



INŽENJERSKA KOMORA CRNE GORE
ENGINEERS CHAMBER OF MONTENEGRO



MEĐUNARODNA KONFERENCIJA:
SEIZMIČKI RIZIK U CRNOJ GORI DANAS

**Seizmički hazard -
mapiranje, razumijevanje i namjena**

MSc Jadranka Mihaljević

Zavod za hidrometeorologiju i seizmologiju
e-mail: mihaljevic@seismo.co.me

SEIZMIČKI HAZARD (OPASNOST)

Izražava vjerojatnoću da se - na datom mjestu, određeni iznos odabranog parametra kretanja tla tokom zemljotresa premaši u zadanom razdoblju.

PSHA – Probabilistička analiza

- Opisuje opasnost od pojave čija je priroda u osnovi nepoznata
- O opasnosti od zemljotresa sudimo na osnovu mnoštva podataka koji nisu uniformnog karaktera
- Podrazumijeva modelovanje procesa, čija preciznost zavisi od broja raspoloživih podataka i dr.
- Podrazumijeva poznavanje geoloških procesa što nije uvijek slučaj (background – seizmičnost „podloge“, distribuirana seizmičnost...)

Nepouzdanosti:

1. *aleatorne* (naslijeđene iz same prirode npr. razlike zabilježenih akceleracija za isto (M,R)

⇒ *hazard algoritam - uključuje distribucije a ne pojedinačnu vrijednost*

2. *epistemičke* (nedostatka znanja npr. lokacija epicentara, izbor modela...) .

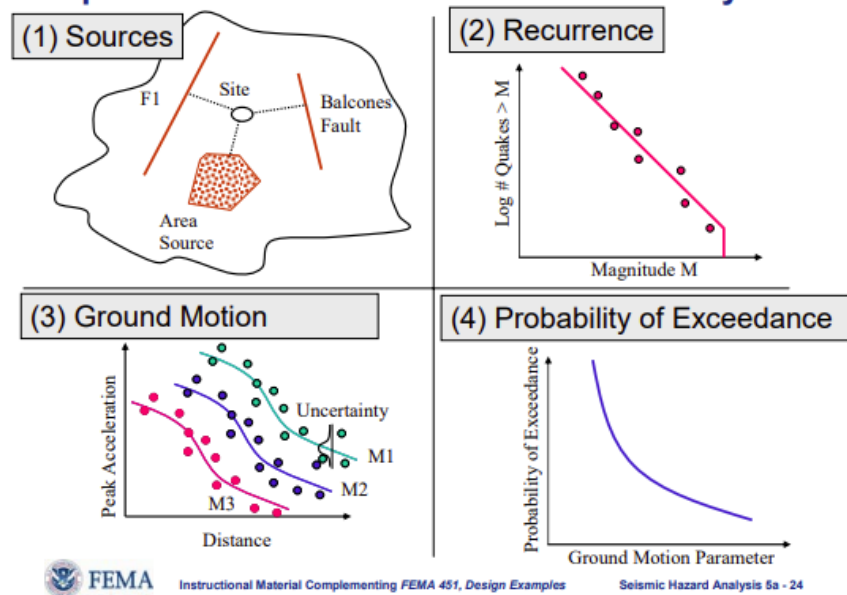
⇒ *logičko stablo - grane moraju biti nezavisne*

PSHA – Probabilistička analiza seizmičkog hazarda

Pretpostavka - proces pojave zemljotresa stacionaran i prati Poasonovu raspodjelu

1. **Identifikacija i karakterizacija izvora seizmičnosti**, prostorna distribucija vjerovatnoće pojave zemljotresa unutar seizmogene zone,
2. Karakterizacija **seizmičnosti unutar zone** – vremenska distribucija pojave zemljotresa izražena preko rekurentnih relacija,
3. Determinisanje **formula predviđanja kretanja tla** (GMP) za izabrani (set) parametar kretanja tla,
4. **Ocjena vjerovatnoće** da će izabrani parametar kretanja tla premašiti neku vrijednost u određenom vremenskom intervalu...

Steps in Probabilistic Seismic Hazard Analysis



Zemljotresi - osnovni podaci neophodni u PSHA

- Primijeniti podatke o zemljotresima iz okruženja od oko 150 km oko područja od interesa – istražiti raspoložive kataloge zemljotresa.
- Nacionalni podaci, regionalni projekti, svjetski katalogi renomiranih agencija, historijski katalogi: hipocentralno vrijeme, koordinate epicentra, magnituda i/ili intenzitet.
- Varijacije u katalogizima odnose se na geografsku i vremensku pokrivenost, donji prag zabilježene magnitude, preciznost parametara, sadržaj ostalih atributa napr. dubina, reference, kvalitet rješenja, izvor podataka, makroseizmički opisi i dr.

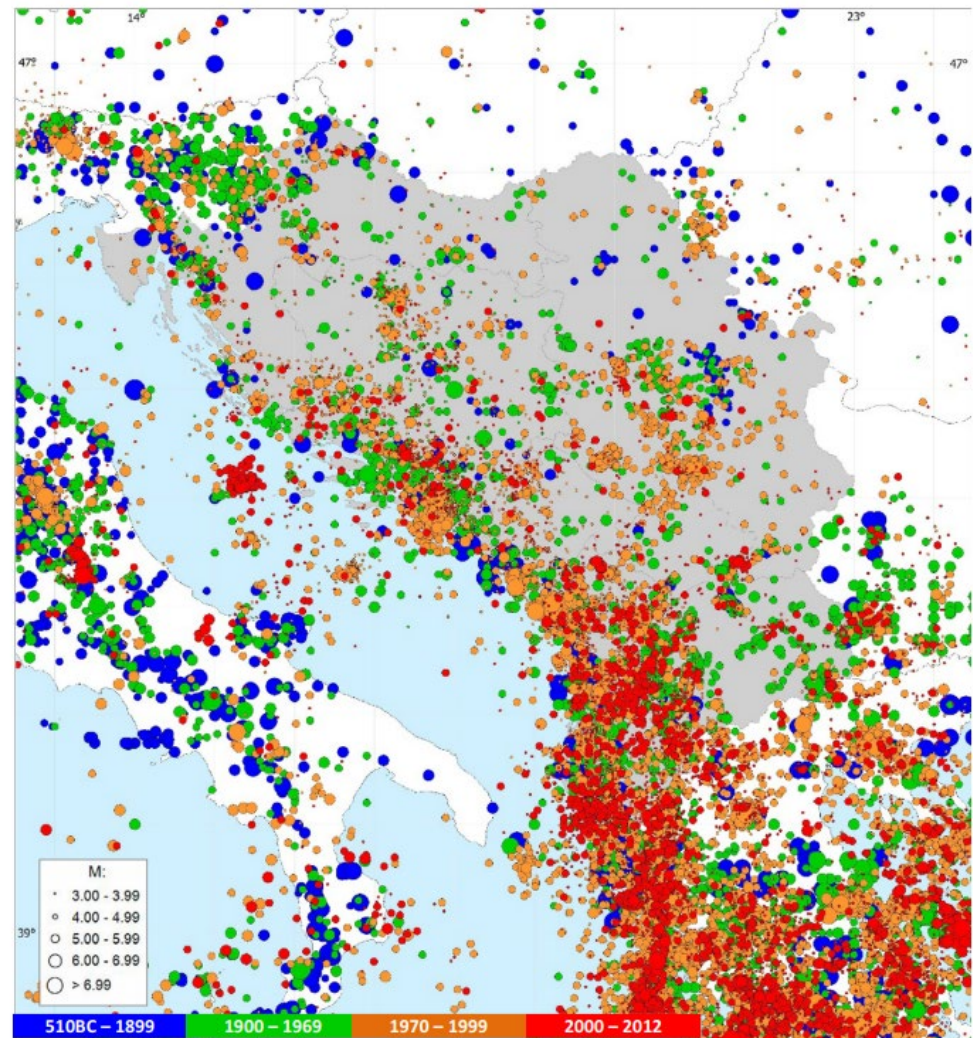


Fig. 1 Spatial distribution of the earthquakes in the proposed BSHAP catalogue (earthquakes $M \geq 3.5$ in the period 510BC–1969, and earthquakes $M \geq 3.0$ in the period 1970–2012. Corresponding timeline of the data is presented at the *bottom* of the map). The countries contributing to the BSHAP_I and BSHAP_II projects are denoted by the gray areas

Zemljotresi – osnovni podaci neophodni u PSHA

Problemi:

format, vrsta magnitude, rezolucija parametara, nepoznati broj prethodnih i naknadnih udara, različite dužine serija podataka u katalogu i dr.

Rezultujući katalog je nehomogen i zahtijeva deklasterovanje (uklanjanje međusobno zavisnih događaja) i **provjeru kompletnosti podataka.**

Table 4 Windowing parameters used to decluster catalogues

M	D_w (km)	T_w (days)
3.0	20.0	25.0
3.2	21.6	30.1
3.4	23.2	36.2
3.6	25.1	43.5
3.8	27.0	52.3
4.0	29.1	62.9
4.2	31.4	75.6
4.4	33.9	90.9
4.6	36.5	109.3
4.8	39.4	131.5
5.0	42.4	158.1
5.2	45.7	190.1
5.4	49.3	228.7
5.6	53.2	275.0
5.8	57.3	330.7
6.0	61.8	397.6
6.2	66.6	478.2
6.4	71.8	575.0
6.6	77.4	691.5
6.8	83.5	831.6
7.0	90.0	1000.0

For $M < 3.0$ and $M > 7.0$, the parameters are estimated by log-linear extrapolation
 D_w radius of circular window, T_w duration of aftershocks, $T_{w,for}$ duration of foreshocks

Mulargia et al. (1987)

Alternativno algoritmi npr. Raesenberg (1985)

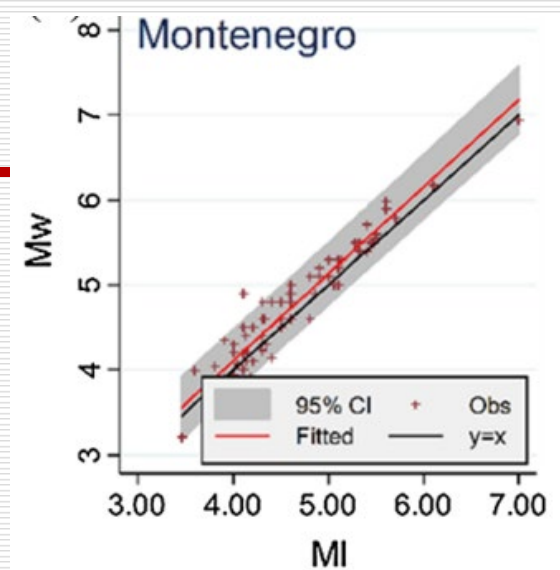


Table 3 Empirical relationships between moment magnitude M_w and local magnitude M_L

Agency	Regression equation $M_w = b_0 + b_1 M_L$	Number of events	Determination coefficient, R^2	SD of regression, s_e
Podgorica	$M_w = -0.01 + 1.028 M_L$ a (0.16) (0.033) (8)	75	0.930	0.184

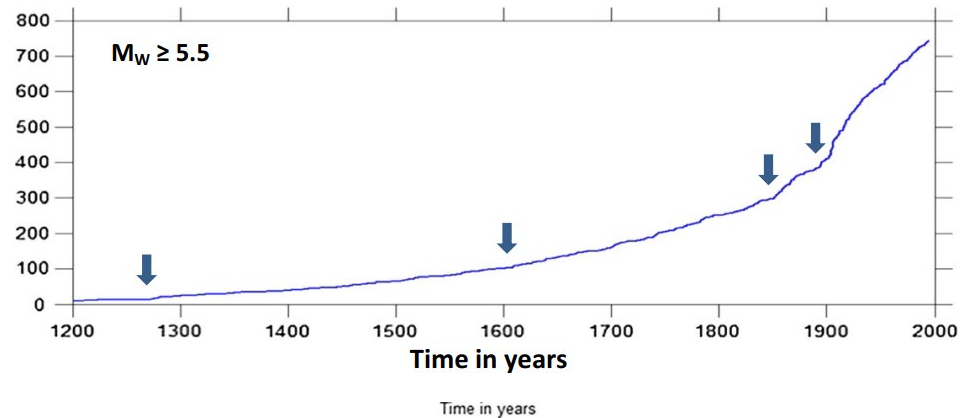


Fig. 8 Cumulative number of earthquakes above the given reference magnitude versus time

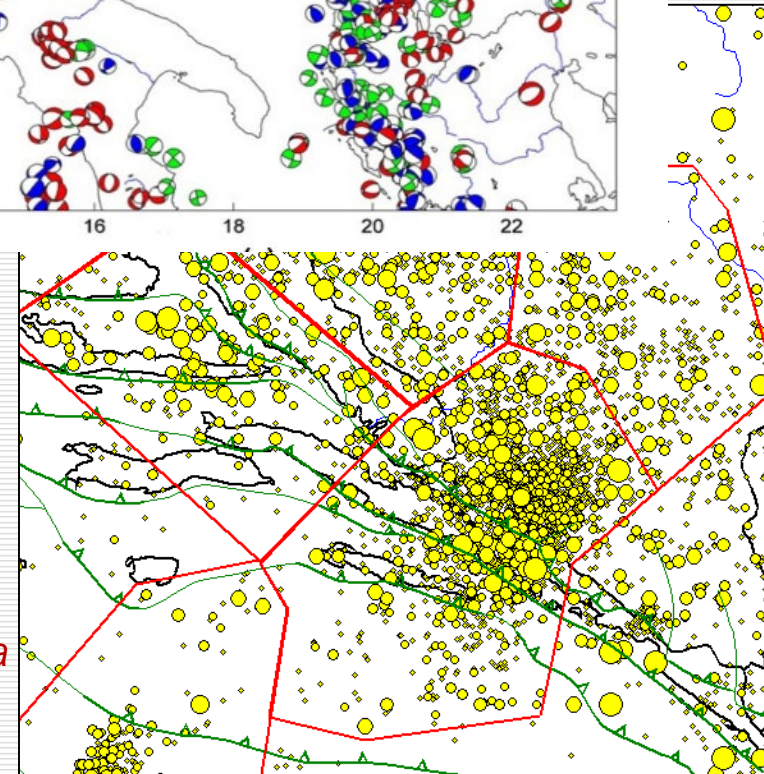
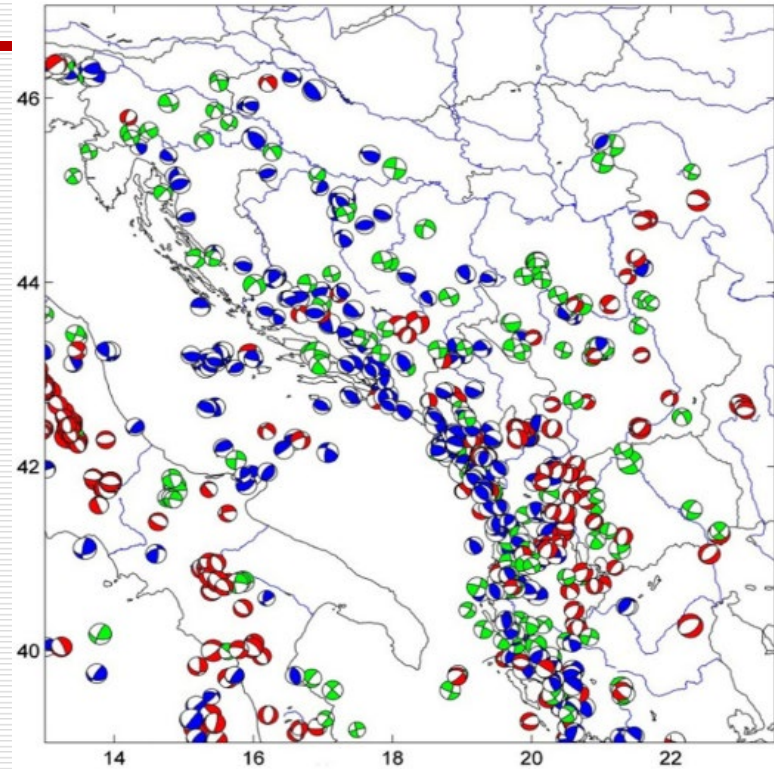
S. Markušić et al., 2016

Seizmogene zone

Osnovne preporuke za ograničavanje seizmičkih zona:

1. zona mora biti **dovoljno velika da sadrži statistički značajan broj zemljotresa**
2. zona mora biti dovoljno mala da zadrži **homogeni karakter seizmičnosti izvora**
3. **epicentri su uniformno raspoređeni** unutar zone (nema velikih aseizmičkih područja unutar zone)
4. **obuhvata glavni sistem rasjeda** unutar zone
5. ne moraju se poklapati sa geološkim cjelinama
6. **klasteri prethodnih i naknadnih udara su unutar zone**
7. **tip rasjeda** ne treba značajno da varira u zoni.
Idealno svaka zona obuhvata jedan sistem rasjeda

Problemi: konačno subjektivno \Rightarrow *provjeriti zakon ponavljanja zemljotresa unutar zona*



Parametri učestalosti ponavljanja zemljotresa unutar zone- osnova PSHA

Gutenberg-Richter relacija, najosnovniji oblik učestalosti ponavljanja zemljotresa

$$\log \lambda_m = a - bm$$

Problemi:

- Deklasterovani katalog ima manje zemljotresa
- Seizmičke zone su često suviše male da se a i b vrijednosti statistički pouzdano odrede
- G-R relacija ne važi blizu ili preko m_{max}
- Za male magnitude katalogi nisu kompletni tj. nivoi kompletnosti su kraći

a i b vrijednosti:

- variraju tokom vremena - ukazuju na potencijalnu pojavu zemljotresa! Čak nisu statistički nezavisni!
- određuju se koristeći maximum-likelihood (ML) pristup

- **Određivanje m_{max}**

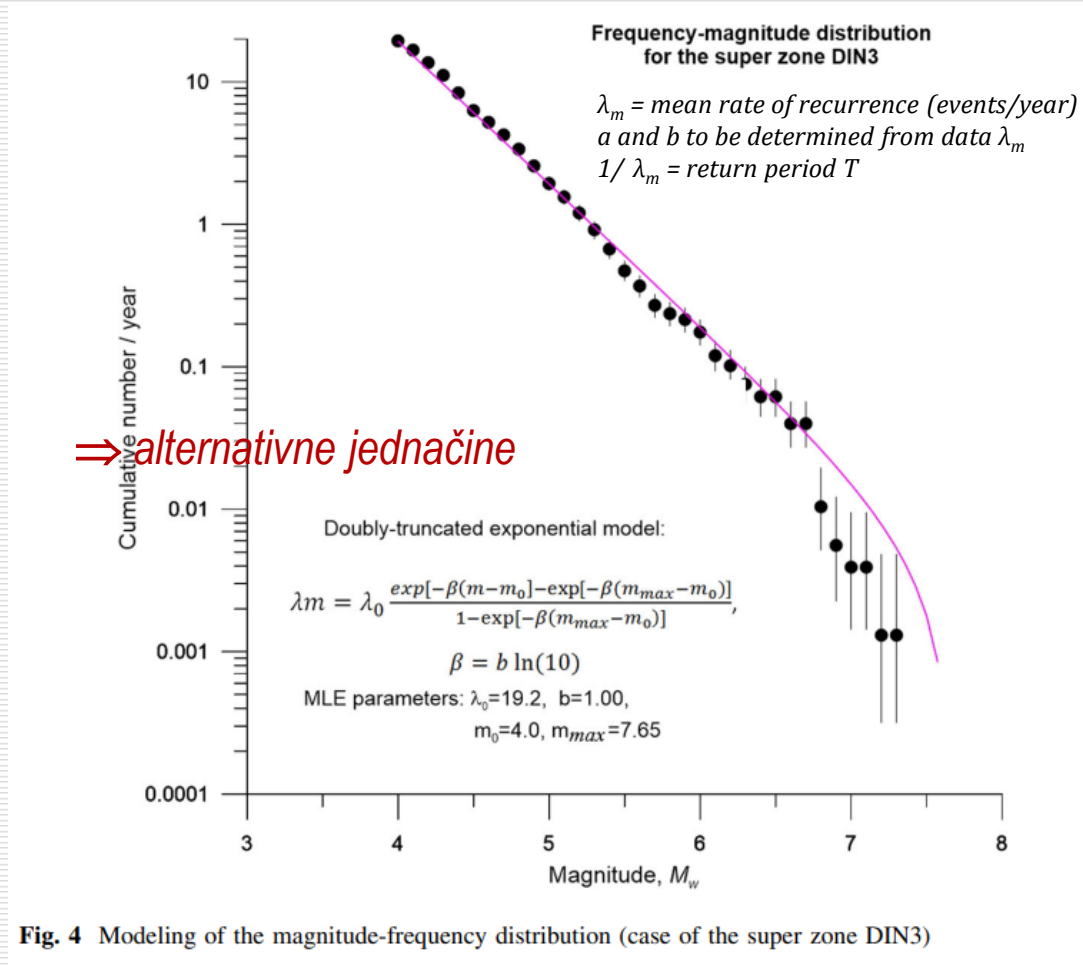


Fig. 4 Modeling of the magnitude-frequency distribution (case of the super zone DIN3)

Parametri učestalosti pojave zemljotresa unutar zone

Određivanje maksimalne magnitude M_{max} u zoni

1. Najveća **zabilježena magnituda uvećana za inkrement** (npr. $m_{max} = m_{max,obs} + 0.3$)

Problem: Koliki inkrement je dovoljan?

Najveća zabilježena magnituda u **sličnim tektonskim regionima**

Problem: subjektivno!

3. Odrediti M_{max} iz empirijskih regresionih formula (e.g. Wells & Coppersmith, 1994) koje

$$m_{max} = f(\text{dužine/površine aktiviranog rasjeda})$$

Problem: Određivanje maksimalne aktivirane dužine rasjeda..

4. **Statističke metode** određivanja ekstremnih vrijednosti zabilježenih magnituda (e.g. Kijko, 2004)

Problem: rezultati često divergiraju, koliko su inputi tačni...

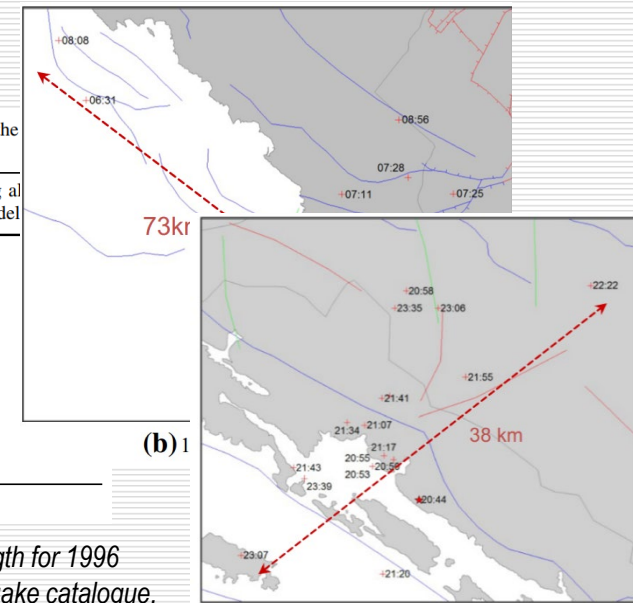


Fig. 9 Early cluster distribution as the indicator of activated rupture length for 1996 Ston and 1979 Montenegro earthquakes based on the BSHAP earthquake catalogue. The red star shows the location of the mainshock and the numbers on figures indicate the times of the aftershocks

Table 3 Comparison of subsurface rupture lengths estimated from early shock locations in the BSHAP catalogue with ones calculated for the same M_w using the Coppersmith (1994) relations

Event time	Event ID in BSHAP Catalog	Earthquake name and location	Fault plane solution (FPS)	M_w (BSHAP catalog)	Estimated SbRL (km)	SbRL using WC-94 model for noted FPS (km)	SbRL using al WC-94 model
1976/05/06	9715	Friuli/Italy	TF	6.5	53	22	25
1979/04/15	10,937	Ulcinj/Montenegro coast	TF	6.9	73	38	43
1980/05/18	11,861	Kopaonik/Serbia	SS	5.9	28	12	11
1982/11/16	14,322	Fier/Albania	TF	5.6	21	7	7
1994/09/01	21,789	Bitola/Macedonia	SS	5.8	28	11	10
1995/05/13	22,402	Kozani-Grevena/Greece	NF	6.5	42	23	25
1996/09/05	25,030	Ston/Croatia	RF	6.0	38	11	13
2010/11/03	55,929	Kraljevo/Serbia	SS	5.5	27	7	6

Indicated fault type is denoted by: *TF* (thrust), *NF* (normal) and *SS* (strike slip) fault type

(a) 1996 Ston Eq., $M_w = 6.0$

Izbor modela predikcije kretanja tla (GMP)

SM zapisi

Problem:

- Dovoljan broj zapisa sa dobrom distribucijom: magnituda, rastojanja, tipova rasijedanja u registrovanom zemljotresu, vrsti tla na kome je registrovan SM zapis
- Uniformnost procesiranja SM zapisa

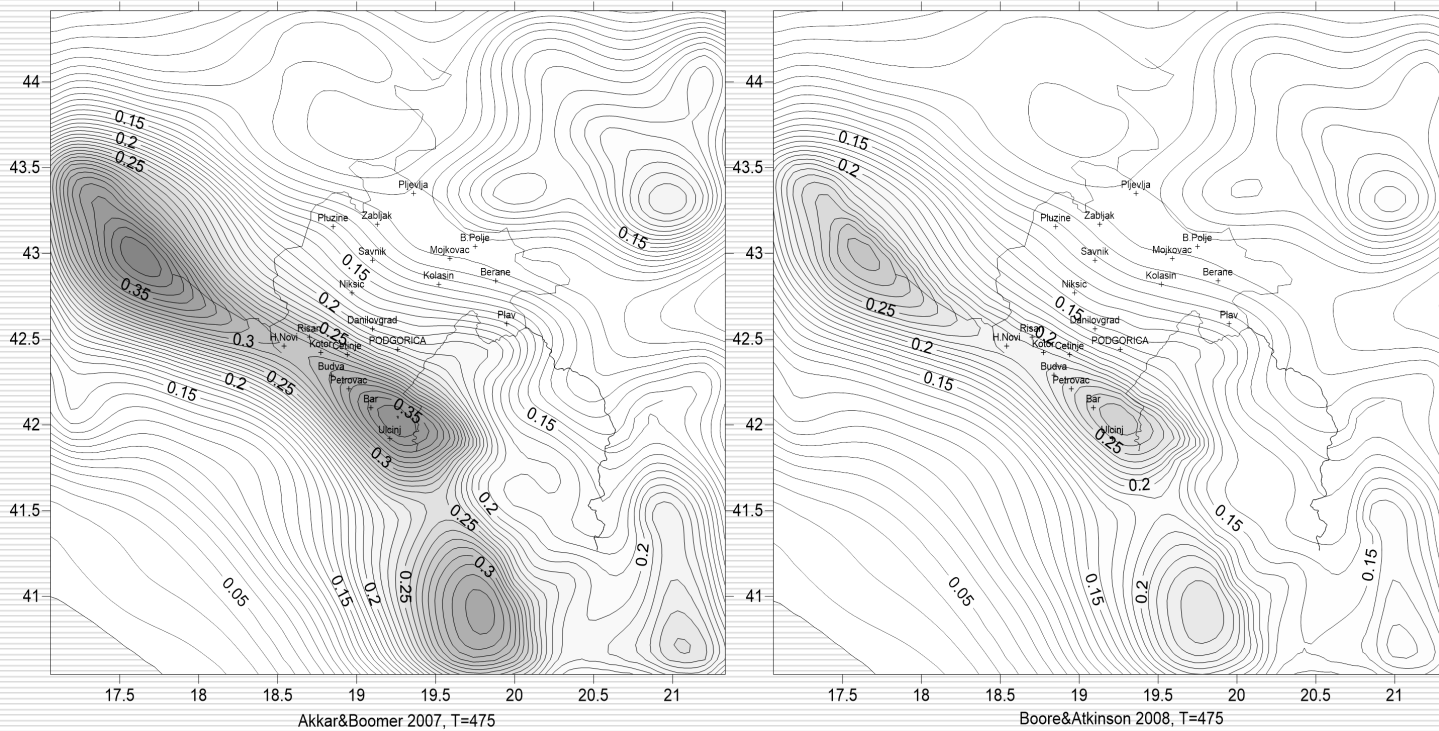
Izbor modela predikcije kretanja tla (GMP)

Problem:

- Očekuje se da GMPs razvijeni na osnovu regionalnih podataka bolje reflektuju tektonske karakteristike.
- Bazirani na statistički manje stabilnom i ograničenom broju podataka, regionalni modeli Balkana ne prolaze kriterijume izabrane za Seismic Hazard Harmonization in Europe (SHARE) projekat (2012).
- Podobnost GMP modela u odnosu na - tip tla, m_{max} , rastojanje, stil rasijedanja i dr. za koje je razvijen. Preporuke evropskih / širih projekata (SHARE predlaže predizbor od 19 GMPEs za plitke zemljotrese „shallow crustal“).
- Evropske GMPEs uglavnom su razvijene na podacima italijanske i turske SM baze podataka.

⇒ potrebna je provjera podobnosti izabranog seta modela - analiza reziduala, analiza „median prediction” i dr.

Generalno, izbor GMP ima najveći uticaj na rezultate PSHA



PGA (g), T=475 y.	Ulcinj	Podgorica	Berane
<i>Akkar & Boomer, 2007</i>	0.36	0.22	0.11
<i>Ambresys, 1996</i>	0.31	0.18	0.10
<i>Berge-Thiery, 2003</i>	0.30	0.21	0.13
<i>Bindi et al., 2009</i>	0.27	0.17	0.10
<i>Boomer et al, 2007</i>	0.36	0.22	0.11
<i>Boore & Atkinson, 2008</i>	0.27	0.17	0.09

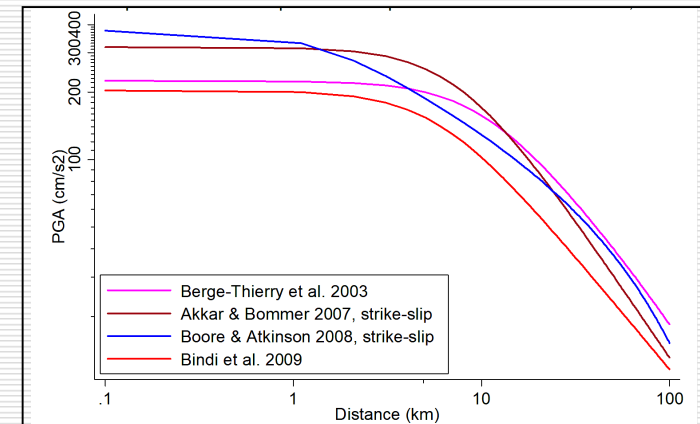
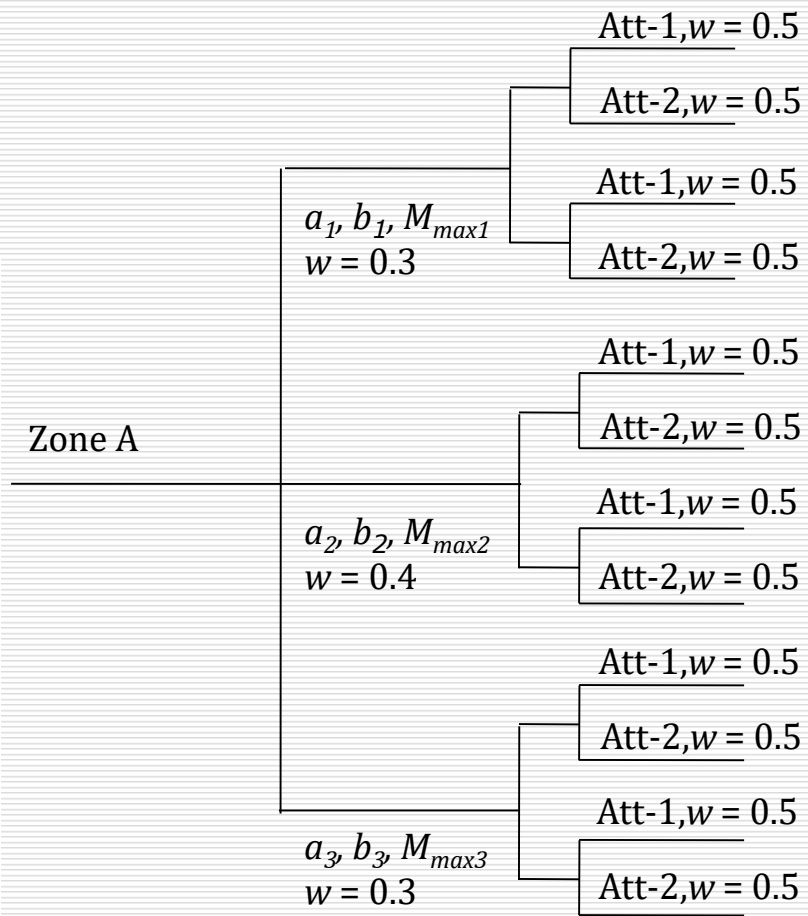
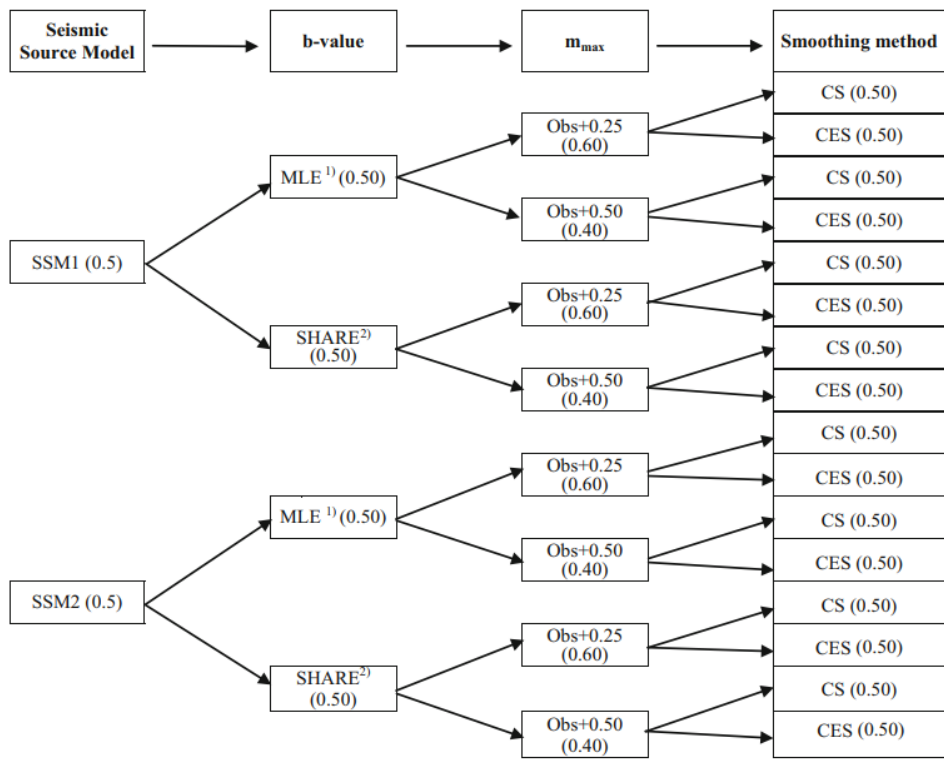


Figure 9a. Comparison of some median curves for PGA (rock condition, MW=6.0), N. Kuka 2010

Tretman nepouzdanosti uvedenih modelovanjima (epistemic uncertainties)

Logičko drvo kombinuje sve uvedene alternativne modele (grane) za:

- Zoniranje
- Zakone učestalosti ponavljanja zemljotresa
- Način usvajanja M_{max}
- Atenuacione zakone –GMPs
- ...



Ilustracija, M. Herak, 2007

Fig. 11 Logic tree for the background-gridded seismic source model for BSHAP project area b-value estimation: (1) Average value of Weichert and KS-92 MLE, (2) AS denotes Areal Source model of SHARE

Proračun vjerovatnoće - Poasonov model

Stohasticki model kojim se ekstrapolira **proračunata srednja normalizovana učestalost događanja**

$$p_t(n) = \frac{e^{-\lambda t} (\lambda t)^n}{n!} = \frac{e^{-\frac{t}{T}} (t/T)^n}{n!}$$

gdje su: $P(t)$ vjerovatnoća pojave n događaja u budućem vremenu t
 n broj događaja
 λ srednja učestanost događanja zemljotresa magnitude M
 t budući vremenski period za koji se računa vjerovatnoća

- Ako je $n=0$, tada je vjerovatnoća ne-pojavljivanja zemljotresa $p_t(0)=e^{-t/T}$
- Odnosno, vjerovatnoća suprotnog događaja (**prevazilaženja**) $n \geq 1$ je

$$p_t(n \geq 1) = 1 - p_t(0) = 1 - e^{-t/T}$$

Povratni period T zemljotresa jačine M je recipročna vrijednost srednje godišnje učestalost dešavanja zemljotresa

Vrijednosti T i (p, t) međusobno su povezane veličine. Isti povratni period T može biti izražen preko drugog seta (p, t) .

$P_{50}=10\%$ vjerovatnoća prevazilaženja je $0.1=1-e^{-50/T} \Rightarrow T=475$

T	t	p
475	1	0.21%
475	475	63.2%

PSHA , koncept povratnog perioda

Česte zablude:

- Povratni period daje uvid u mogućnost pojave zemljotresa!

Npr.

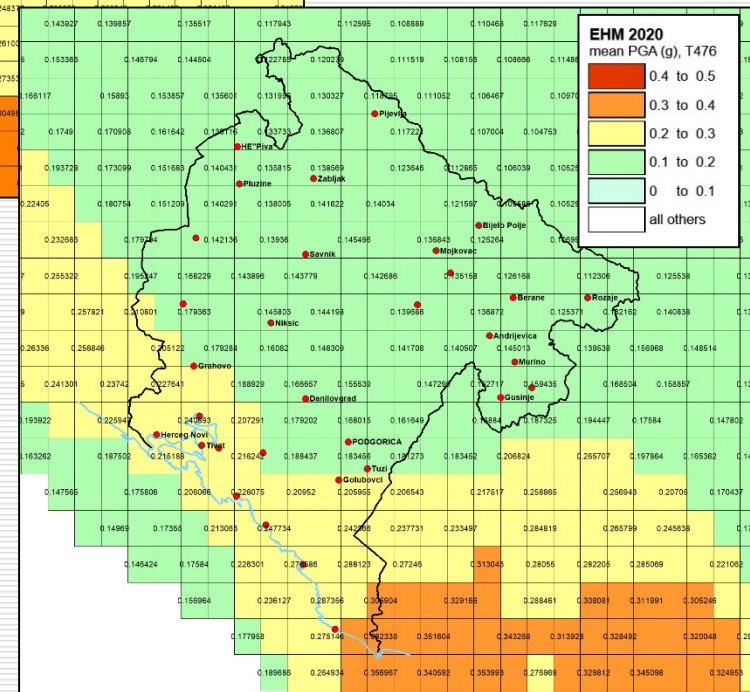
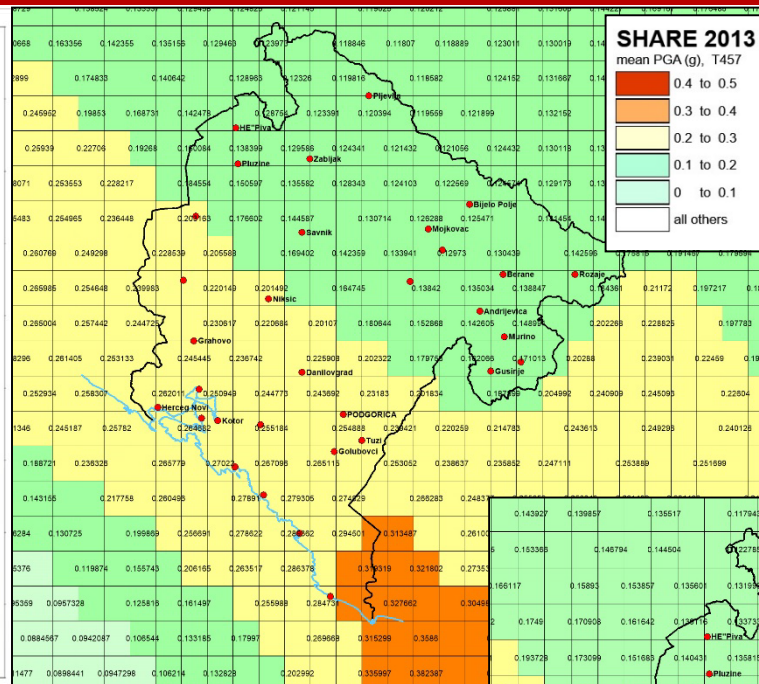
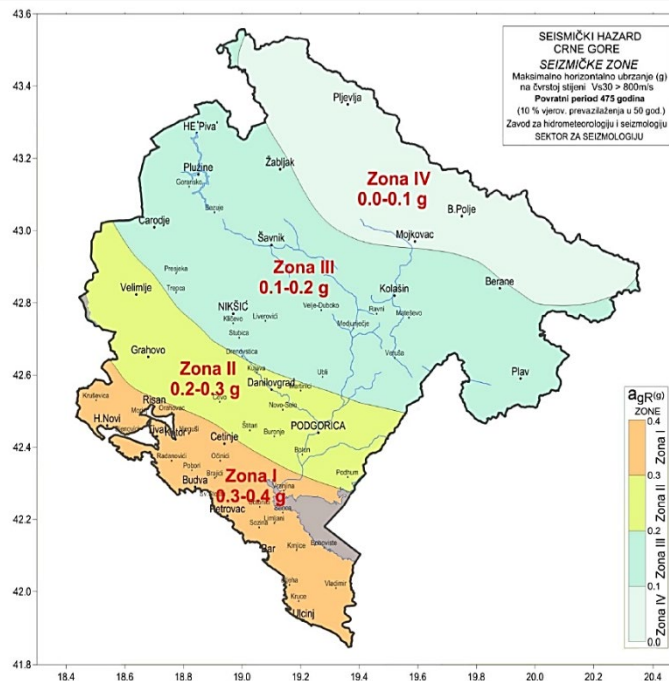
-zemljotres M7 je događaj sa T475 god -
Sljedećih 475 godina (od 1979.) u Crnoj Gori neće se desiti zemljotres magnitude 7.
-u sljedećih 475 (od 1979.) godina sigurno će se desiti zemljotres magnitude 7 u Crnoj Gori

- U Crnoj Gori ne može se desiti zemljotres M veće od 7. Može m_{max} !
- PGA (ili bilo koji drugi parametar kretanja tla) sračunat za dati povratni period su sigurno poznati!

U stvarnosti:

- Povratni period je alternativa za iskazivanje godišnje vjerovanoće prevazilaženja (one su osrednjene vrijednosti dugoročnih osmatranja).
- Proračun T zavisi od broja (dužine) i kvaliteta podataka o zemljotresima
- U T 475 godina u Crnoj Gori ne mora ili može da se desi 1 ili više zemljotresa M7.
- Budućnost nije izvjesna!
- Iako je klasični PSHA pristup (Cornell, 1968) široko prihvaćen, nepouzdanosti rezultata su velike.

Posao nije nikad završen



Potrebe i mogućnosti:

- Redovne provjere, praćenje metodologije
- Instrumentalni kapaciteti - broj SM instrumenata bi trebao da bude mnogostruko veći od sadašnjih 13
- Provjera odabira el. spektara
- Jačanje kapaciteta - kvalifikacije i podmlađivanje izvršilaca
- Saradnja sa akademijom, regionalni i evropski projekti

Seizmički hazard – gdje se koristi

1. U aktuelnom formatu (10% prevazilaženja α_{gR} u 50 ili 10 godina) **PSHA analiza je prilagođena zahtjevima projektovanja seizmički sigurnih konstrukcija** (izbor parametra koji se analizira, T vezan za nivo dopuštenog tehničkog rizika / nivo pouzdanosti 90%) - **reflektuje se na smanjenje seizmičkog rizika**
2. **Prostorno planiranje**: Seizmički hazard je ograničenje u korišćenju prostora i konflikt razvoju
 - Seizmički hazard kao **makrozoniranje ima krupnu razmjeru** - daje smjernice o distribuciji aktivnosti, privrede, razvoju grana (turizam, korišćenje resursa..), krupni infrastrukturni sistemi (princip izbjegavanja hazarda)
 - Kako postoji već izgrađena sredina – važniju ulogu ima analiza seizmičkog rizika
3. **Podloga u mikroseizmičkom zoniranju** – odlučujuća kontrolna uloga u **urbanističkom planiranju**
 - Dinamički faktor amplifikacije, seizmičke zone, podobnost za urbanizaciju, nosivost terena...
 - Zaboravljene preporuke o očekivanom frekventnom sastavu oscilacija, preporuke o tipu konstrukcije
 - **Podloga za proračun rizika** i određivanje dopuštenog seizmičkog rizika