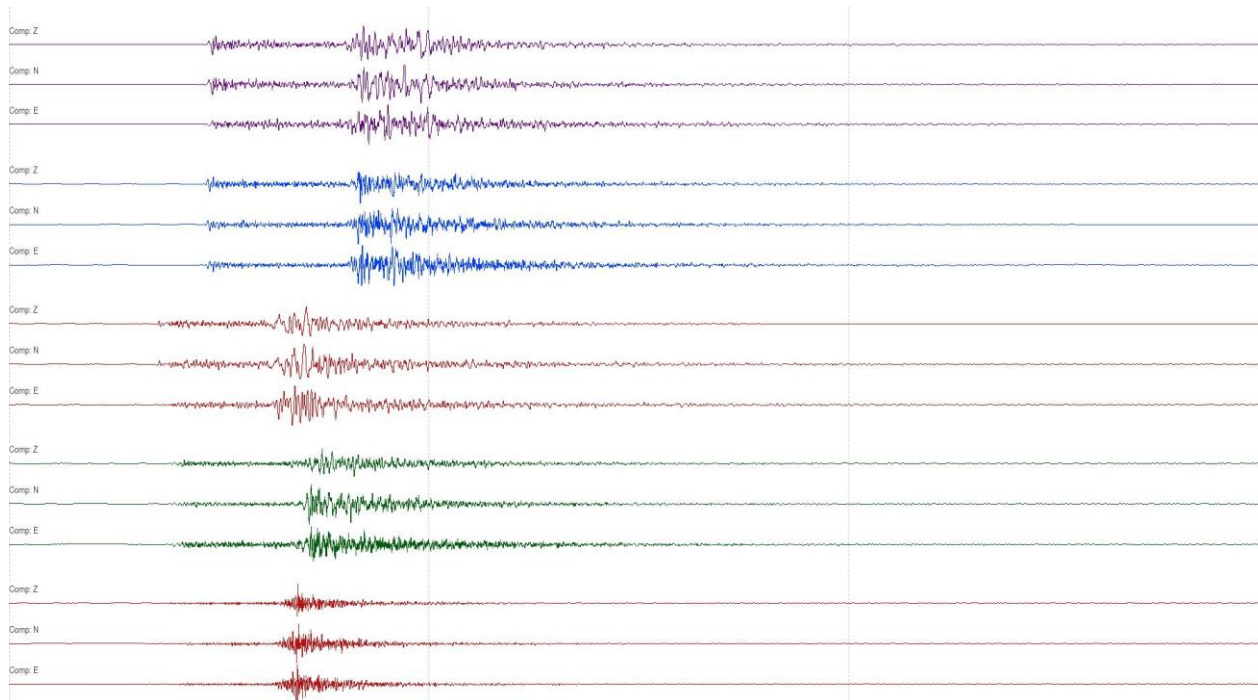
- *strong motion instrument* → jaki potres u neposrednoj blizini
- lokacije s većom razinom seizmičkog šuma
- manje osjetljivi na promjene T i p → zaštitna kutija
- procjena potresne opasnosti, verifikacija potresne otpornosti i izdržljivosti konstrukcija (monitoring)

Lociranje potresa

Za lociranje epicentra su nam potrebni zapisi na **barem tri seizmološke postaje**. Ako želimo odrediti i dubinu žarišta, trebamo **najmanje četiri postaje**. A želimo znati i **koliko je potres bio jak/velik**.

Za lociranje žarišta potresa **moramo znati brzinu putovanja pojedinih faza valova potresnih valova** (model + inverzni problem).

U najjednostavnijem postupku, iz razlike nastupnih vremena t_S [s] i t_P [s] određuje se epicentralna udaljenost D [km], a epicentar je tamo gdje se tri kružnice sijeku.



Lociranje potresa

U praksi, računa se teorijsko vrijeme putovanja vala i uspoređuje s opaženim na seizmogramu – traži se lokacija za koju je odstupanje između opaženog i teorijskog vremena najmanje. Za to nam je potrebno **mного postaja i dobar (što realističniji model brzina)**, pa je rješavanje problema **numeričko (računalno)**. Ovo je **tipični inverzni problem**, gdje se na temelju mjerenja nastupnih vremena valova na površini Zemlje zaključuje o mjestu odakle su i kada krenuli!

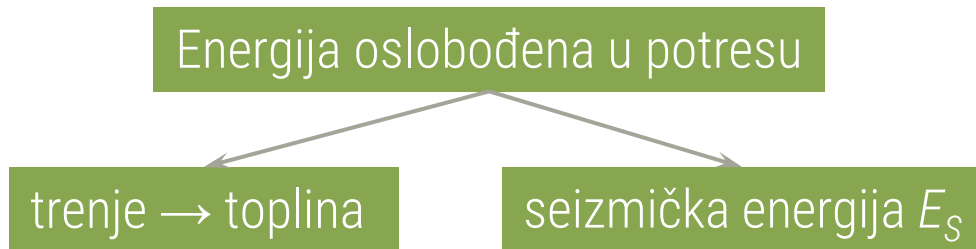
Problemi:

- nedovoljno dobro poznavanje **strukture** unutrašnjosti Zemlje → poopćavanje strukture brzina → smanjena preciznost
- nedovoljno **gusta mreža** seizmoloških postaja → nemogućnost lociranja vrlo slabih potresa, smanjena preciznost lokacije
- nepovoljan **oblik mreže** seizmoloških postaja → smanjuje preciznost lokacije, sustavne pogreške
- određivanje **dubine** žarišta → velika nepouzdanost (sva mjerenja su na površini Zemlje!)

Koliko je potres bio jak? Lokalna magnituda M_L .

Magnituda M = broj koji opisuje relativnu veličinu ili količinu oslobođene seizmičke energije potresa.

Lokalnu magnitudu M_L definirao je Charles F. Richter 1935. god. Često se može čuti (laički) naziv *Richterova ljestvica* ili *magnituda po Richteru*.



$$E_S \propto \left(\frac{A}{T}\right)^2$$

A = najveća amplituda pomaka/gibanja zapisanog na seizmogramu potresa

T = period vala

Potres $M_L = 3$ uzrokovat će na na Wood-Andersonovom seizmografu na epicentralnoj udaljenosti $D = 100$ km pomak maksimalne amplitude $A_{max} = 1$ mm.

$$M_L = \log \frac{A}{T} + F(h, D) + C$$

kalibracijska funkcija

$$M_L = \log A_{max} + 2.094 \log \Delta [^\circ] + 2.190$$

za Hrvatsku

Koliko je potres bio jak? Lokalna magnituda M_L . Momentna magnituda M_W .

Lokalna magnituda je ograničena na $D < 1000$ km. → Što u slučaju $D > 1000$ km?!

Zbog specifičnosti definicije M_L i svojstava spektara potresa, za velike potrese (> 7.0) M_L podcjenjuje njihovu stvarnu veličinu – zasićenje magnitude.

Zato su definirane drugačije magnitude koje su primjerene za jače potrese s većih udaljenosti: npr. magnituda površinskih valova M_S i **momentna magnituda M_W** koja je izravno povezana sa seizmičkim momentom.

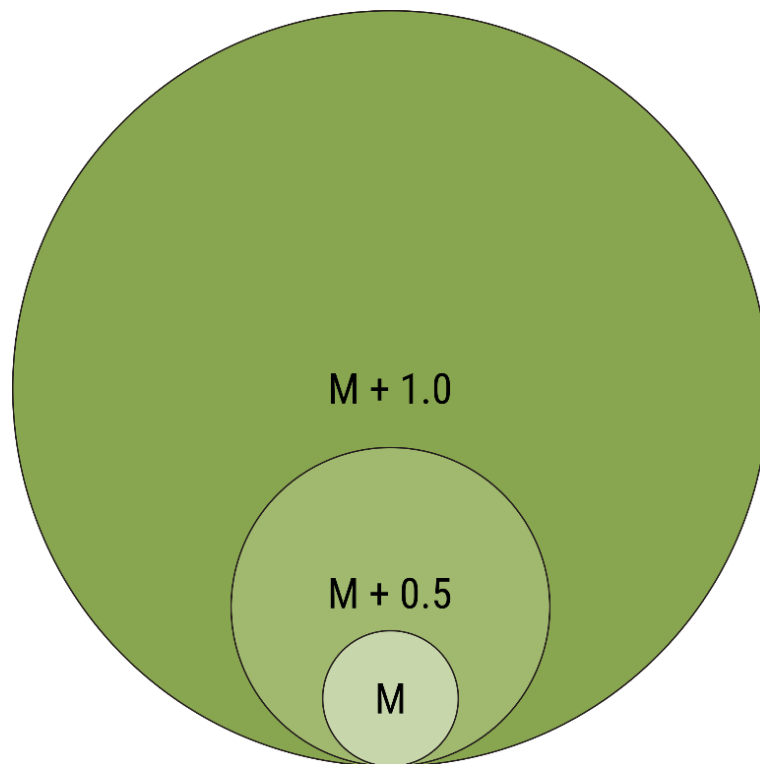
M_W je najbolja mjera veličine potresa, ali ju je mnogo teže izračunati, osobito za male potrese!

Koliko je potres bio jak? Momentna magnituda M_W .

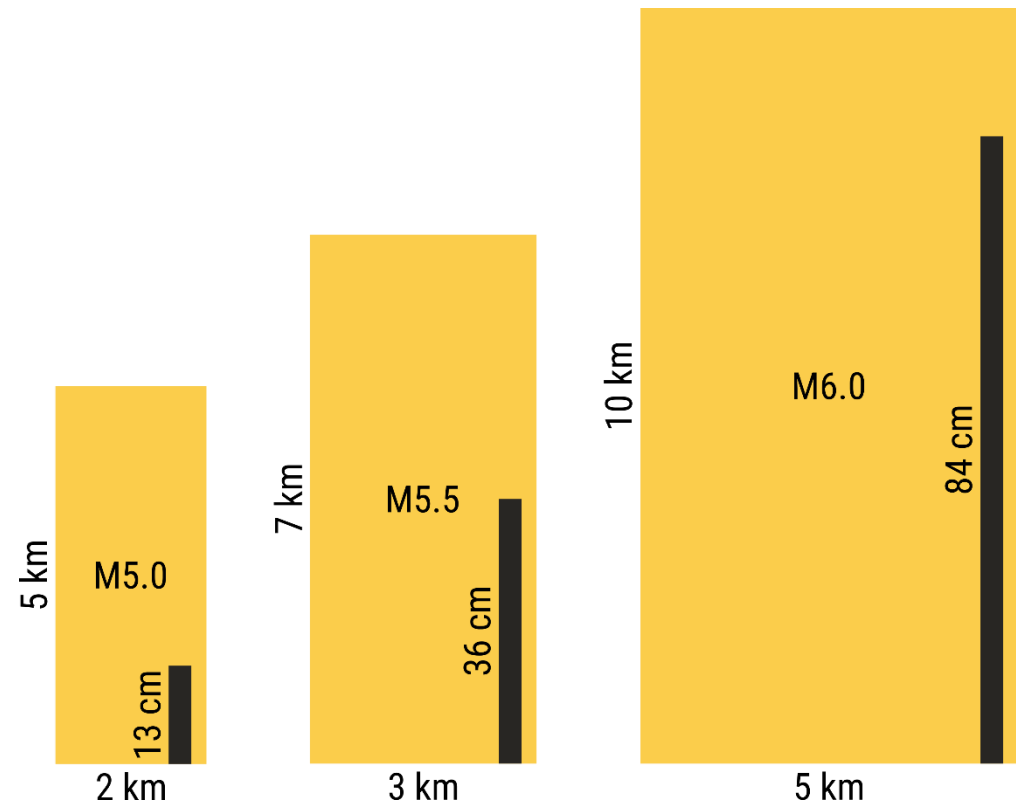
Relativni odnosi oslobođene energije za potrese koji se razlikuju za 0.5 j.m i 1 j.m.

Površina kruga predstavlja količinu energije.

Potres $M + 1$
→ 10 puta veća amplituda od potresa M
→ 32 puta veća energija od potresa M



Skica primjera odnosa površine rasjedanja i prosječnog pomaka po rasjednoj plohi za potrese različite magnitude.



Koliko je potres bio jak? Intenzitet.

Stupanj	Naziv potresa	Kratki opis karakteristika ljestvice MCS
I °	Nezamjetljiv	Bilježe ga jedino seizmografi.
II °	Jedva osjetan	Osjeti se samo u gornjim katovima visokih zgrada.
III °	Lagan	Tlo podrhtava kao kad ulicom prođe automobil.
IV °	Umjeren	Prozorska okna i staklenina zveče kao da je prošao težak teretni automobil.
V °	Prilično jak	Njišu se slike na zidu. Samo pojedinci bježe na ulicu.
VI °	Jak	Slike padaju sa zida, ormari se pomiču i prevrću. Ljudi bježe na ulicu.
VII °	Vrlo jak	Ruše se dimnjaci, crjepovi padaju sa krova, kućni zidovi pucaju.
VIII °	Razoran	Slabije građene kuće se ruše, a jače građene oštećuju. Tlo puca.
IX °	Pustošni	Kuće se teško oštećuju i ruše. Nastaju velike pukotine, klizišta i odroni zemlje.
X °	Uništavajući	Većina se kuća ruši do temelja, ruše se mostovi i brane. Izbija podzemna voda.
XI °	Katastrofalan	Srušena je velika većina zgrada i drugih građevina. Kidaju se i ruše stijene.
XII °	Veliki katastrofalan	Do temelja se ruši sve što je čovjek izgradio. Mijenja se izgled krajolika, rijeke mijenjaju korito, jezera nestaju ili nastaju.

Jačina potresa **na nekom mjestu** može se opisati i (makroseizmičkim) intenzitetom / – **ljestvicom** koja opisuje **učinak** potresne trešnje **na površini Zemlje**.

Učinci se klasificiraju prema jačini podrhtavanja kako ga percipira čovjek, ponašanju objekata u njegovoj okolini, oštećenju zgrada i drugih objekata ili utjecaju na okoliš.

Prema tablici lijevo, koliki je bio intenzitet kojega ste Vi osjetili 22. ožujka 2020.?

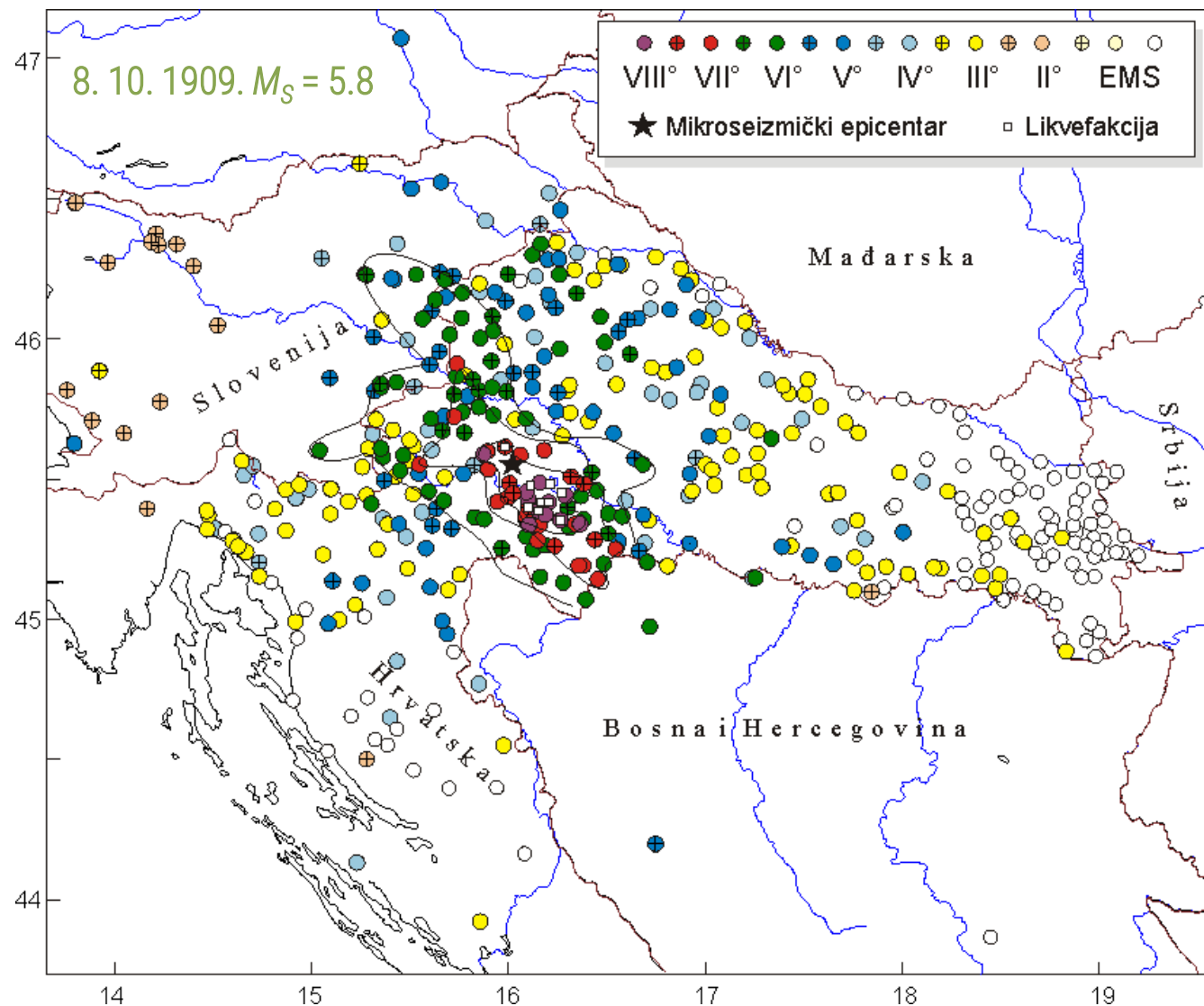
1902. god. Giuseppe Mercalli razradio je Rossi-Forelovu ljestvicu (1883./1884.) koja se koristila dvadesetak godina i tako je nastala Mercallijeva ljestvica intenziteta.

Koliko je potres bio jak? Intenzitet.

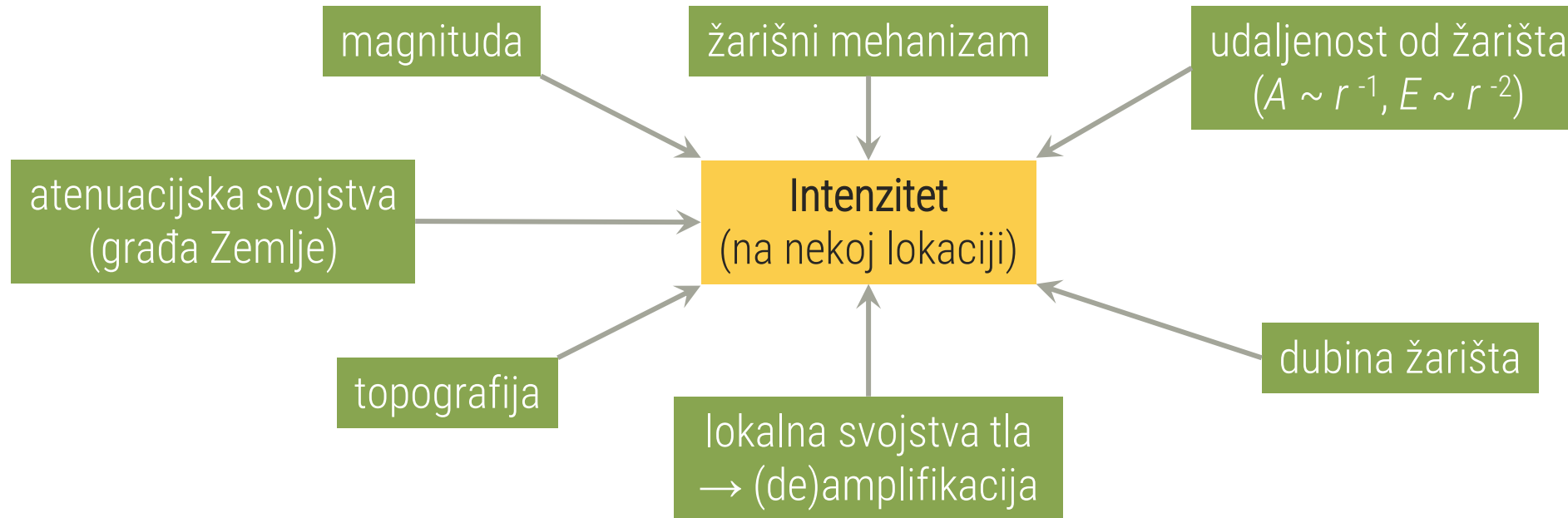
Razvijene su različite ljestvice ovisno o području za koje se primjenjuju i načinu gradnje u njemu, pa su se razvile npr. Mercalli-Cancani-Siebergova (MCS), Modificirana Mercallijeva (MM → SAD), Medvedev-Sponheuer-Karnikova (MSK) i **Europska makroseizmička ljestvica (EMS)**. Njihovi stupnjevi uglavnom odgovaraju jedan drugome, ali su definirani donekle drugačije.

Na karti, područja različitog intenziteta odvojena su izoseistama.

Iz karte izoseista može se odrediti epicentralni intenzitet I_0 , epicentar potresa i dubina žarišta h .



Koliko je potres bio jak? Intenzitet.



Intenzitet je u pravilu **najveći u epicentru i opada s udaljenosti od žarišta** potresa, no ne mora to tako biti.

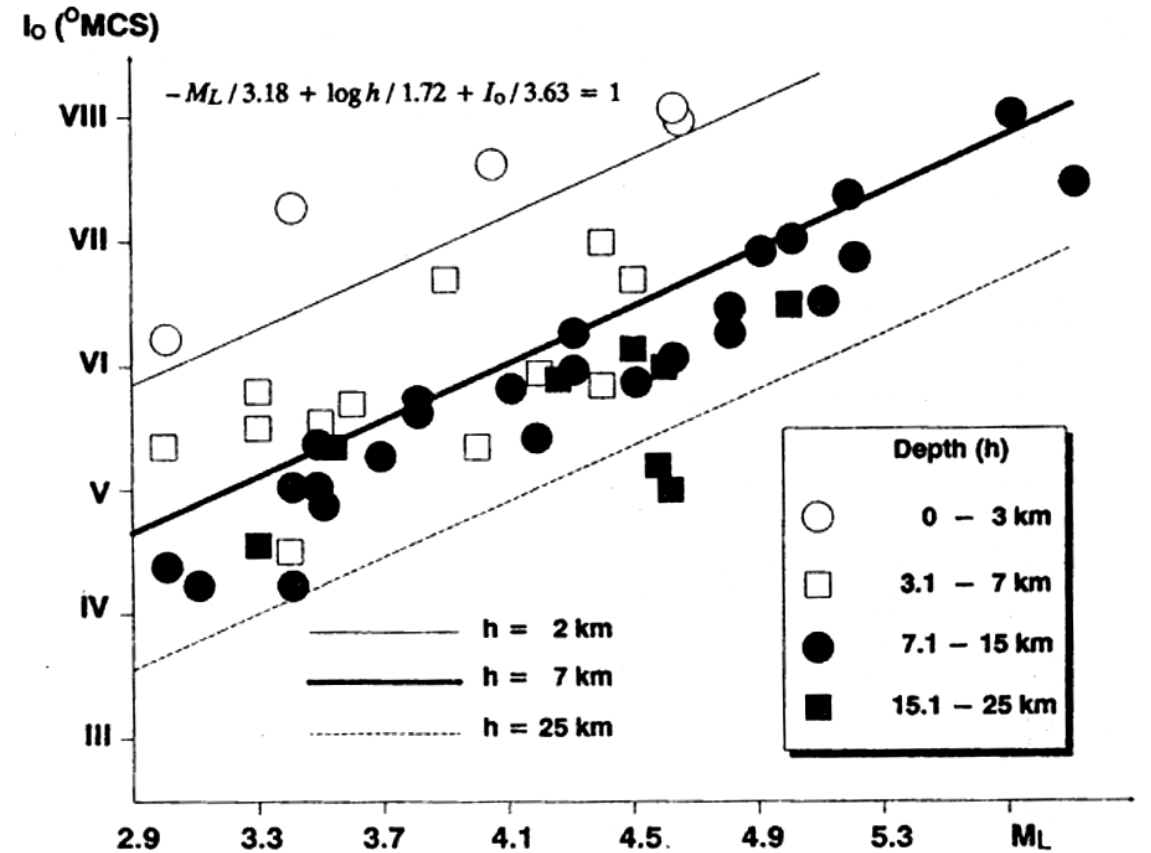
Uz jednaku magnitudu (M), intenzitet u epicentru (I_0) potresa ovisit će o njegovoj dubini žarišta (h). Duboki potres imat će manji intenzitet u epicentru od onoga s plitkim žarištem, ali će se osjetiti na većem području!

Intenzitet vs. magnituda

Postoje empirijski izrazi koji povezuju M , I_0 i h , npr. (Herak, 1989):

$$\frac{M}{3.18} + \frac{\log h}{1.72} + \frac{I_0}{3.63} = 1$$

Povijesnim potresima (koji nisu instrumentalno zabilježeni, približno prije početka 20. stoljeća) nije moguće precizno odrediti magnitudu, pa se ona procjenjuje na temelju opaženih intenziteta – makroseizmička magnituda, M_m !



Dakle, potres ima jednu magnitudu (zapravo ne ☺...), jedan intenzitet u epicentru, ali mnogo intenziteta (za svako naselje barem jedan).

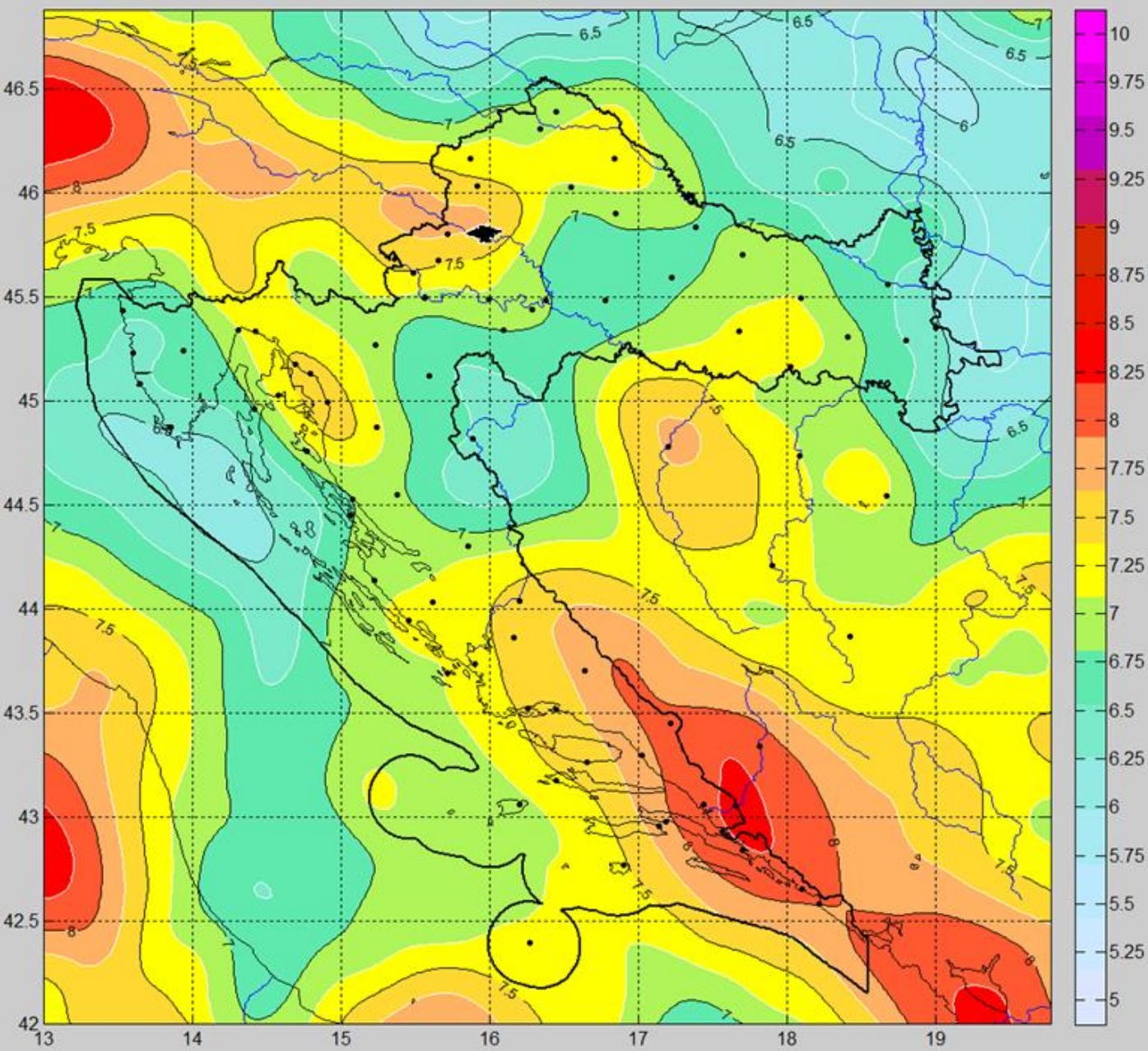
Intenzitet vs. ubrzanje tla?

Iako su stupnjevi makroseizmičkih ljestvica izvorno definirani tako da povećanju od jednog stupnja odgovara udvostručenje maksimalne akceleracije tla (*PGA*), u praksi je **veza između intenziteta i *PGA* vrlo slaba.**

U **grubo** može se uzeti da vrijedi (npr. Masi et al., 2020):

<i>PGA</i> (g)	<i>I</i> (°EMS)
0.65	IX
0.35	VIII
0.20	VII
0.11	VI

Intenzitet vs. ubrzanje tla?



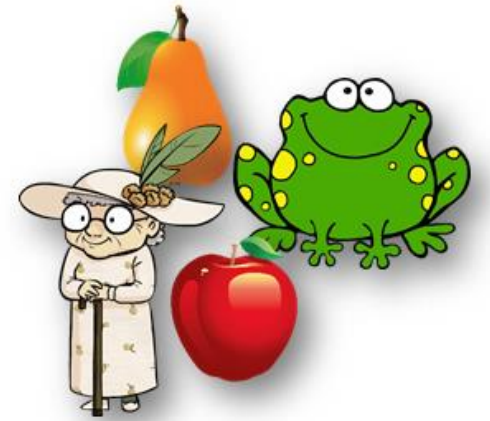
Ali varijacije u stvarnosti mogu biti jako velike! **Intenzitet** potresa mnogo je **bolje koreliran s brzinom trešnje tla**, te posebno s trajanjem trešnje.

Zbog toga je **intenzitet** uglavnom napušten kao mjera potresne opasnosti (hazarda). Ipak, zbog njegove **izravne veze sa štetama** od potresa, on je primjereniji za prikaz hazarda u okviru procjene **potresne ugroženosti (rizika)**!

O babama i žabama, kruškama i jabukama

Iz ovoga je jasno – i magnituda i intenzitet su mjere kojima kvantificiramo potres, ali je ipak često pitanje poput **"Koliko Mercallija odgovara potresu od 6.5 prema Richteru?"** **Besmisleno!** Ne mogu se uspoređivati kruške i jabuke...

A pojmovne nepreciznosti mogu lagano dovesti ozbiljnih posljedica – npr. jedna osiguravajuća kuća isplaćuje osiguranje samo za potrese veće od 5.0 prema Richteru!? **To je posve besmisleno**, očito je da su mislili napisati **V °EMS, jer na tom stupnju počinju štete**. Ovako bi oni mogli bankrotirati, ako se kod njih osiguraju seizmolozi pa prijave štetu od potresa magnitude 5.5 na Kamčatki!



MAGNITUDA (Richter) govori o **snazi (energiji)** samog potresa. Ako potres bude jako duboko, i/ili usred oceana, niti magnitudu 7 nitko neće osjetiti – intenzitet je svuda vrlo malen.

INTENZITET (EMS, MCS, MSK,...) govori o **učincima** potresa, pa **isti potres ima mnogo intenziteta**, ovisno u udaljenosti od žarišta, dubini žarišta, trajanju potresa, utjecaju temeljnog tla...

Posljedice potresa – klizanje tla



Potresi, posebno oni snažni, mogu potaknuti nestabilna tla na **pucanje, odron** ili **klizanje!**



Posljedice potresa – likvefakcija

Vrlo jaki potresi mogu izazvati pojavu **likvefakcije**. Mogu izazvati blatne vulkane, izviranje vode, utonuće zgrada i sl.

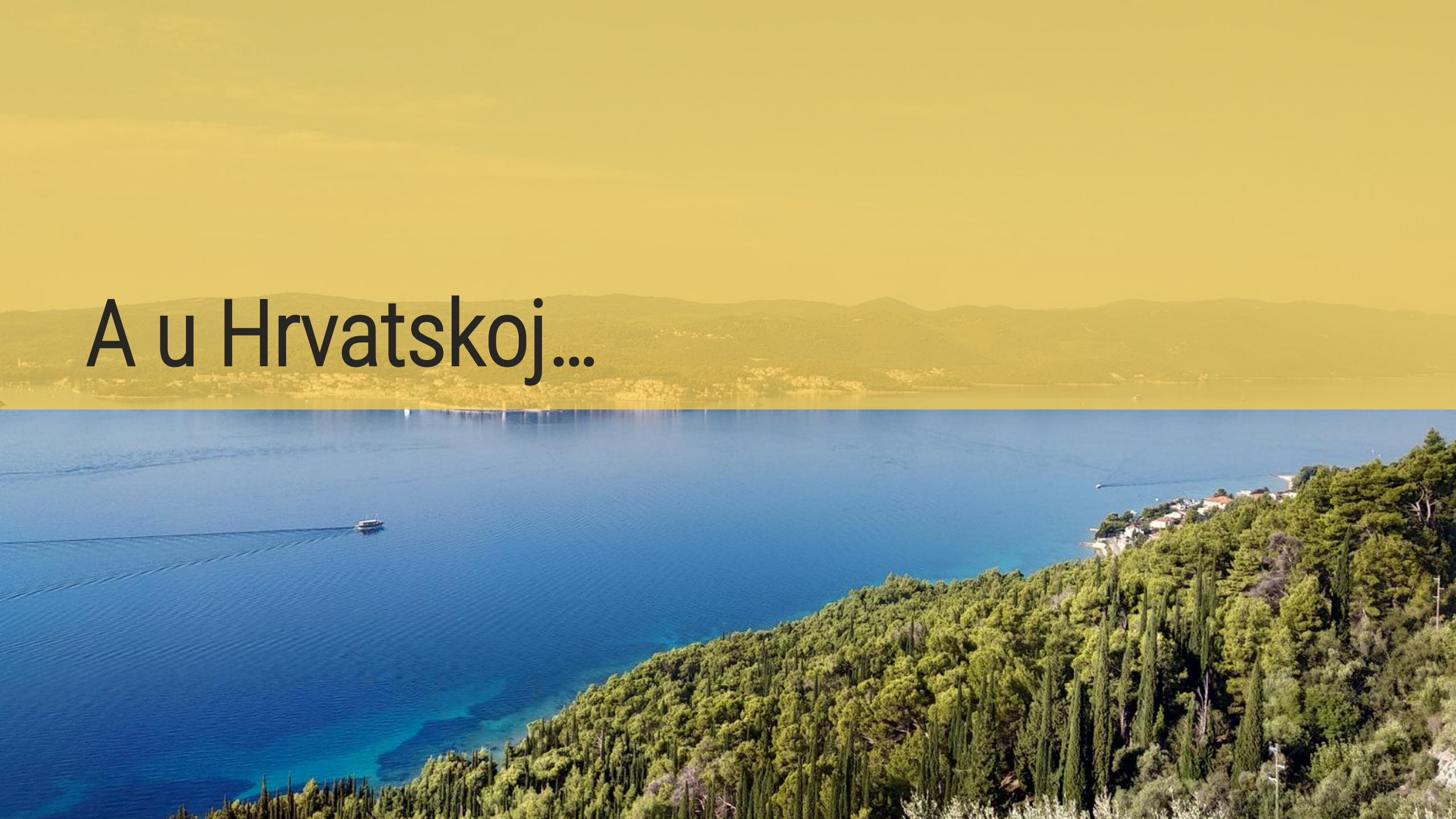


Posljedice potresa – cunami



Valovi koje uzrokuje pomicanje masa na dnu mora/jezera – uzrokovani su potresom, vulkanskim erupcijama i/ili (podvodnim) odronima. To nije plimni val!

A u Hrvatskoj...

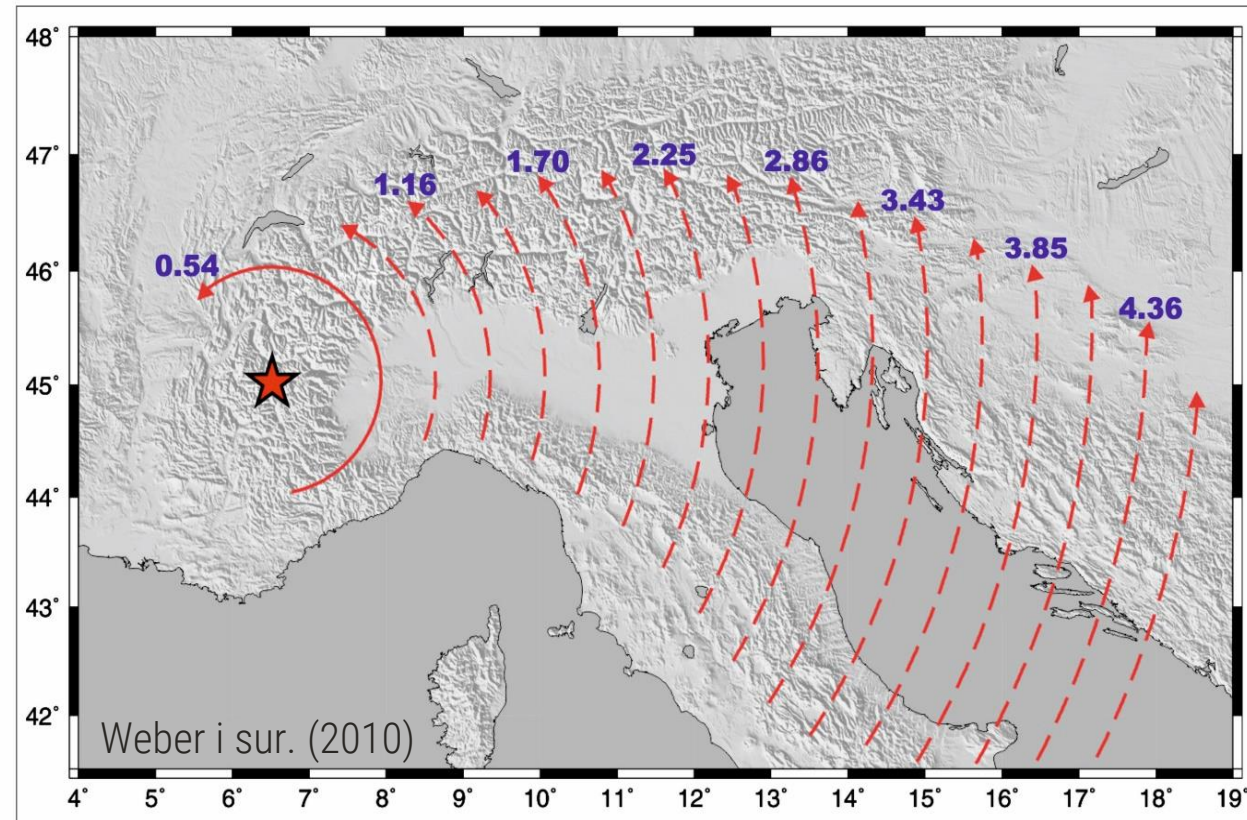


Zašto se događaju potresi u Hrvatskoj?

Afrička ploča gura Jadransku ploču u Euroazijsku ploču zbog čega su se izdigli Dinaridi (i Alpe).



Dasović i sur. (2020)



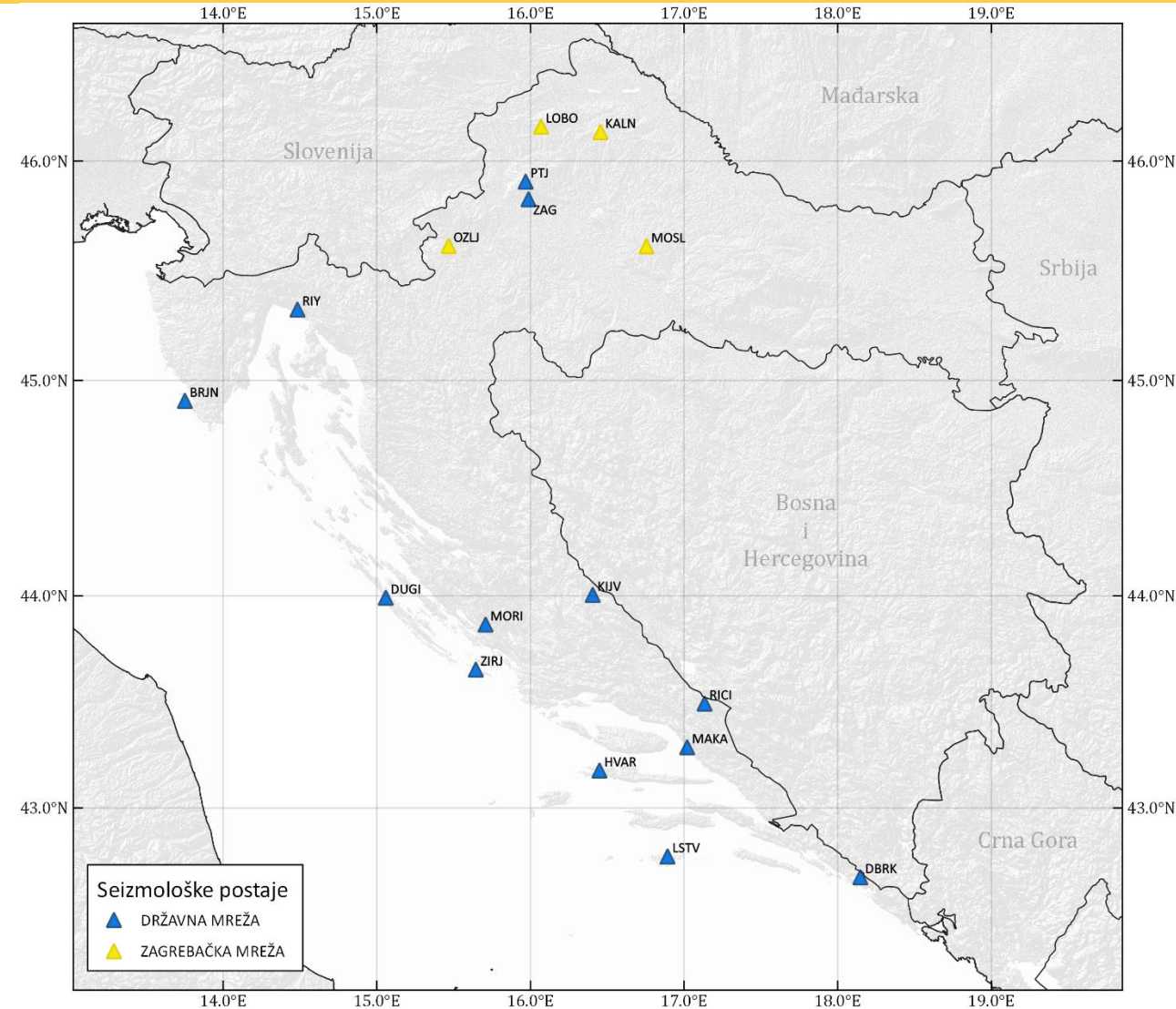
Raspored i brzina konvergentnih kretanja (mm/god.) u stabilnom dijelu Jadranske mikroploče i u okolnim planinskim lancima proračunati na temelju GPS-mjerenja.

Seizmologija u Hrvatskoj

Seizmolozi s **Geofizičkog odsjeka PMF-a** djeluju kroz Seizmološku službu i Geofizički zavod.

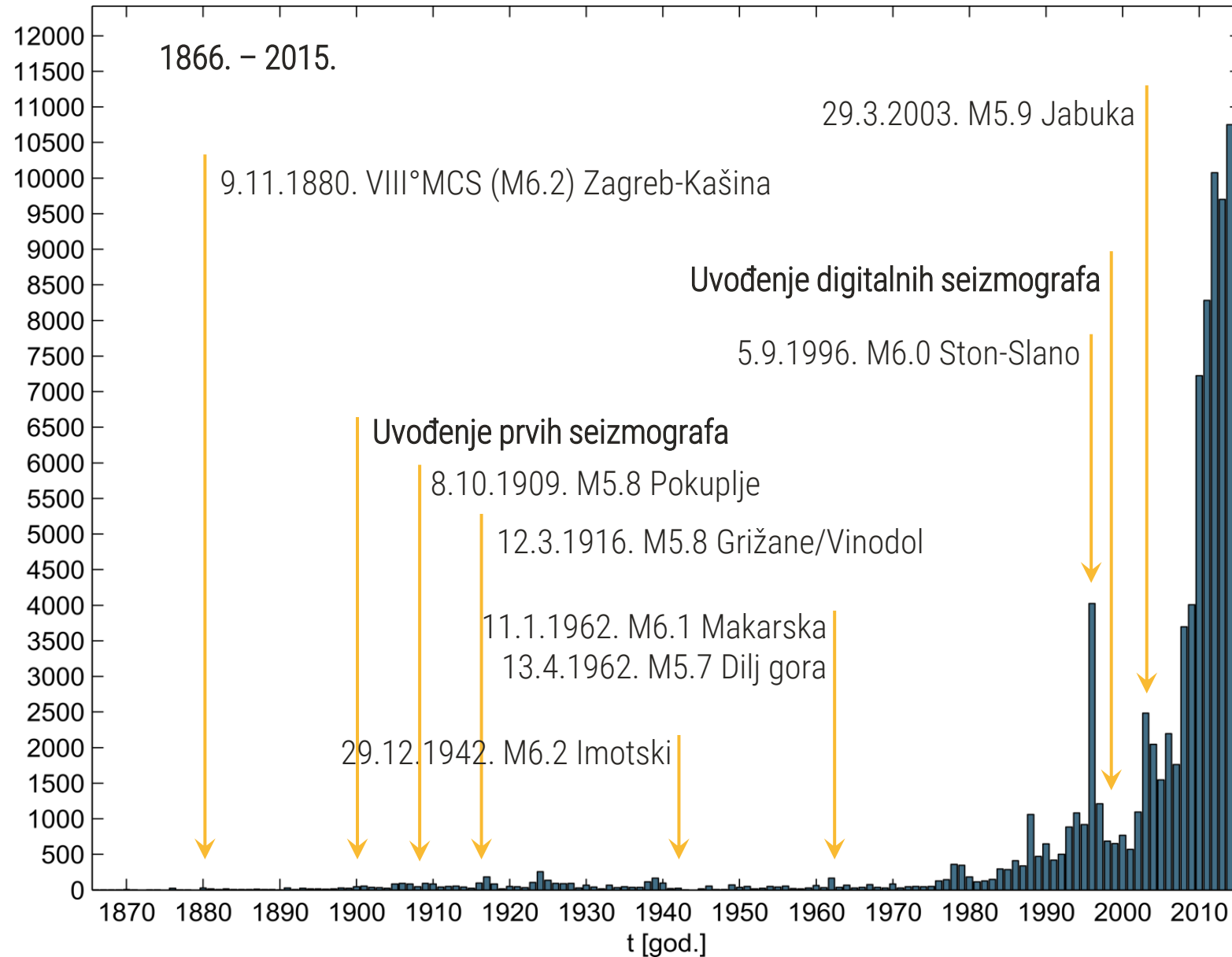
Seizmološka služba je služba koja u Republici Hrvatskoj održava državnu mrežu seizmoloških postaja (uključujući i mrežu akcelerografa), prati i analizira seizmičnost, daje relevantna izvješća o potresu i sl.

Seizmolozi Geofizičkog zavoda Andrije Mohorovičića bave se znanstvenim, nastavnim i stručnim radom. Svojim projektima financiraju mrežu privremenih postaja prema istraživačkom interesu i potrebi.



Hrvatska seizmografska mreža – **stalne postaje** – stanje u srpnju 2020. godine.

Potresi u Hrvatskoj



Potrese u Hrvatskoj bilježimo seizmografima od 1906. godine.

U Hrvatskoj se u **prosjeku locira oko 25 potresa dnevno.**

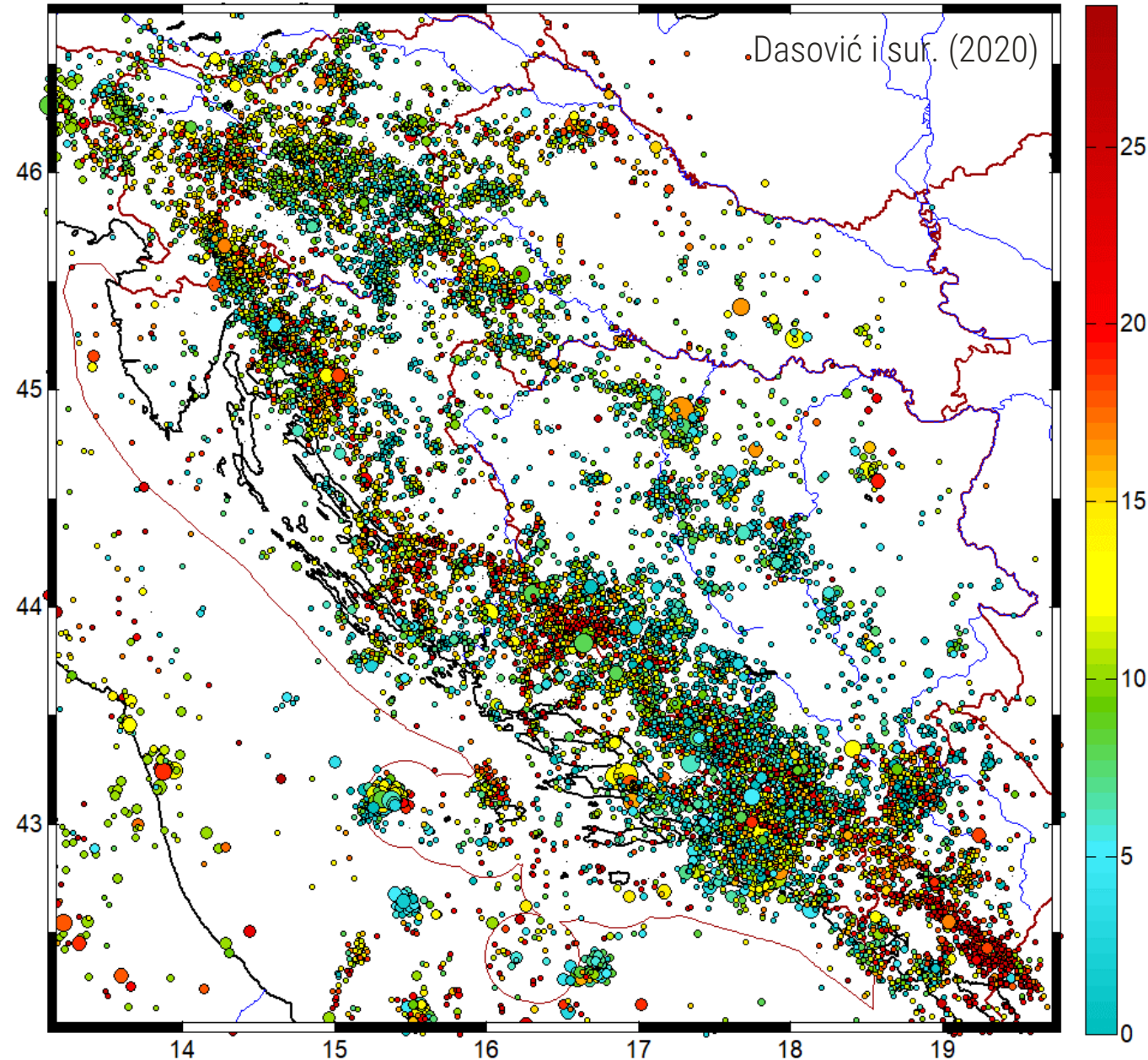
Posljednjih nekoliko godina Seizmološka služba **locira više od 10000 potresa godišnje**, a više od polovine ima epicentar u Hrvatskoj.

Potresi u Hrvatskoj

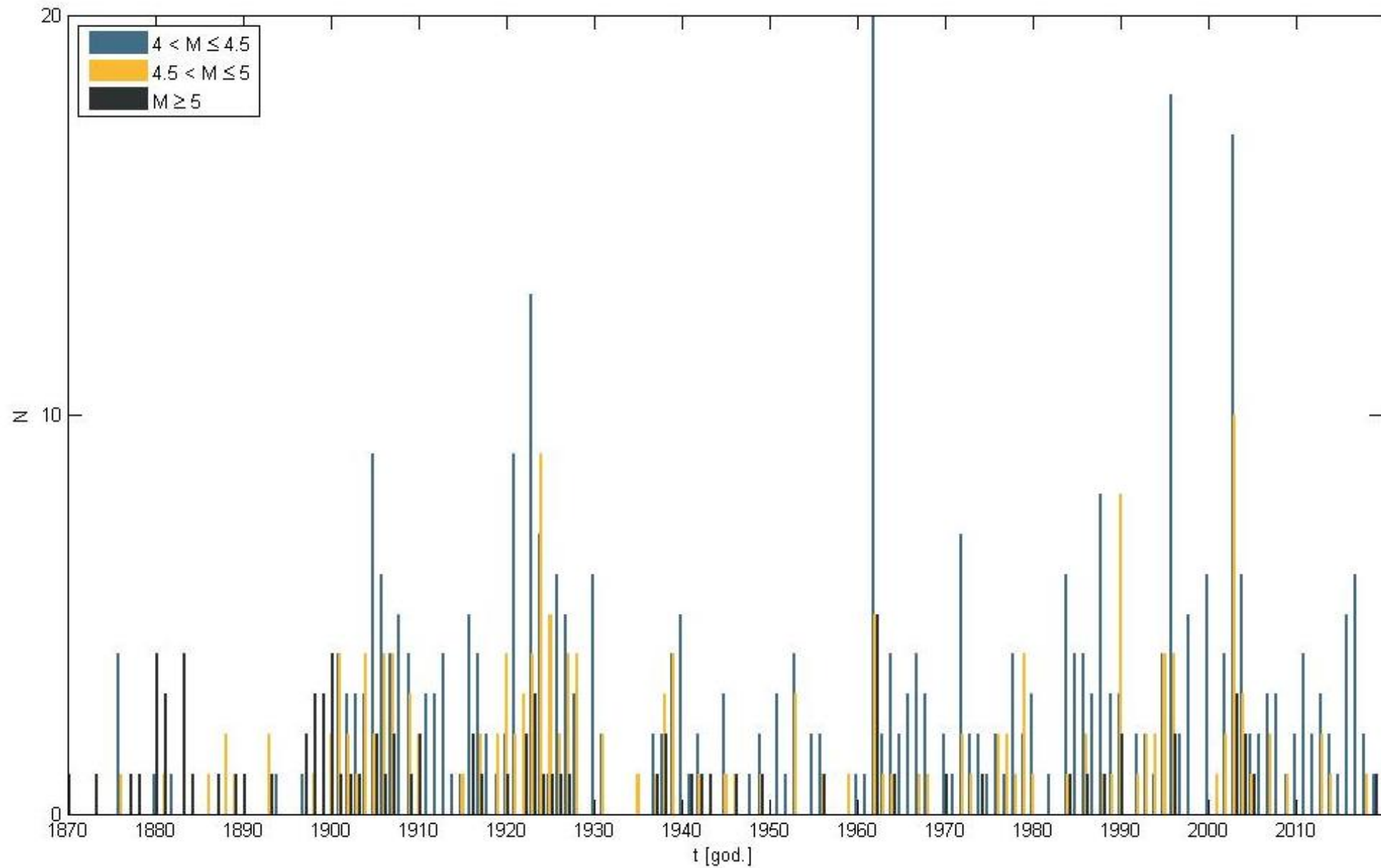
Epicentri potresa magnitude $M \geq 1.0$ za 1908. – 2019. god. locirani s rezultatnom pouzdanošću lokacije bolje od ± 4 km.

Dubina žarišta označena je bojom prema skali na desnom rubu slike, dok je magnituda proporcionalna površini simbola.

Podatci iz Hrvatskog kataloga potresa reprezentativni su samo za područje RH.



Potresi u Hrvatskoj 1870. – 2019. godine



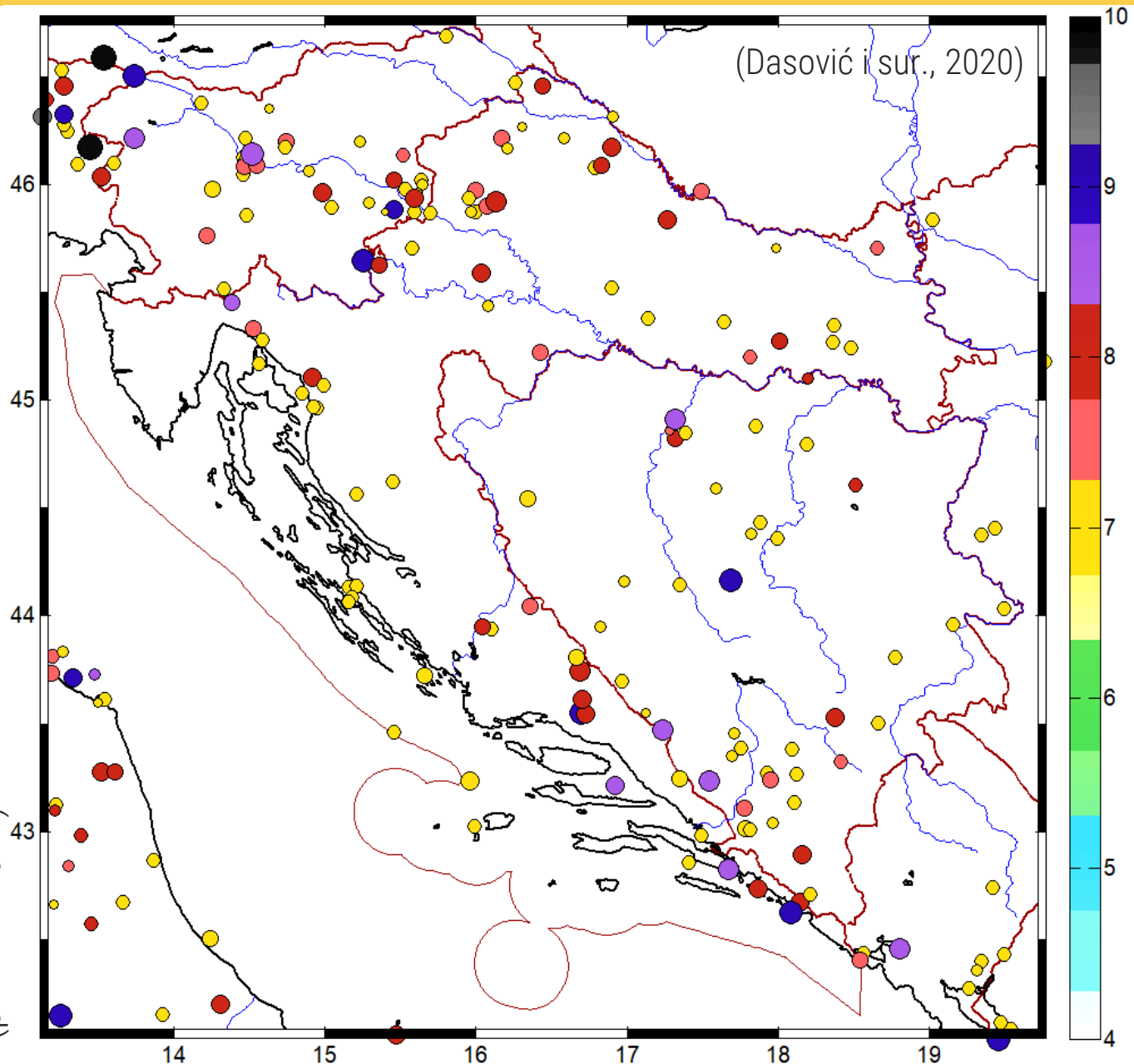
Najjači potresi – prema intenzitetu

Datum	Epicentar	M	I_0 (°MCS)
6. travnja 1667.	Dubrovnik	7.1*	IX – X
2. srpnja 1898.	Trilj	6.7*	IX
29. prosinca 1942.	Imotski	6.2	VIII – IX
11. siječnja 1962.	Makarska	6.1	VIII – IX
9. studenog 1880.	Zagreb	6.2*	VIII
5. rujna 1996.	Ston-Slano	6.0	VIII
8. listopada 1909.	Pokuplje	5.8	VIII
12. ožujka 1916.	Vinodol	5.8	VIII
13. travnja 1964.	Dilj Gora	5.7	VIII
27. ožujka 1938.	Bilogora	5.6	VIII
1. ožujka 1870.	Klana	5.5*	VIII
30. ožujka 1738.	Međimurje	5.1*	VIII

* Povijesni potresi – magnituda je procijenjena iz intenziteta.

Dvanaest značajnijih potresa intenziteta u epicentru $I_0 \geq VIII$ °MCS koji su se dogodili u Hrvatskoj od 17. st. do 2019. godine.

Epicentri glavnih potresa s intenzitetom u epicentru $I_0 \geq VII$ °MCS (pr. Kr. – 2019).

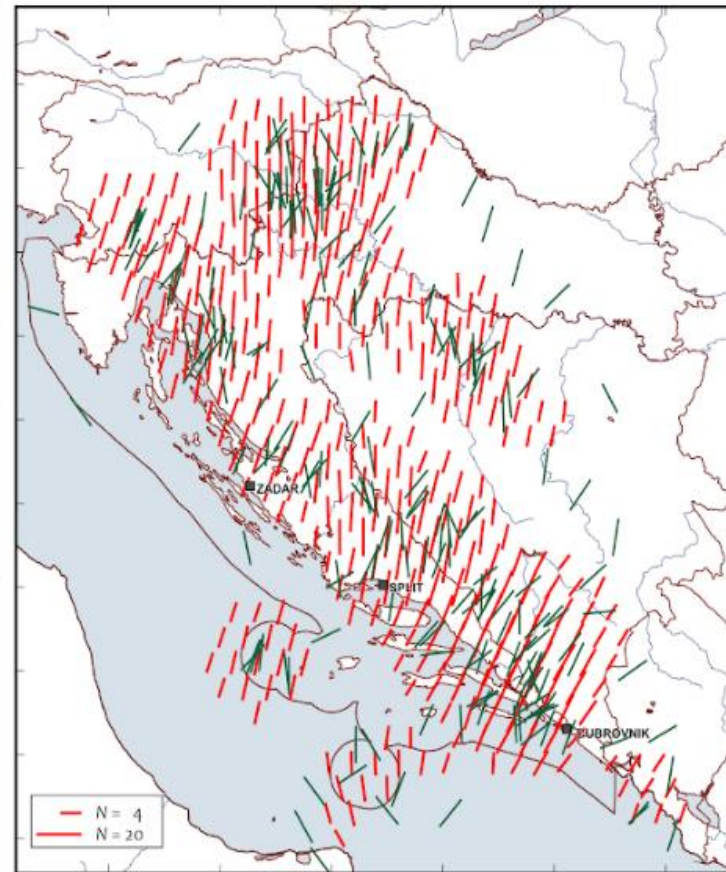
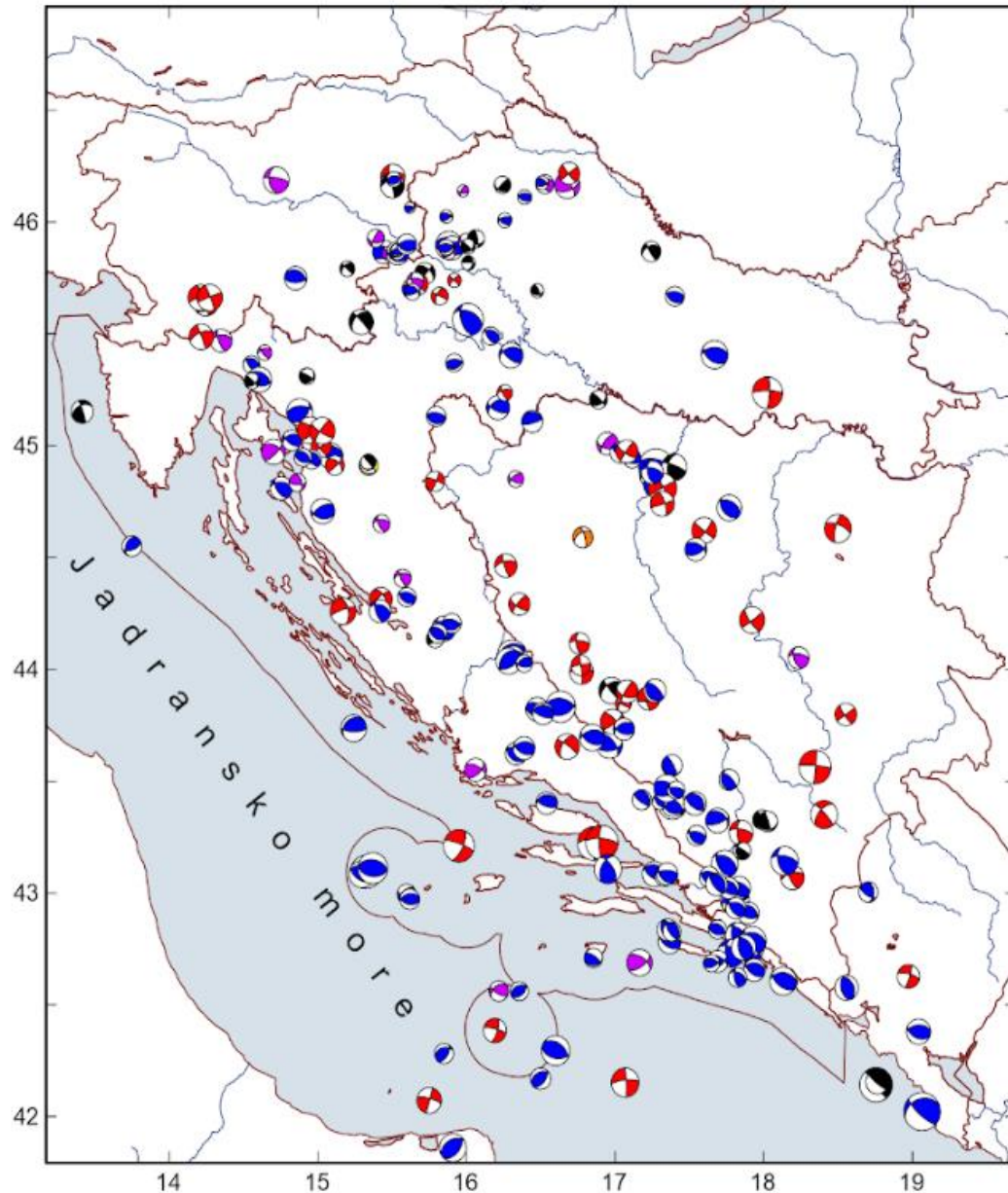


Čime se bave seizmolozi u Hrvatskoj?

Seizmolozi s Geofizičkog odsjeka PMF-a bave se

- **lociranjem** i **kvantifikacijom** potresa i pripremom Hrvatskog kataloga potresa
- analizom **povijesnih potresa** (< 1908. god.)
- određivanjem **žarišnog mehanizma** potresa i određivanjem **režima napetosti** u području Hrvatske i okolice
- istraživanjem **građe Zemlje** (struktura kore i gornjeg plašta te litosfere)
- određivanjem **atenuacijskih i anizotropnih svojstava** stijena
- računanjem **seizmičkog hazarda** i (seizmičkom) **mikrozonacijom**
- utjecajem potresa na **zgrade**
- i još ponešto!

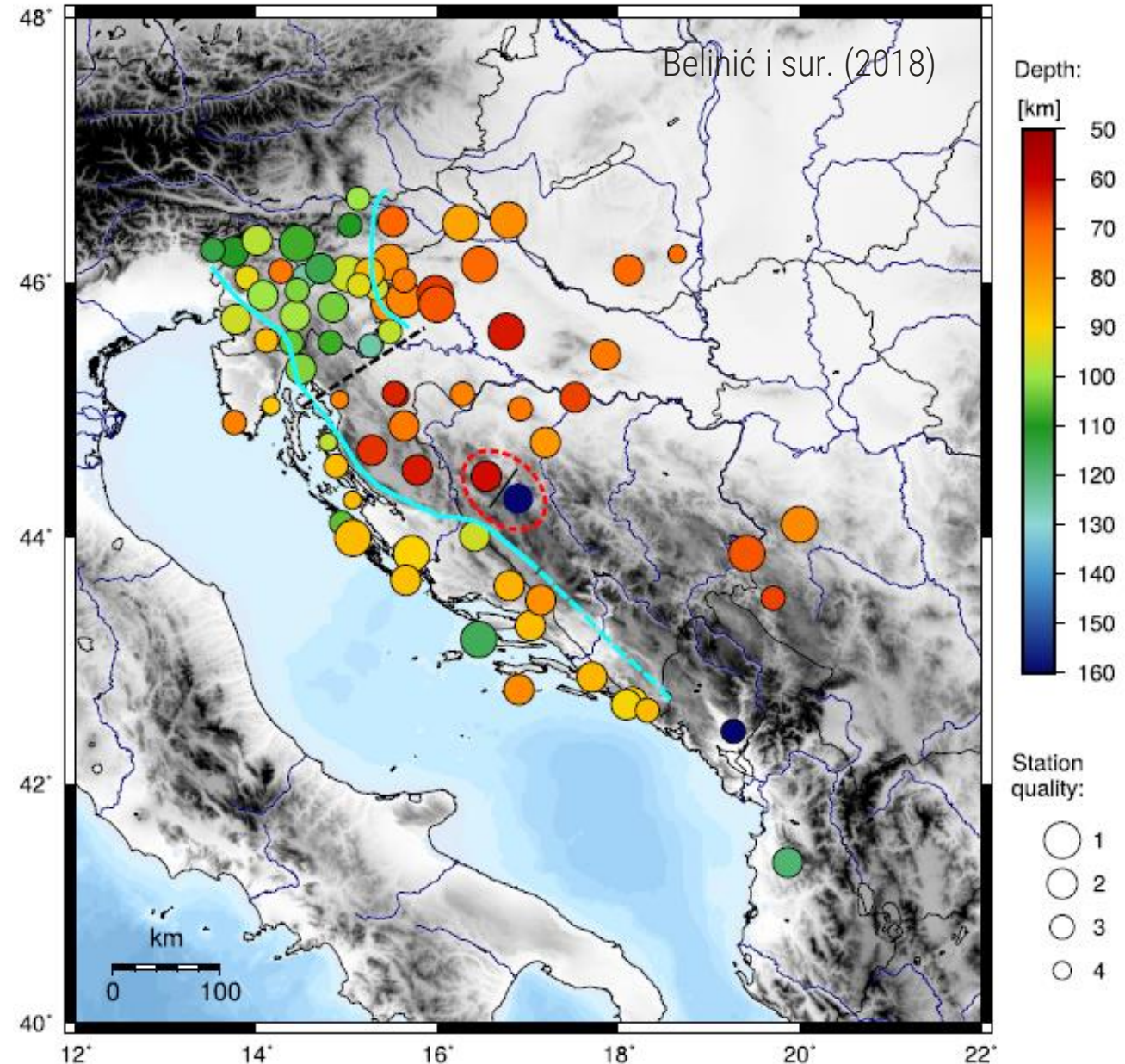
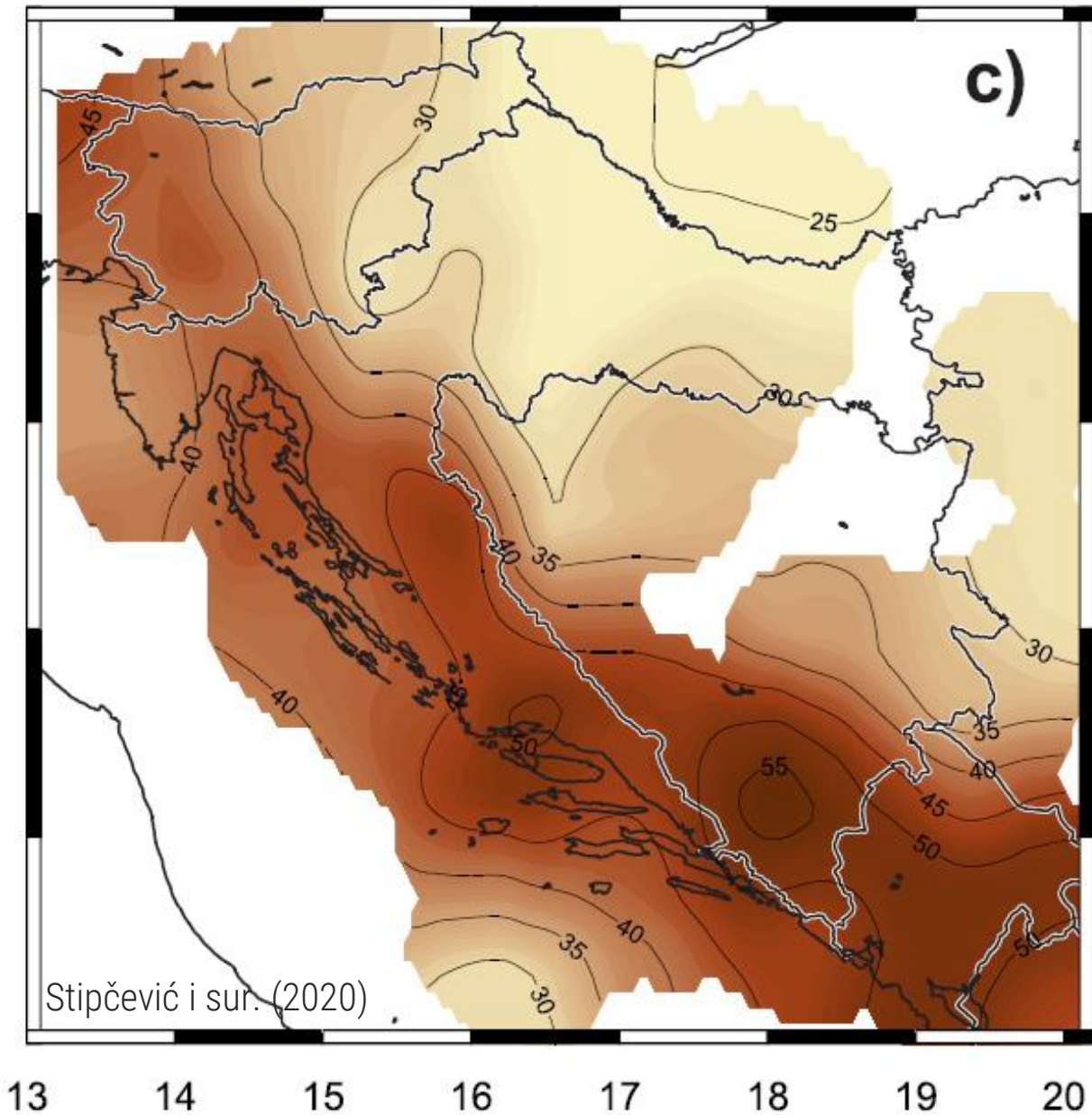
Žarišni mehanizmi potresa i režim napetosti



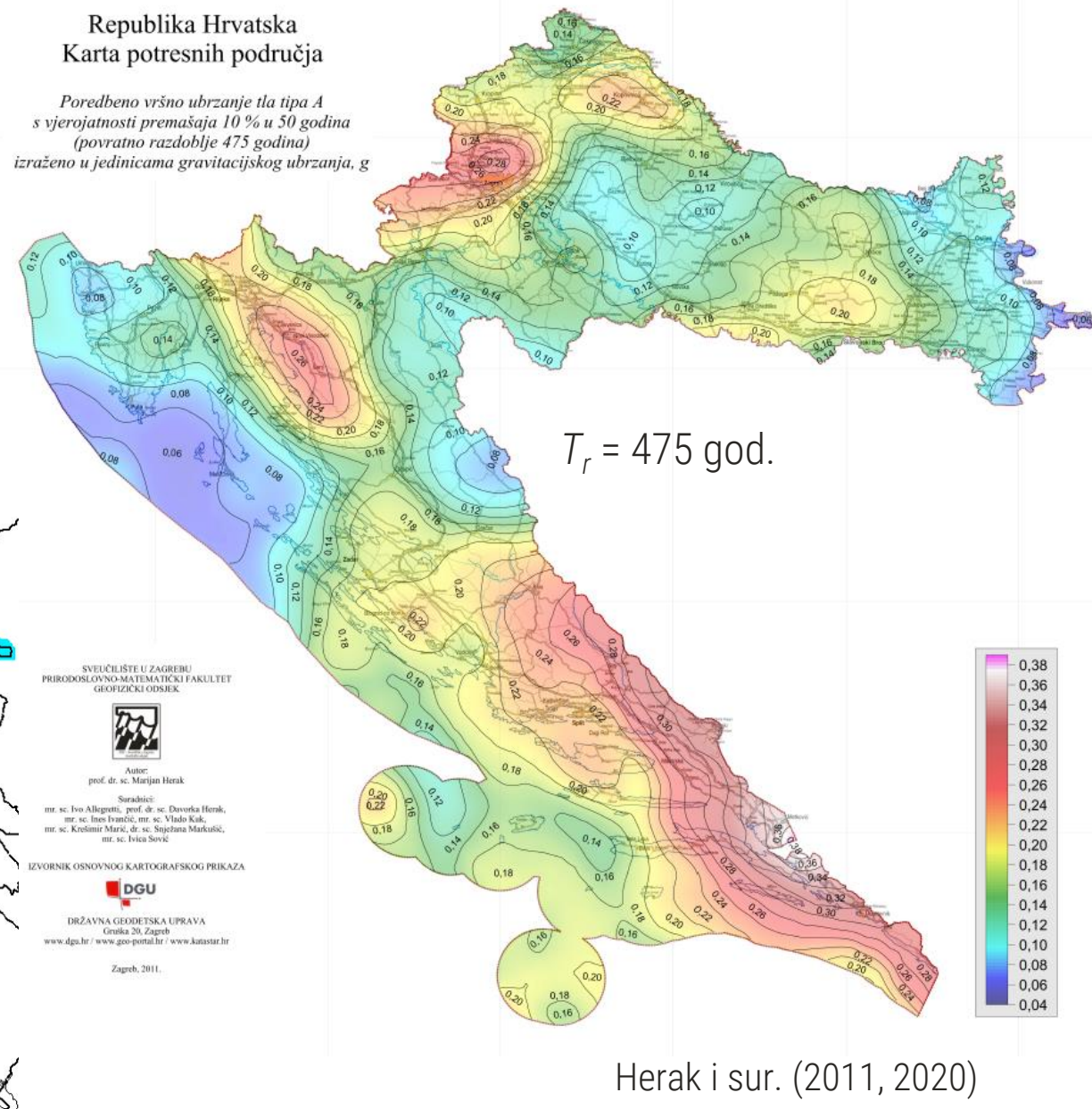
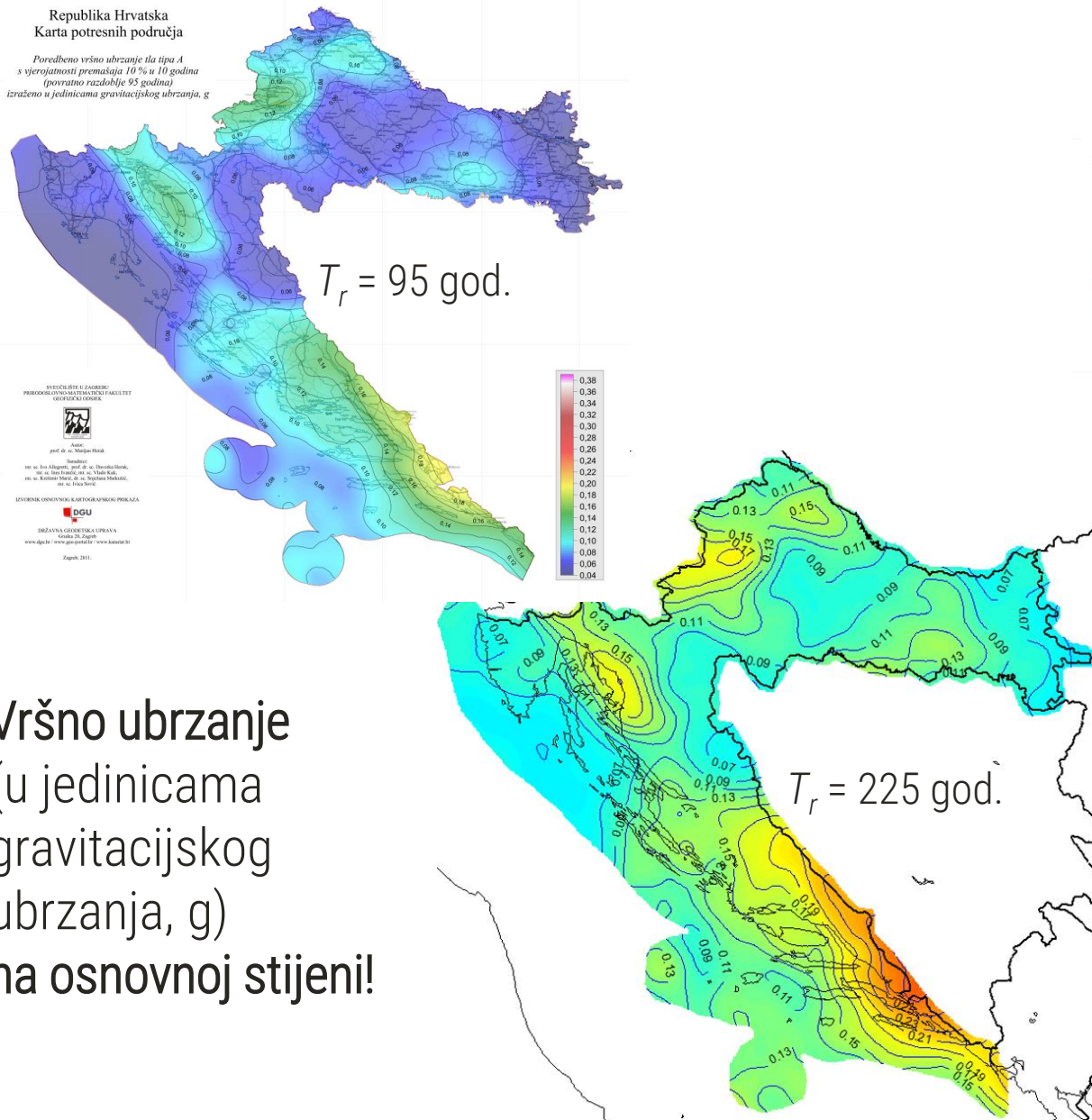
Prikaz žarišnih mehanizama potresa u Hrvatskoj i okolnim područjima za 1909. – 2016. god. (Herak i sur., 2016a).

Prikazana su i pružanja kompresijskih osi tektonske napetosti (P-osi) uprosječene (crvene crte) i za pojedine potrese (zelene crte).

Dubina Mohorovičićevog diskontinuiteta + granice litosfere i plašta



Potresna opasnost (seizmički hazard)



Mikrozonacija: Ston

Herak i sur. (2010)

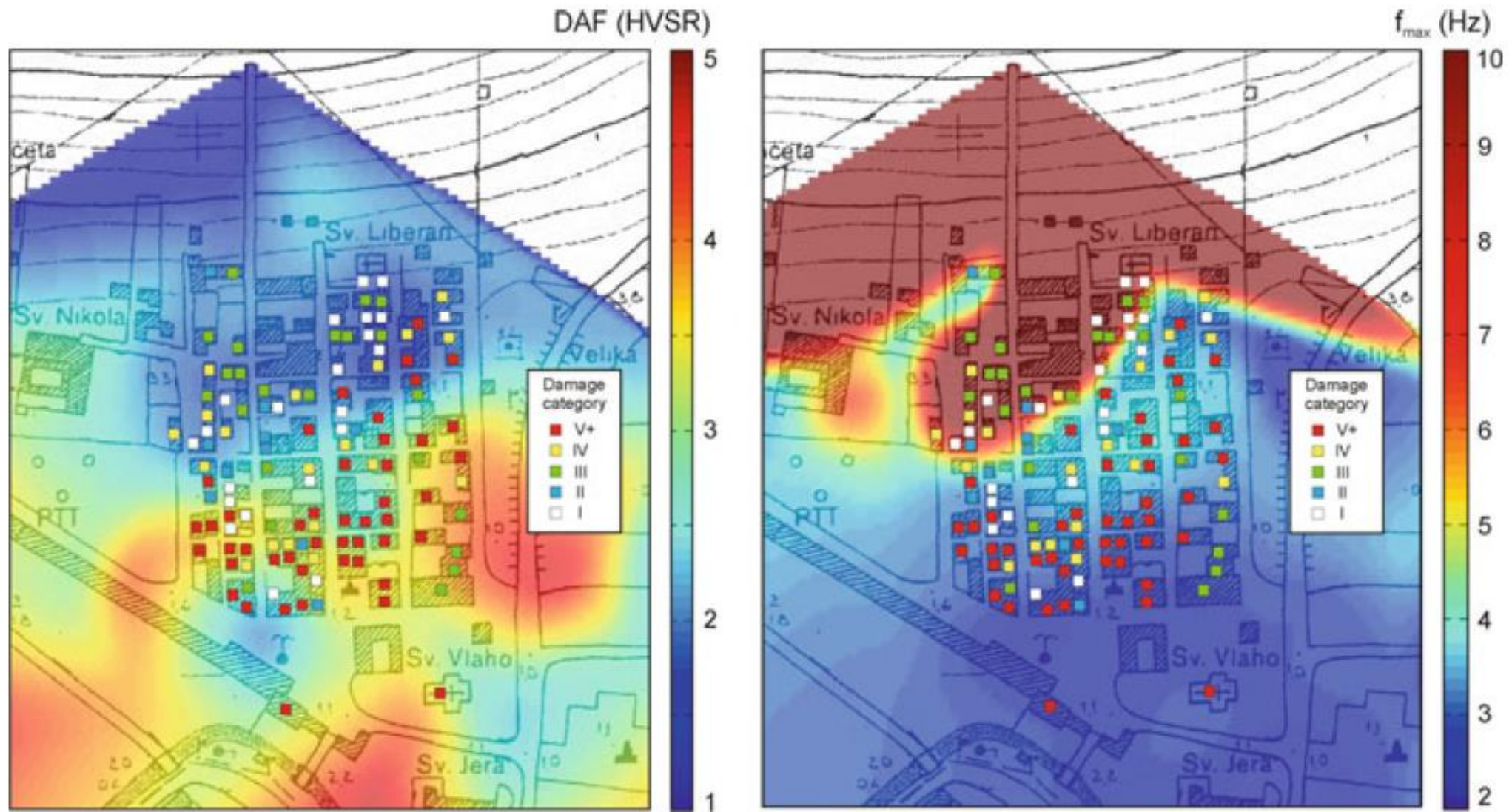
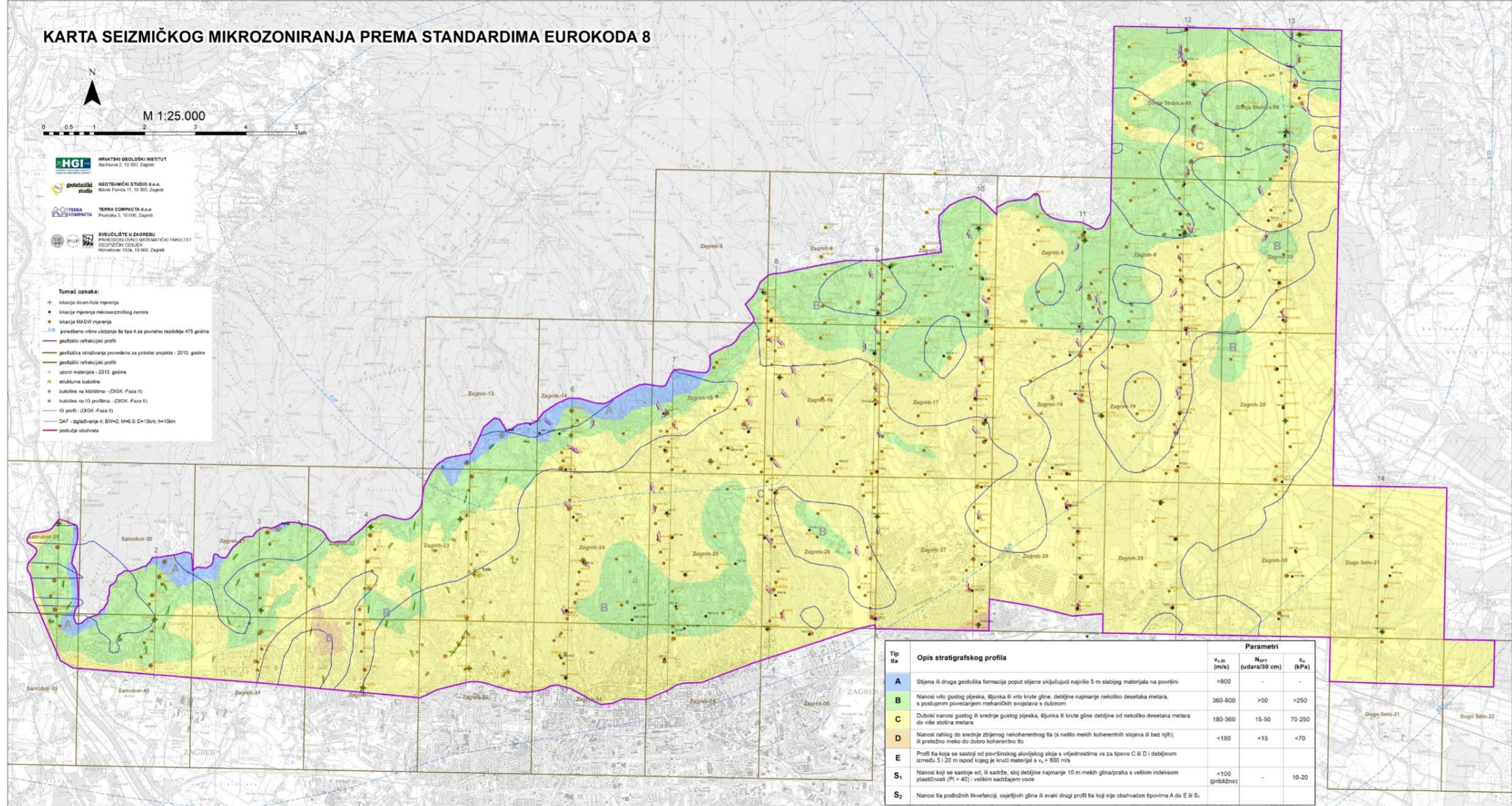


Fig. 9 Mapped values of amplification (DAF, *left*) and predominant frequency (f_{max} , *right*) determined on the basis of measured HVSr spectra of ambient vibrations. f_{max} values are truncated at 10 Hz only for plotting

Mikrozonacija: Zagreb, Podsljemenska zona

Miklin i sur. (2019)



Utjecaj lokalnog tla – amplifikacija

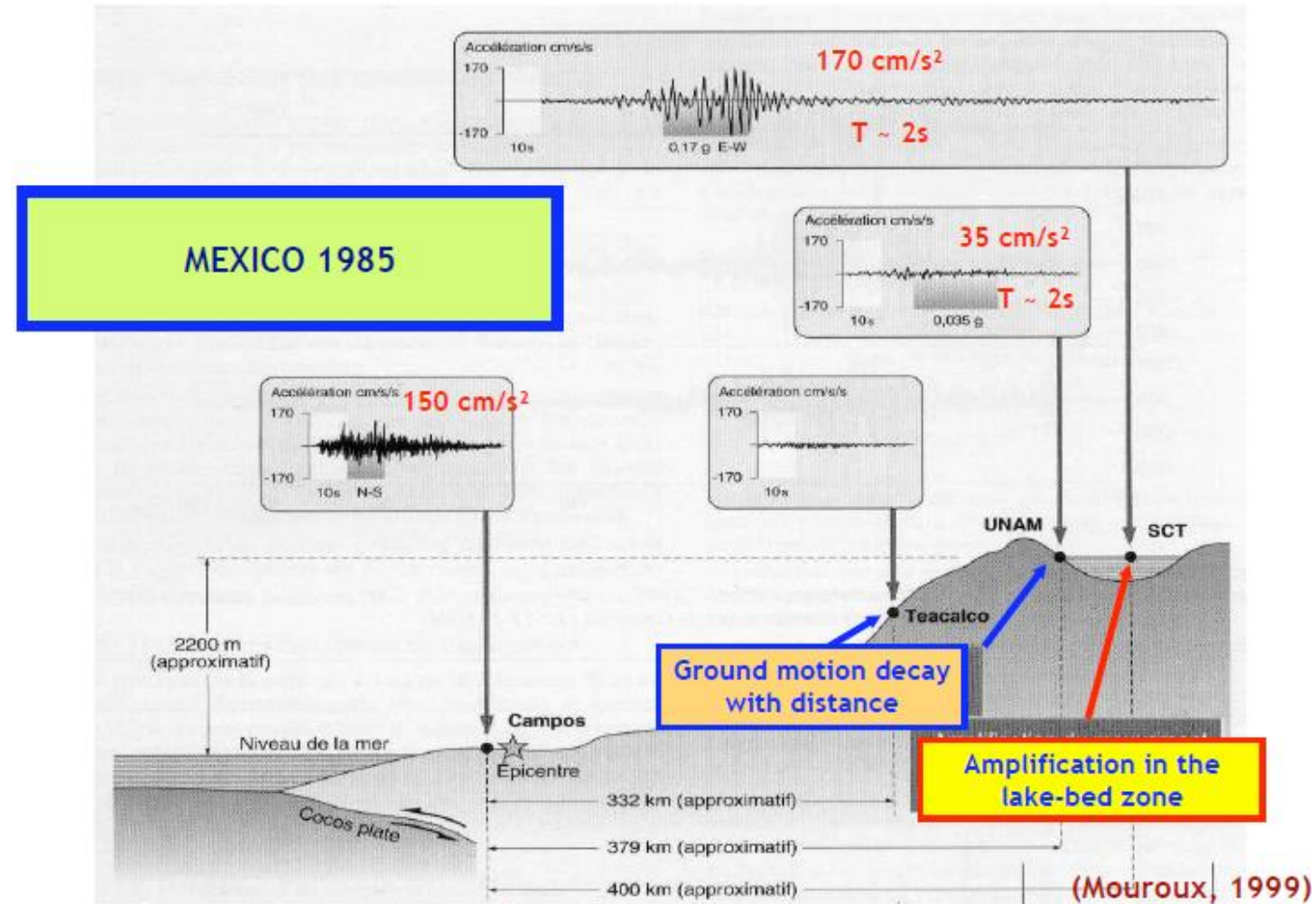
Mekano tlo, kao npr. riječni/jezerski sedimenti, mogu **amplificirati seizmičke valove**.

Dolazi do „zarobljavanja” seizmičkih valova – njihove energije – u mekanom sloju.

Pojačat će se samo one frekvencije/periodi koji su u određenom odnosu s brzinom rasprostiranja valova i debljinom tog sloja – vlastiti period „mekog” sloja:

$$T_S = \frac{4H}{v_S} .$$

Moguća je rezonancija sa zgradama sličnog vlastitog perioda! (Može se izbjeći.)



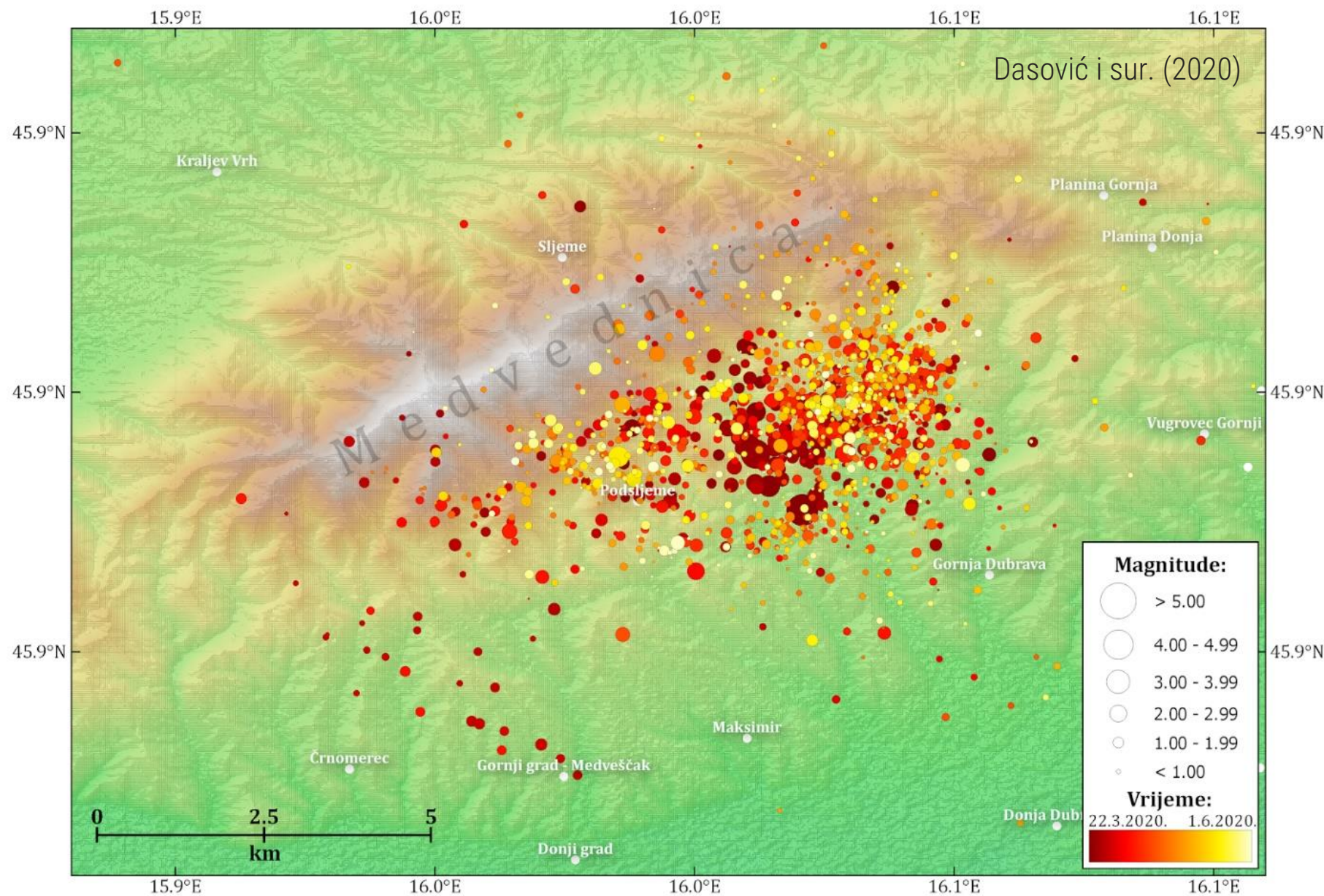
Zagrebačka serija potresa 2020. god.



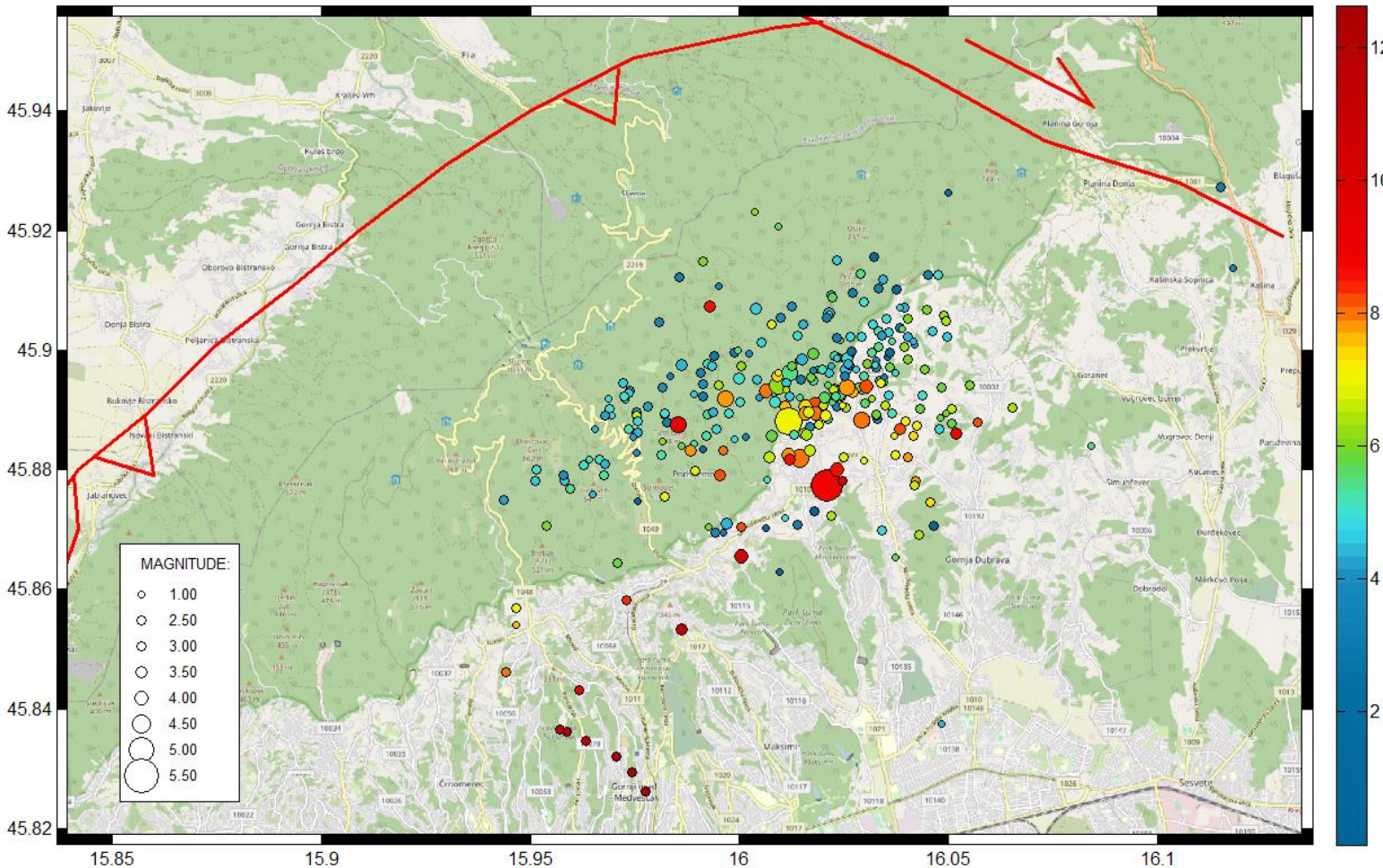
Zagrebačka serija potresa 2020. god.

Epicentri glavnog $M_L 5.5$ i naknadnih potresa zagrebačke serije u razdoblju između 22. ožujka i 1. lipnja 2020. godine.

Prikaz prema magnitudi i vremenu nastanka (boja).



Zagrebačka serija potresa 2020. god.

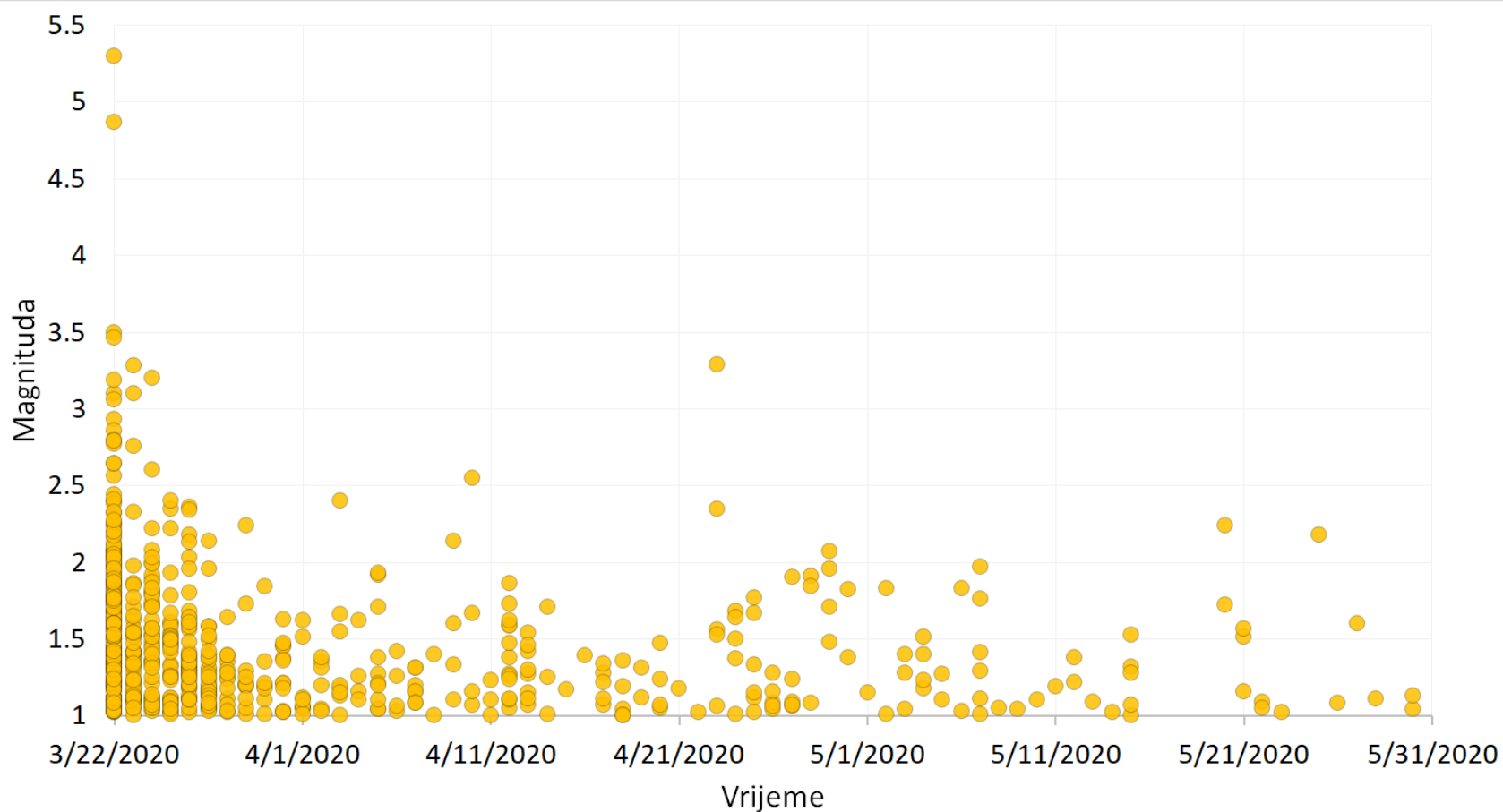


Dasović i sur. (2020)

Epicentri serije potresa za 22. ožujka – 1. lipnja 2020 **prema dubini i magnitudi**. Prikazani su samo potresi locirani s velikom preciznošću (npr. standardna pogreška epicentra < 2 km).

Crvenim linijama prikazani su i presjeci s površinom **reversnog Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda** (pružanja JZ – SI), te **Kašinskog rasjeda** (pružanja SZ – JI) (prema Heraku i sur., 2016b).

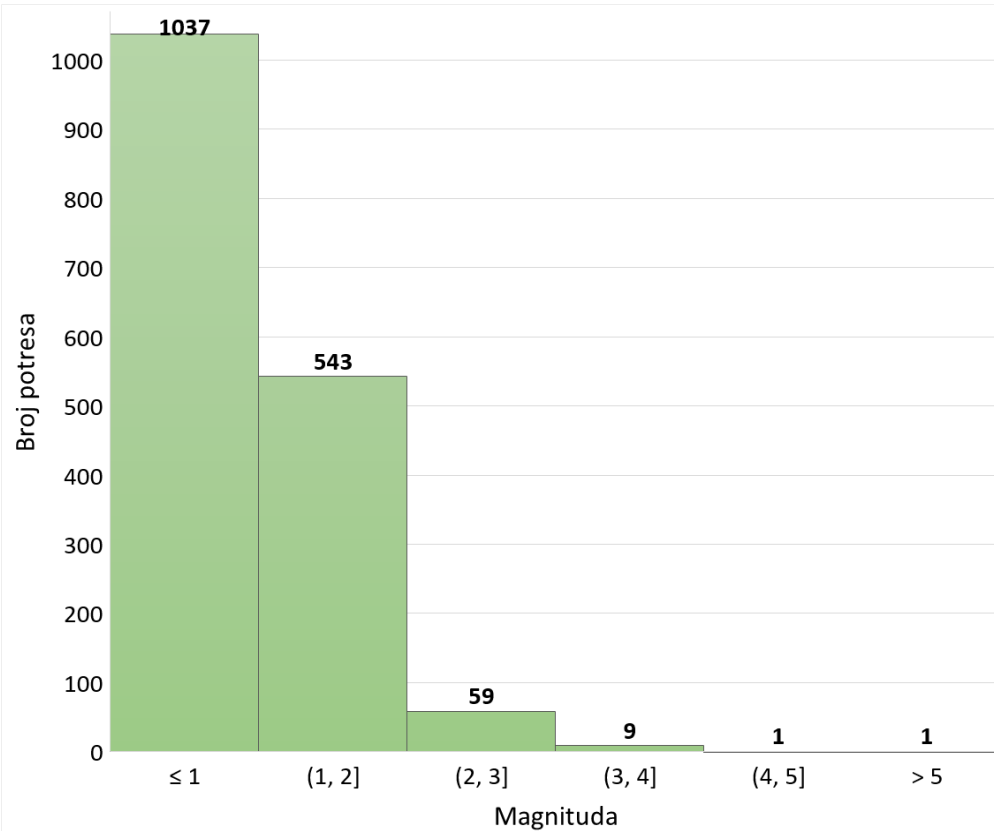
Zagrebačka serija potresa 2020. god.



Raspodjela u vremenu potresa zagrebačke serije $M > 1.0$ i **deset najjačih** naknadnih potresa do 1. lipnja 2020. (Dasović i sur., 2020).

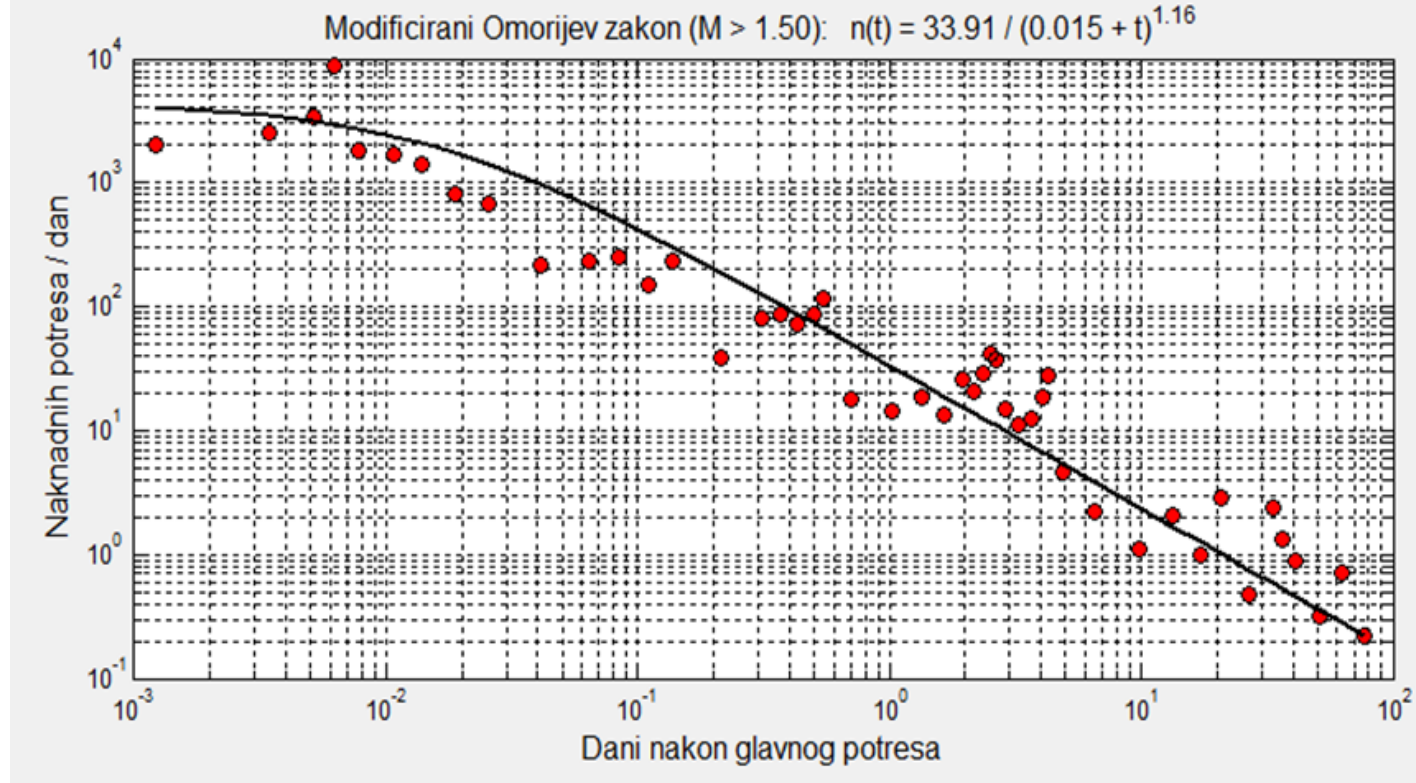
Datum i vrijeme (UTC)	Magnituda
22. ožujka 2020. 6:01	4.9
22. ožujka 2020. 5:29	3.5
22. ožujka 2020. 6:41	3.5
23. ožujka 2020. 10:12	3.3
23. travnja 2020. 7:52	3.3
22. ožujka 2020. 8:04	3.2
24. ožujka 2020. 19:53	3.2
22. ožujka 2020. 5:26	3.1
22. ožujka 2020. 9:11	3.1
23. ožujka 2020. 2:00	3.1

Zagrebačka serija potresa 2020. god.



Raspodjela naknadnih potresa zagrebačke serije po magnitudama za razdoblje 22. ožujka – 1. lipnja 2020.

Dasović i sur. (2020)



Prosječan broj potresa ($M > 1.5$) normiran na jedan dan u odnosu na vrijeme koje je proteklo od glavnog potresa 22. ožujka 2020. (crveni kružići).

Crna krivulja prikazuje prilagodbu modificiranog Omorijevog zakona (t – vrijeme nakon glavnog potresa u danima).

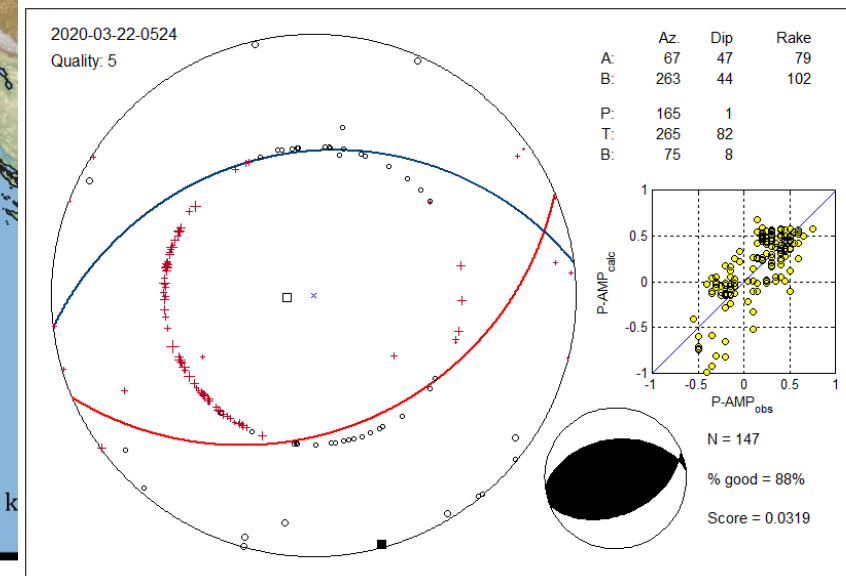
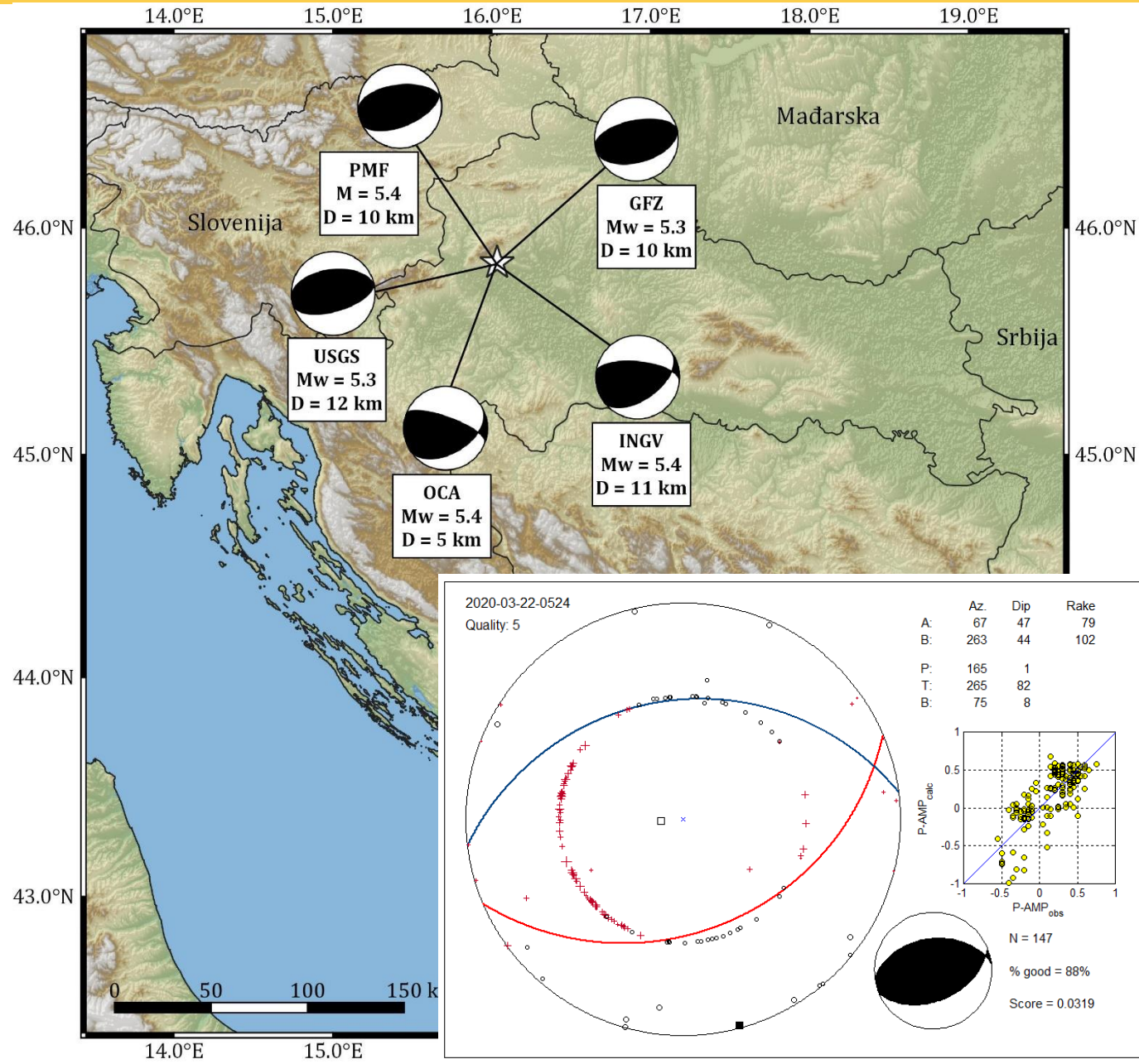
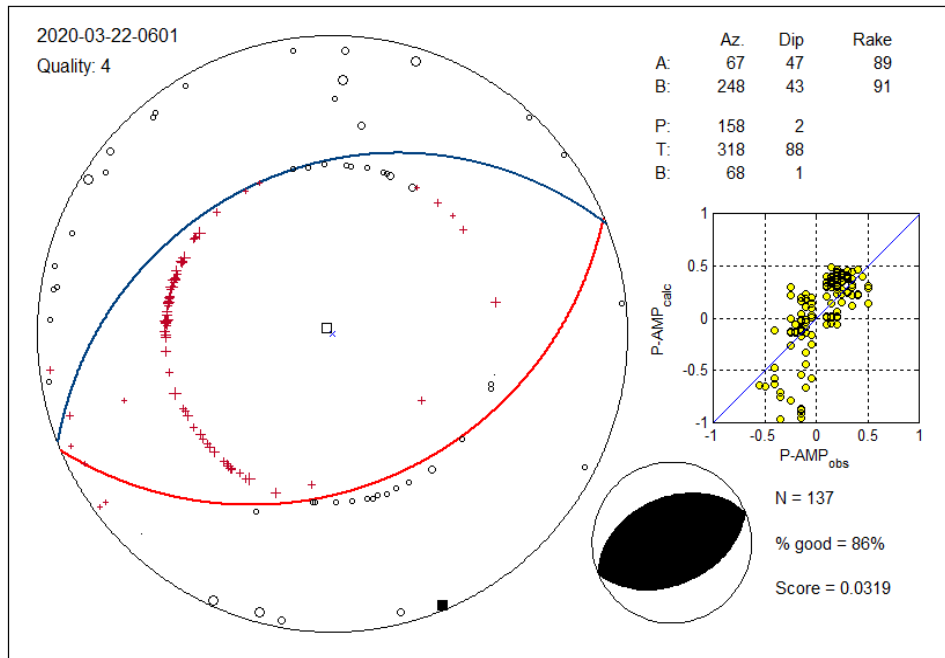
Zagrebačka serija potresa 2020. god. – žarišni mehanizam

Žarišni mehanizmi potresa 22. ožujka 2020. u 5:24 (UTC) (glavni potres, *lijevo*) i u 6:01 UTC (*dolje*) dobiveni metodom prvih nailazaka P-vala.

Os najvećeg tektonskog tlaka (P-os, crni kvadratić) je za oba potresa horizontalna (SSZ – JJI), dok je os najmanjeg tlaka (T-os, bijeli kvadratić) vertikalna.

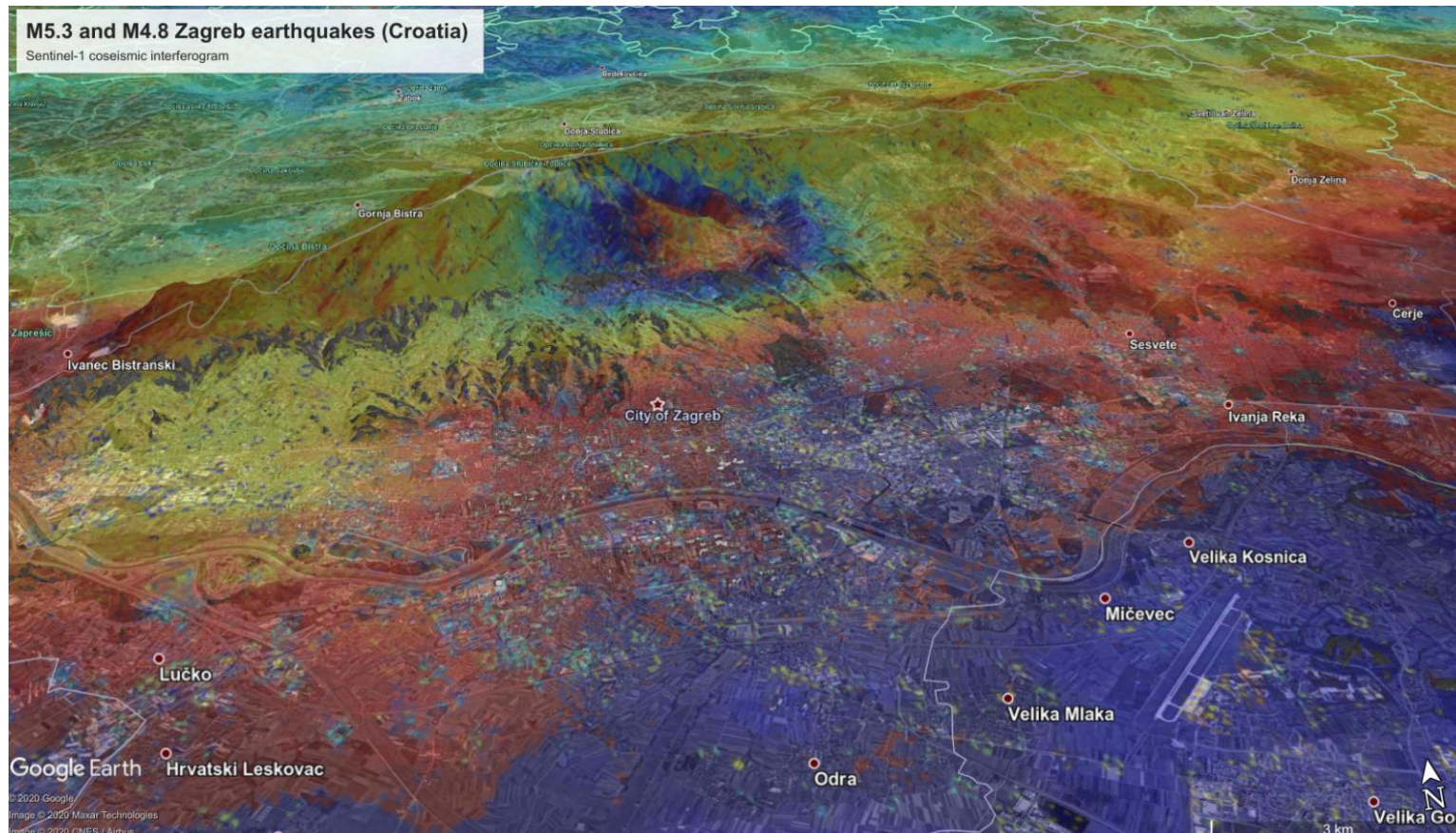
Sva rješenja ukazuju na rasjed iz sustava reversnog *Sjevernog rubnog medvedničkog rasjeda*.

Dasović i sur. (2020)

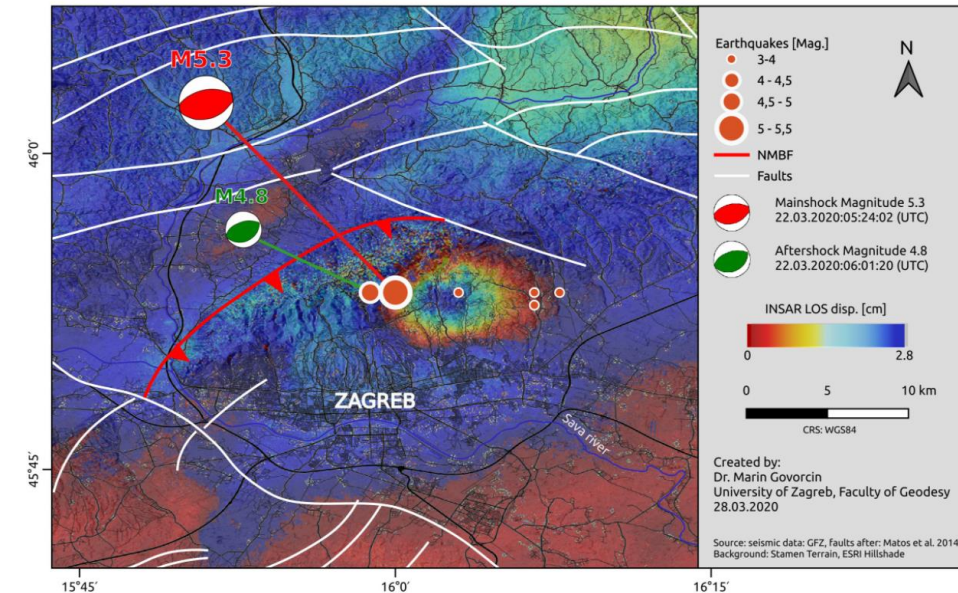


Zagrebačka serija potresa 2020. god. – daljinska istraživanja (prvi rezultati)

Analiza **permanentnog koseizmičkog pomaka tla** pomoću DInSAR satelitskih snimki: najveći pomak je oko 2.5 cm.



Mar 22, 2020 M5.3 and M4.8 Zagreb earthquake (NW Croatia)
Sentinel-1 (T124) M: 22.03.2020 S: 28.03.2020 T:05:02

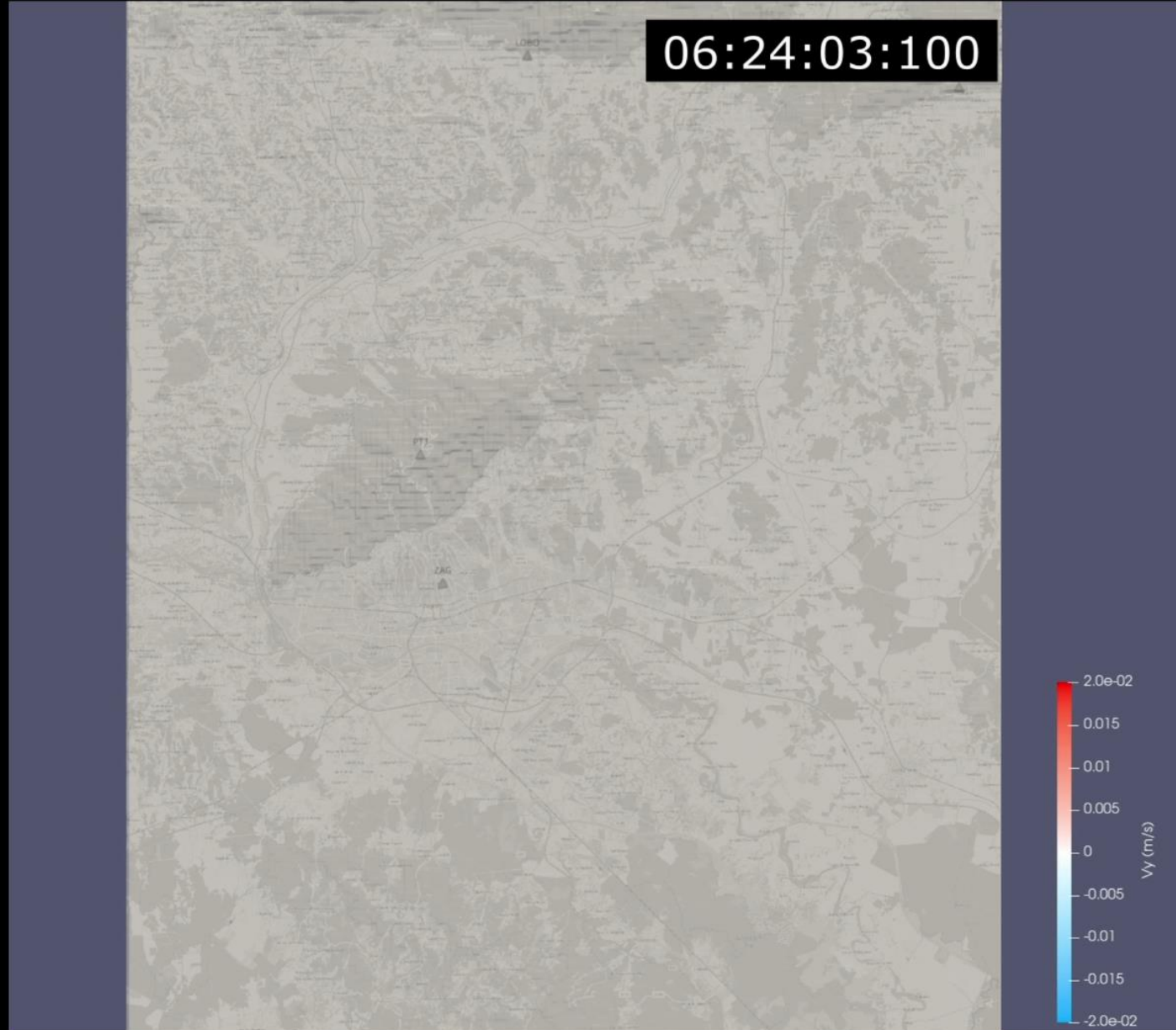


M. Govorčin, Twitter@Govorcin, 24. i 28. ožujka 2020.

Inverzija opaženih DInSAR interferograma je u tijeku...

Zagrebačka serija potresa 2020. god. – simulacija gibanja tla za glavni potres

Autori: Helena Latečki, Josip Stipčević i Irene Molinari



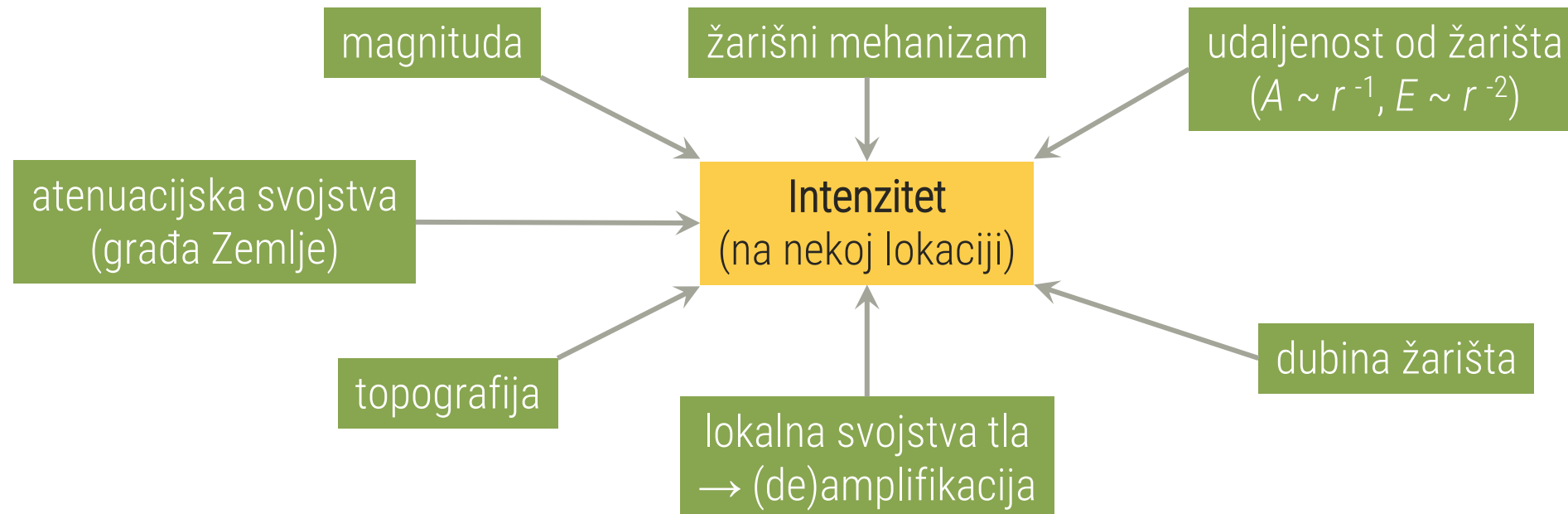
Za kraj...

Potresi se događaju u **nepravilnim razmacima** i **ne mogu se predvidjeti**. Iza jačih potresa **slijedi (dugotrajni) niz naknadnih slabijih potresa** nejednoliko raspoređenih u vremenu i po magnitudi.

Magnituda → oslobođena **energija** → **jedinstveni broj** za jedan potres

Intenzitet → **učinci** na objekte i ljude na površini → **opada s udaljenosti** od epicentra

→ Veza između njih nije jednostavna! Veza s PGA nije jednostavna!



Za kraj...

Hrvatska se nalazi u seizmički aktivnom području!

Seizmolozi i inženjeri – arhitekti i građevinari – trebamo **zajedno djelovati**, svako u svom području i interdisciplinarno, kako bismo osvijestili opasnost i djelovali tako da se rizik od potresa smanji!



Literatura

- Belinić, T., Stipčević, J., Živčić, M., AlpArray Working Group (2010): Lithospheric thickness under the Dinarides, *Earth and Planetary Science Letters* 484, 229–240.
- Dasović, I., Herak, D., Herak, M., Latečki, H., Mustać, M., Tomljenović, B. (2020): O potresima u Hrvatskoj, *Vijesti Hrvatskog geološkog društva*, u tisku.
- Herak, M. (1989): The magnitude-intensity-focal depth relation for the earthquakes in the wider Dinara region, *Geofizika* 6, 13–21.
- Herak, M., Herak, D., Dasović, I. (2016a): Fault-plane solutions and stress orientation in the greater region of Northern and Central Dinarides, 35th general assembly of the European Seismological Commission. Trieste, Italy, 4-11.
- Herak, M., Herak, D., Tomljenović, B. (2016b): Seismicity and Neotectonics in the Greater Zagreb Area, u *Fact Finding Workshop on the Active Tectonics of the Krško Region* (Ur. K. Decker), Technical Workshop, Klagenfurt/Celovec, Austria, Ministerium für Lebenswertes Oesterreich, Vienna, 16–20. (<https://www.umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/REP0612.pdf>).
- Herak, M., Allegretti, I., Herak, D., Kuk, K., Kuk, V., Marić, K., Markušić, S., Stipčević, J. (2010): HVSR of ambient noise in Ston (Croatia) – comparison with theoretical spectra and with the damage distribution after the 1996 Ston-Slano earthquake, *Bulletin of Earthquake Engineering* 8, 483–499.
- 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>.
- Masi, A., Chiauzzi, L., Nicodemo, G., Manfredi, V. (2020): Correlations between macroseismic intensity estimations and ground motion measures of seismic events, *Bull. Earthq. Eng.* 18, 1899-1932.
- Miklin, Ž., Novosel, T., Podolszki, L., Terzić, J., Dolić, M., Burić, H., Pomper, N., Frbežar, K., Sokolić, I., Sokolić, Ž., Ofak, J., Dobrilović, I., Padovan, B., Špoljar, J., Zailac, K., Sović, I., Herak, M. (2019): Seizmička i geološka mikrozonacija dijela grada Zagreba, *Knjiga 1 – Seizmička i geološka mikrozonacija*, Hrvatski geološki institut, Zagreb.
- Stipčević, J., Herak, M., Molinari, I., Dasović, I., Tkalčić, H., Gosar, A. (2020): Crustal Thickness Beneath the Dinarides and Surrounding Areas From Receiver Functions, *Tectonics* 37, <https://doi.org/10.1029/2019TC005872>.
- Weber, J., Vrabec, M., Pavlovčić-Prešeren, P., Dixon, T., Jiang, Y., Stopar, B. (2010): GPS-derived motion of the Adriatic microplate from Istria Peninsula and Po Plain sites, and geodynamic implications, *Tectonophysics* 483, 214–222.