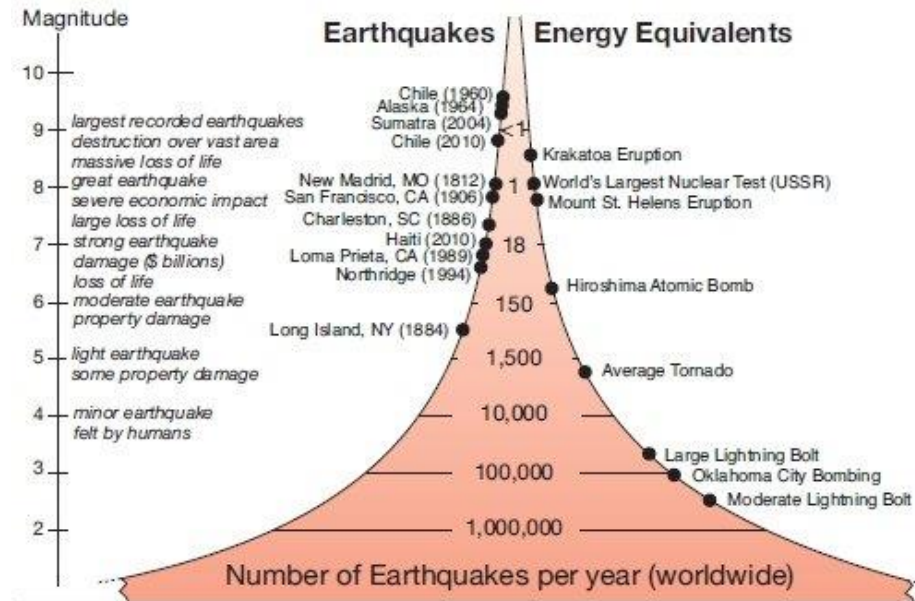


# **SEISMOLOGIE A SEISMOTEKTONIKA**

## **část 8.: Statistické a pravděpodobnostní zpracování dat**

# 8.1: Magnitudo-četnostní vztahy

Empirická pozorování ukazují, že slabých otřesů s malým magnitudem je mnohem více, než silných zemětřesení. Ukazuje se, že četnost zemětřesení v závislosti na magnitudu lze vyjádřit pomocí empiricky odvozeného pravidla, které předložili **Gutenberg a Richter** v roce 1954 a které vychází z úvah Omoriho z roku 1889.



Mezi logaritmickou četností a magnitudem je (podle Gutenberga a Richtera) lineární vztah:

$$\log N(M) = A - bM$$

kde  $M$  je magnitudo;  $N(M)$  je kumulativní počet zemětřesení o magnitudu  $M$  a vyšším;  $A$ ,  $b$  jsou empiricky odvozené konstanty.

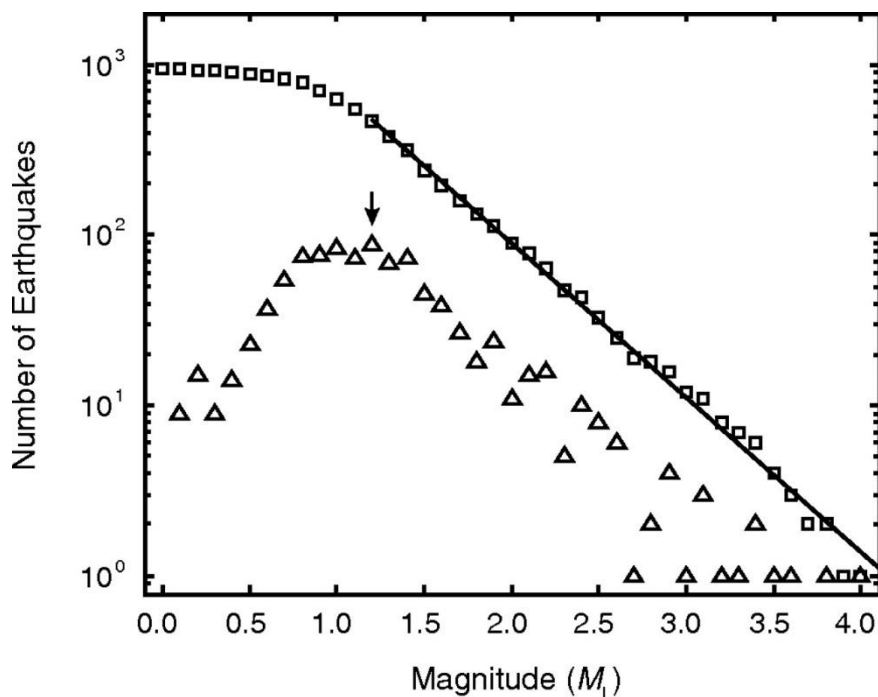
nebo:

$$\log n(M) = a - bM$$

kde  $M$  je magnitudo;  $n(M)$  je počet zemětřesení o magnitudu  $M$ ;  $a$ ,  $b$  jsou empiricky odvozené konstanty.

$$N(M) = \int_M^{\infty} n(M) dM$$

Původní Gutenbergova a Richterova definice vychází z kumulativní četnosti zemětřesení  $N$ . Protože je ale vzat logaritmický a diskrétní černost  $n$  si můžeme vyjádřit jako derivaci  $dN/dM$ , parametr  $b$  je v obou vztazích stejný, liší se pouze parametry  $A$  (respektive  $a$ ).

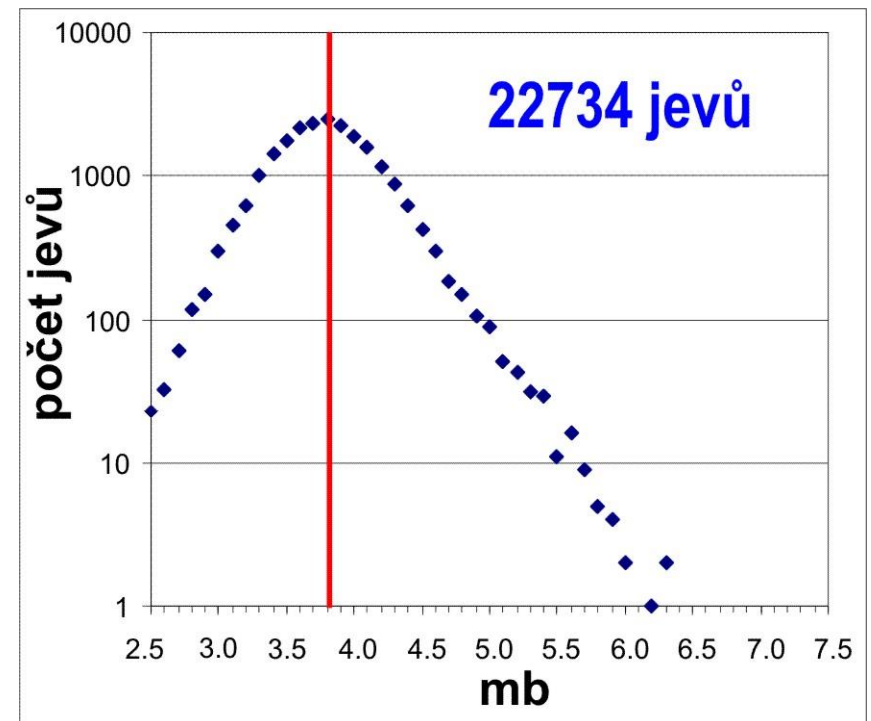
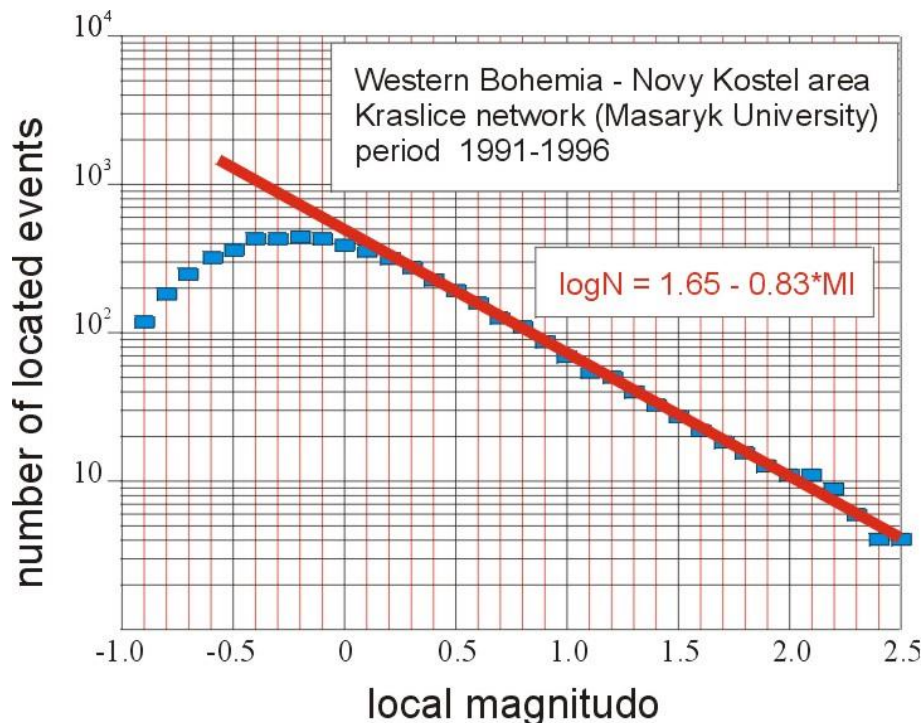


$$\log N(M) = A - bM$$

$$\log n(M) = a - bM$$

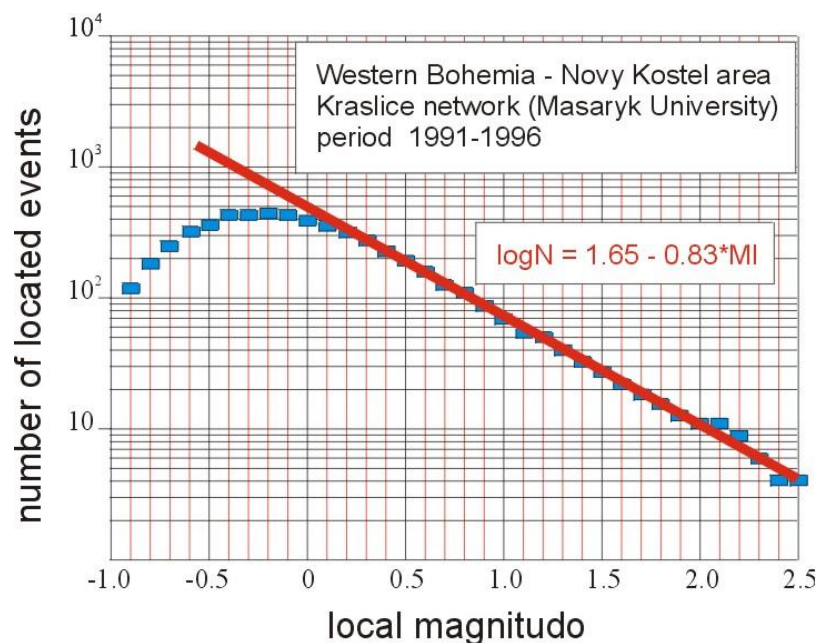
Konstanta  $a$  ukazuje počet otřesů s magnitudem větším než 0. Velmi důležitým parametrem popisujícím seismicitu sledované oblasti je konstanta  $b$ , která popisuje poměr mezi slabými a silnými zemětřeseními.

$$\log N(M) = a - bM$$



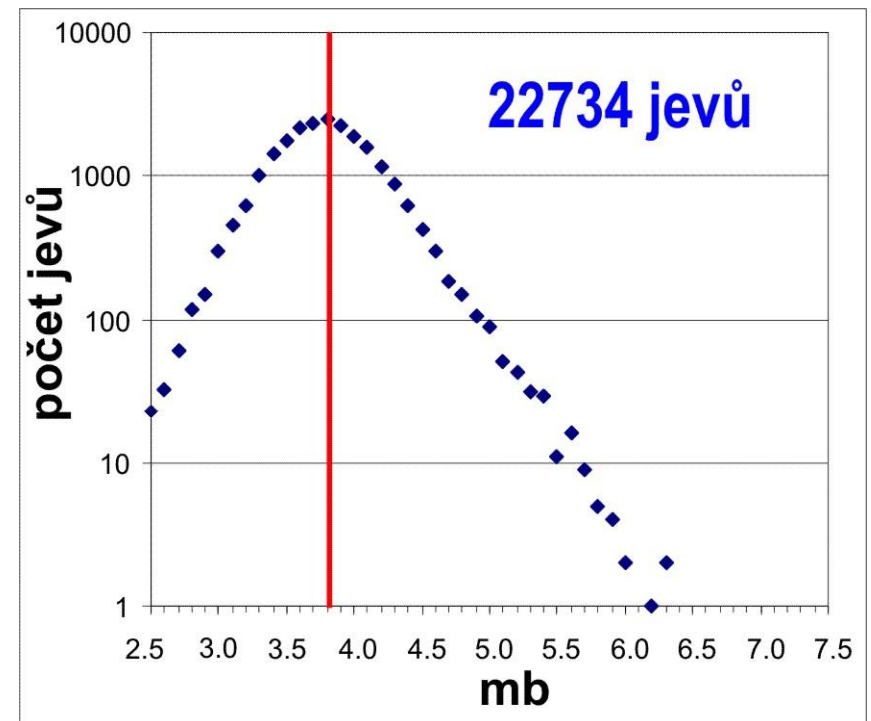
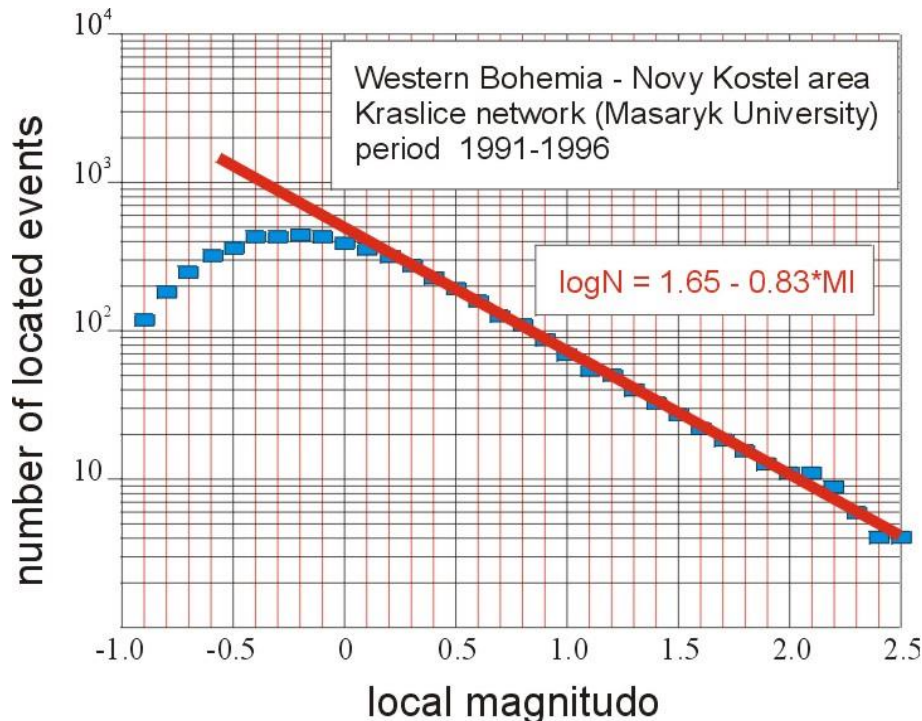
Četné empirické studie potvrzují, že Gutenbergův a Richterův magnitudo-četnostní vztah je skutečně přibližně lineární a hodnota parametru  $b$  kolísá v rozmezí 0.6 až 1.4 (u vulkanických zemětřesení může být až kolem 2)

$$\log n(M) = a - bM$$



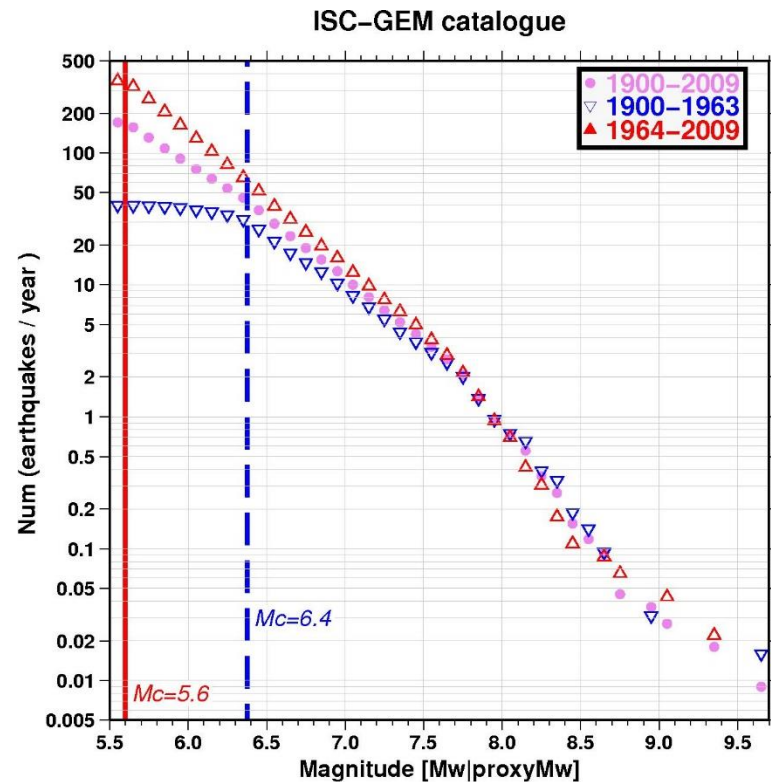
Ztráta linearity v magnitudo-četnostním grafu pro malá hodnoty magnituda (tzv. roll-off efekt) je způsobena nedostatečnou detekční schopností sítě.

$$\log N(M) = a - bM$$

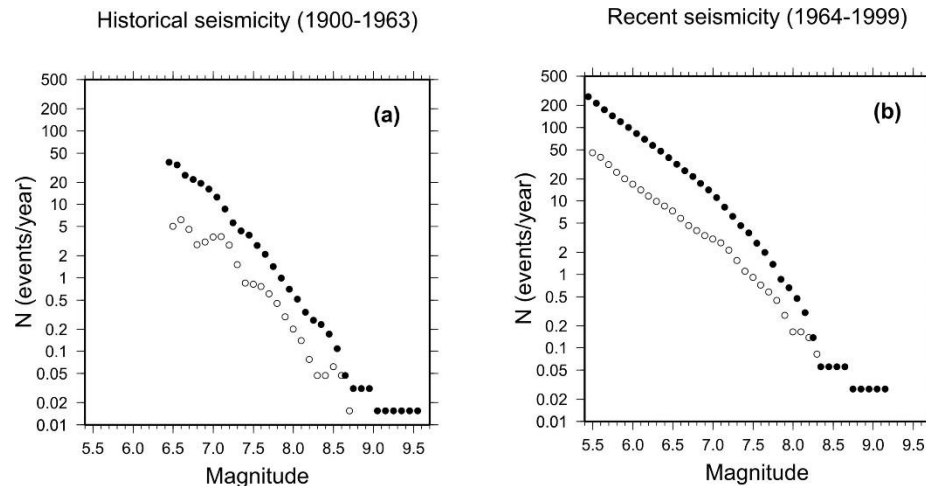




Roll-off efekt můžeme pozorovat také při statistickém zpracování údajů v katalozích seismických jevů. V případě katalogů zemětřesení ukazuje roll-off efekt mezní hodnotu magnituda (toto mezní magnitudo se často označuje  $M_c$ ), pro kterou lze katalog považovat za kompletní.



Slabý roll-off efekt u historických otřesů ukazuje, že globální katalogy historických zemětřesení (1900-1964) nejsou pro  $M_s < 7.0$  kompletní. Novější katalogy (1964-1999) mohou být kompletní již pro  $M_s > 5.2$ .



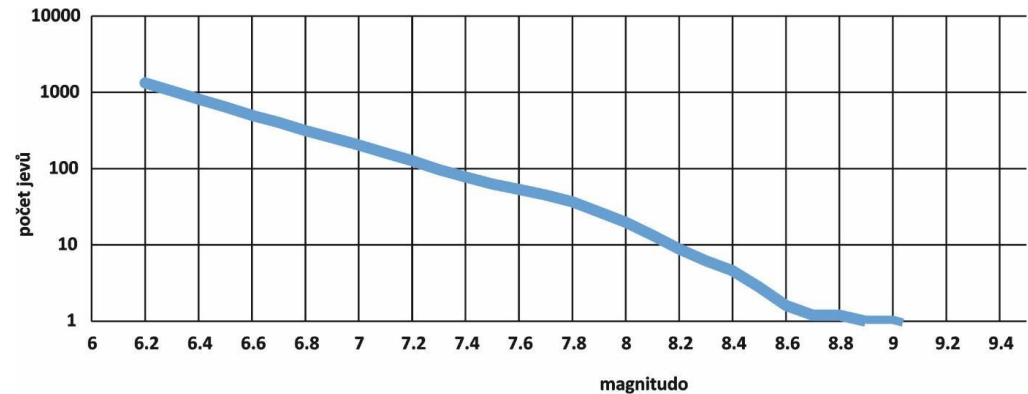
***Globální magnitudo-četnostní grafy pro historická zemětřesení (1900-1964 - vlevo) a novější zemětřesení (1964-1999 - vpravo): prázdná kolečka - četnosti pro dílčí hodnoty magnituda  $M_s$ , plná kolečka - kumulativní četnosti (Engdahl-Villasenor 2002).***

Globálně z empirického pozorování závislosti četnosti otřesů na velikosti magnituda od roku 1950 vyplývá, že ročně by se mělo vyskytnout průměrně:

1 otřes s  $M_w > 8.0$

asi 14 otřesů s  $M_w > 7.0$

asi 130 otřesů s  $M_w > 6.0$



*Počty jevů v globálním katalogu NEIC v časovém úseku 1951 až 2018.*

Počet jevů s magnitudem  $M-1$  je tedy cca desetinásobný oproti počtu jevů s magnitudem  $M$ .

Přitom uvolněná seismická energie je u jevu s magnitudem  $M-1$  cca třicetkrát menší, než u jevu s magnitudem  $M$ .

Důsledek: Seismická energie uvolněná všemi zemětřeseními s magnitudem  $M-1$  je jen cca třetinová oproti seismické energii uvolněné zemětřeseními s magnitudem  $M$ .

# *Pravděpodobnost a magnitudo-četnostní graf*

Při propagaci ruptury působí síly, které jednak vedou k pokračování propagace a jednak k zastavení propagace ruptury.

Nechť pravděpodobnost, že síly vedoucí k pokračování propagace převáží tak, aby se plocha ruptury zdvojnásobila, je cca 50%.

Nechť velikost plochy porušené zóny nejmenších jevů je  $A$ .

(viz prezentace Karen Felzer, University Pasadena:  
[pasadena.wr.usgs.gov/office/kfelzer/SCEHAP\\_GR\\_Felzer.pdf](https://pasadena.wr.usgs.gov/office/kfelzer/SCEHAP_GR_Felzer.pdf) )

Důsledek:

Při N jevech budeme pozorovat:

<b>Kumulativní procentuální zastoupení</b>	<b>počet jevů n</b>	<b>velikost celkové plochy porušené zóny A</b>
50%	$N/2$	$A_1$
75%	$N/4$	$2A_1$
87.5%	$N/8$	$4A_1$
93.75%	$N/16$	$8A_1$
...	...	...

Budeme-li považovat počet první kategorie jevů ( $N/2$ ) za jednotkové množství, tak počet dalších kategorií jevů můžeme vyjádřit vztahem:  
 $n = 1/A !!$

Velikost plochy souvisí s magnitudem:

M <sub>w</sub>	plocha zlomu (km <sup>2</sup> )	délka zlomu (km)
5	~ 5 - 10	~ 1 - 3
6	~ 70 - 110	~ 6 - 12
7	~ 630 - 1100	~ 45 - 60
8	~ 5.000 - 12.000	~ 250 - 330
9	~ 30.000 - 150.000	~ 1.250 - 2.400
10	~ 600.000 - 1.500.000	~ 6.000 - 17.000

*Hrubé odhady vztahu mezi momentovým magnitudem a velikostí porušené zóny (sumarizováno podle Abrahamson 2006, Bormann 2002 a Vakov 1996).*

Velice přibližně můžeme říci:

Mw	plocha zlomu (km <sup>2</sup> )
5	$\sim 10^1$
6	$\sim 10^2$
7	$\sim 10^3$
8	$\sim 10^4$
9	$\sim 10^5$
10	$\sim 10^6$

Tj. plocha porušené zóny  $A$  je úměrná exponenciální funkci  $10^{M-a}$ :

$$A \approx 10^{M-a}$$



Pro četnost  $n$  ve vztahu k porušené ploše  $A$  tedy předpokládáme:

$$n \approx \frac{1}{A}$$

Pro velikost porušené plochy  $A$  ve vztahu k magnitudu předpokládáme:

$$A \approx 10^{M-a}$$

A tedy pro četnost ve vztahu k magnitudu lze předpokládat:

$$n \approx \frac{1}{A} \approx \frac{1}{10^{M-a}} = 10^{a-M}$$

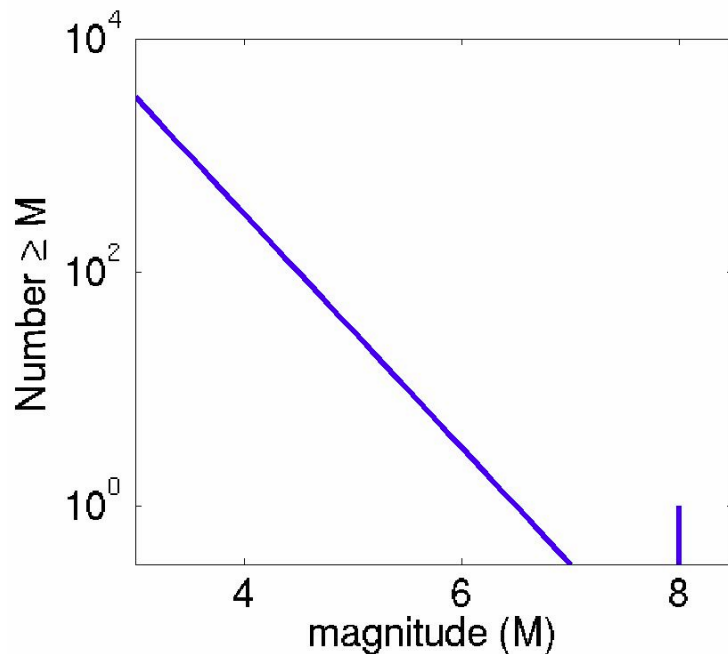
Na základě diskutovaných úvah tak získáváme předpoklad o závislosti mezi četností jevů a magnitudem:

$$n \approx 10^{a-M} \Leftrightarrow \log(n) \approx a - M$$

Což odpovídá Gutenberg-Richterovu magnitudo-četnostnímu vztahu:

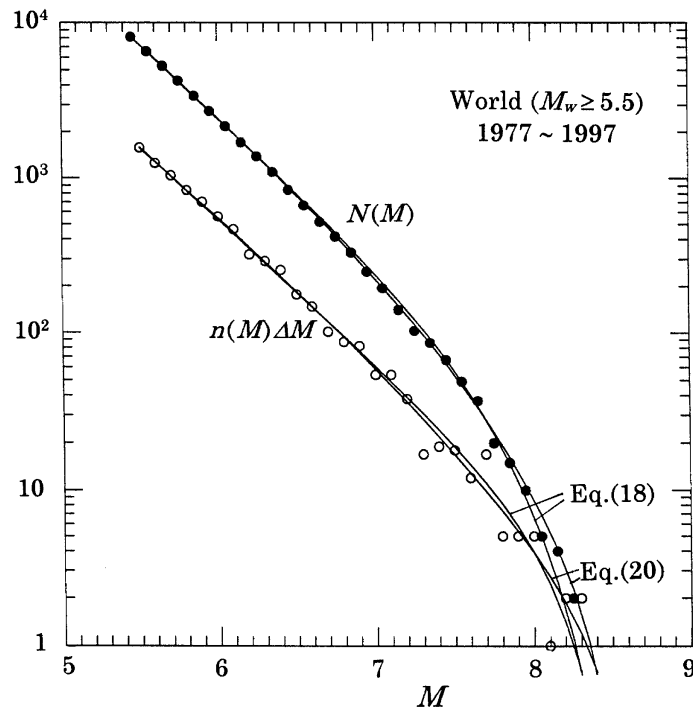
$$\log N(M) = a - bM$$

**Ale!** Ukazuje se, že Gutenberg-Richterův vztah nepopisuje skutečnost zcela v souladu s pozorováním. Např. mimořádně silná zemětřesení jsou pozorována s vyšší četností, než by vyplývalo Gutenberg-Richterovo pravidla.



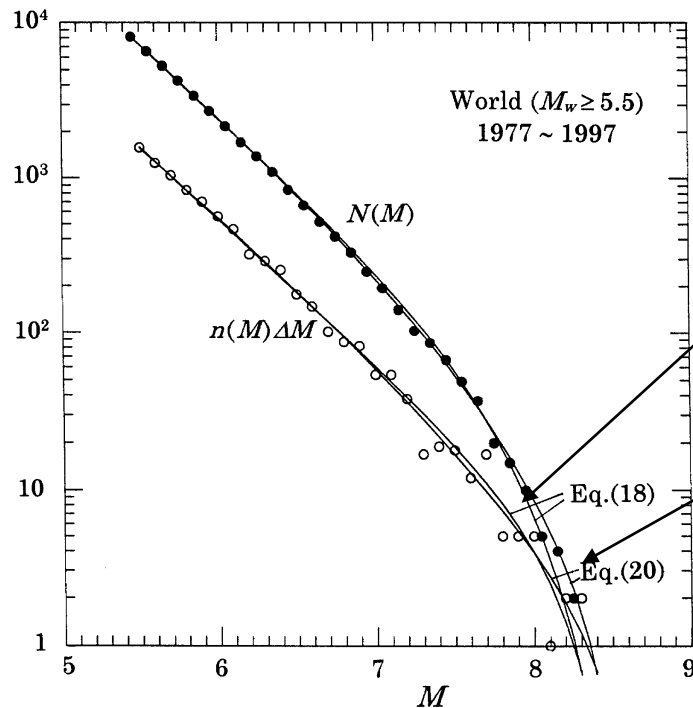
*(Wesnousky et al. 1983, podle presentace K. Felzer)*

**Ale!** Četné studie také ukazují významné zakřivení v magnitudo-četnostním grafu pro jevy s vyšším magnitudem (limitně se křivka blíží k nějakému maximálnímu magnitudu).



(Utsu 2002)

Zakřivení v magnitudo-četnostním grafu pro jevy s vyšším magnitudem se snaží vystihnout alternativní magnitudo-četnostní vzorce.



$$\log n(M) = a - bM - k10^{1.5M}$$

$$\log n(M) = a - bM + \log(M_{\max} - M)$$

(Utsu 2002)

## 8.2: Distribuce zemětřesení v prostoru a čase

Studium seismicity se opírá o dlouhodobé monitorování seismické aktivity a využívá řady katalogů zemětřesení sestavených v různých dobách pro různé regiony.

K prvním katalogům patří katalogy ze 17. a 18. století:

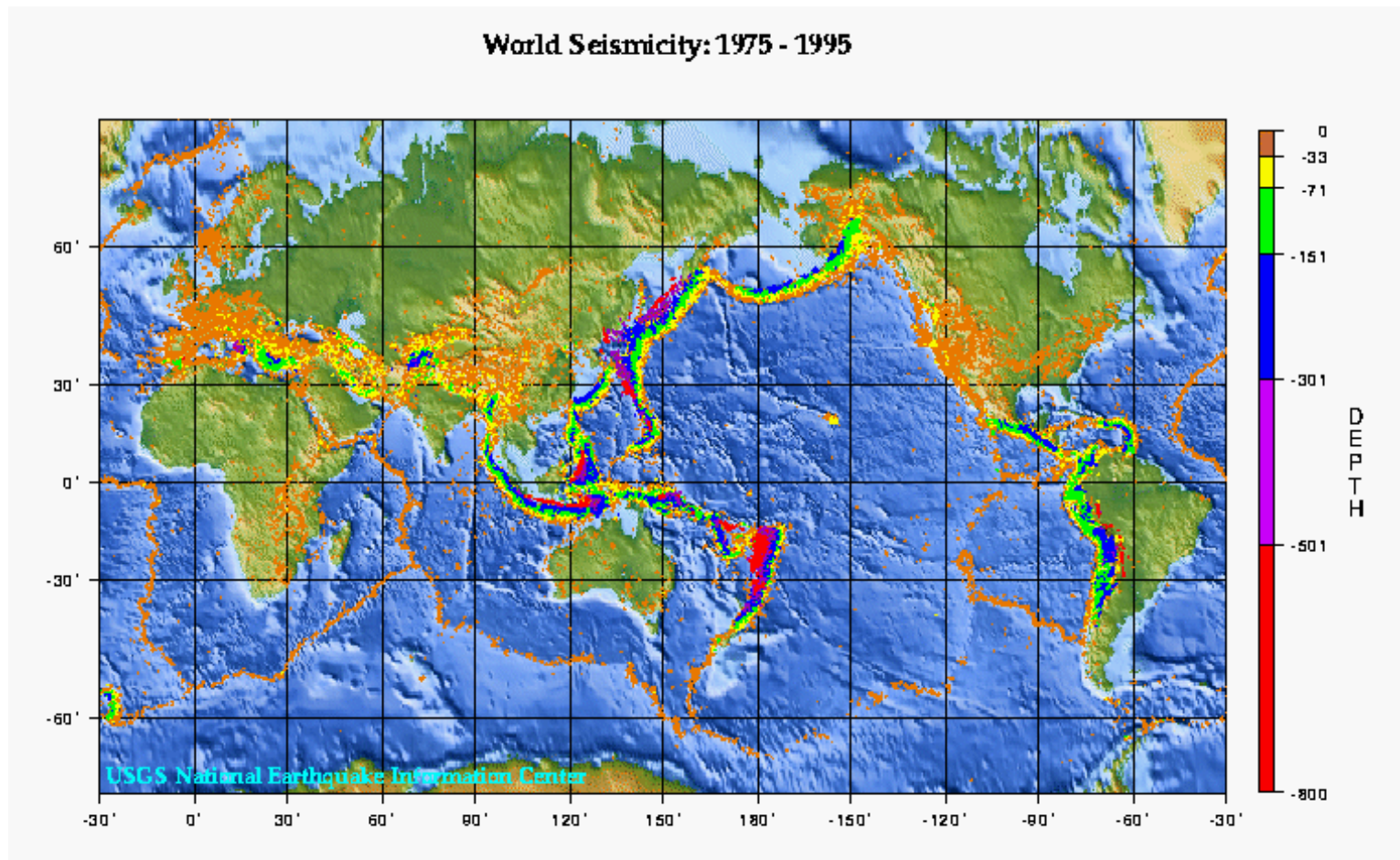
Johann Zahn - 1680; Moreira de Mendonca - 1758

Pro region střední Evropy jsou významné Kárníkovy katalogy z let 1969 a 1971.

Dnes se studium seismicity opírá o moderní katalogy jako jsou katalogy ISC (International Seismological Centre, Newbury) nebo NEIC (National Earthquake Information Service, Denver).

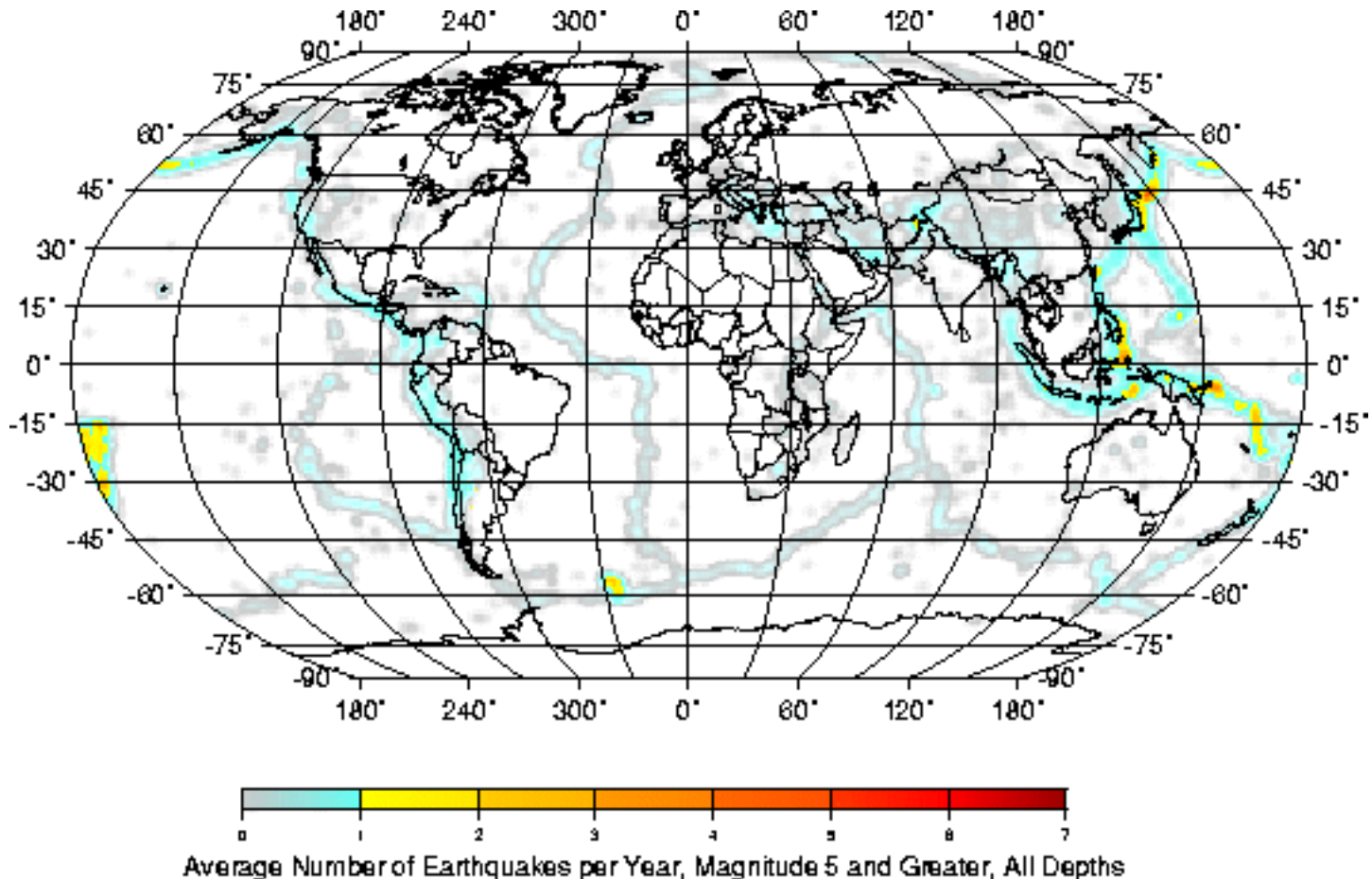
# Globální distribuce zemětřesení v prostoru

Distribuce zemětřesení je na povrchu Země velmi nerovnoměrná.





Vysoká hustota zemětřesení je hlavně na okrajích litosferických desek.

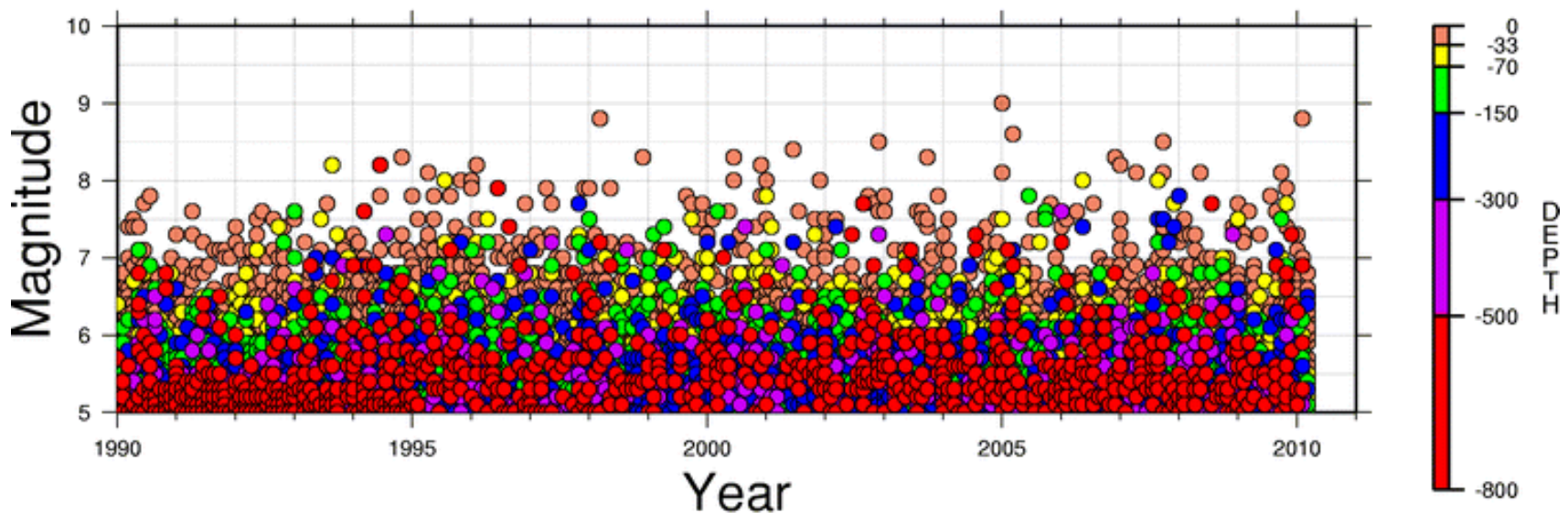


# Globální distribuce zemětřesení v čase

Distribuce zemětřesení v čase se v posledních desetiletích jeví jako relativně rovnoměrná.

Earthquakes Located by the NEIC

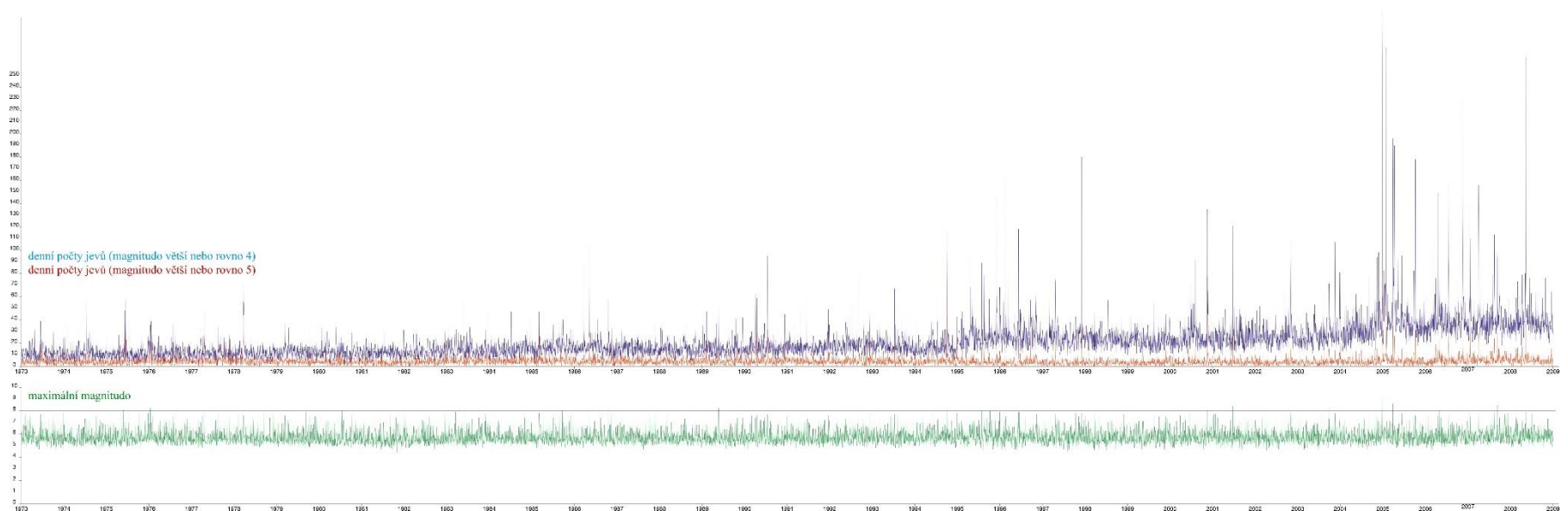
Magnitude 5 and Greater



Mon Mar 8 03:50:00 MST 2010

USGS National Earthquake Information Center

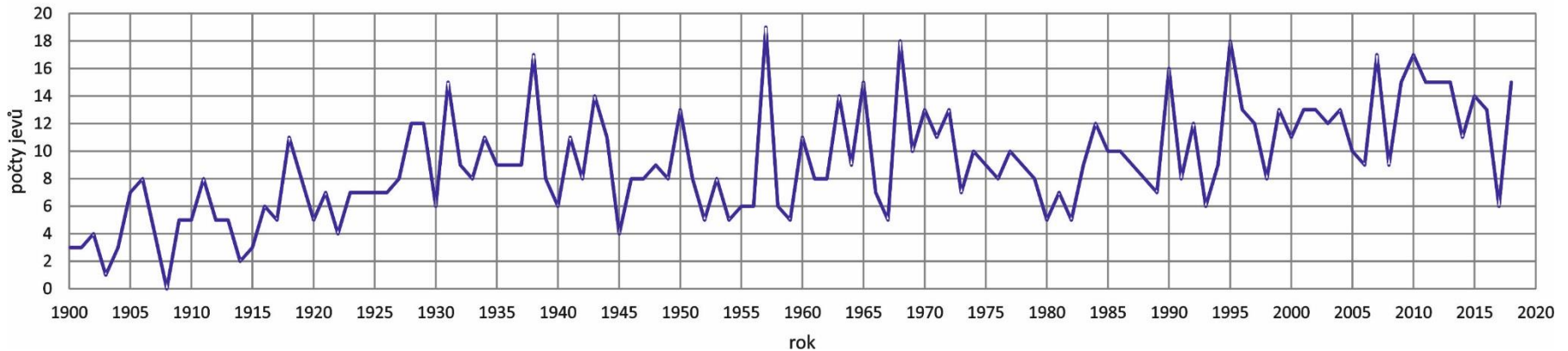
Narůstá počet registrovaných slabých otřesů -  
důvod: zvyšující se detekční schopnost globální sítě.



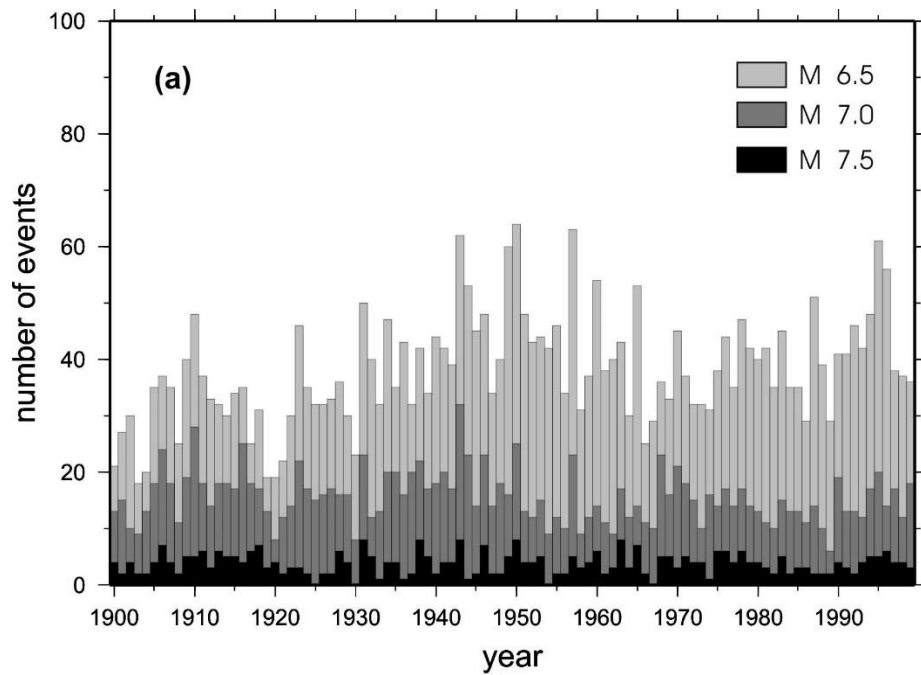
***globální seismicita: denní počty zemětřesení s  $M > 4$  (modrá) a  $M > 5$  (červená) a maximální magnituda v letech 1973-2009 (data převzata z NEIC).***

Pro počty registrovaných silných otřesů není růst – jejich počty kolísají (více a méně aktivní období).

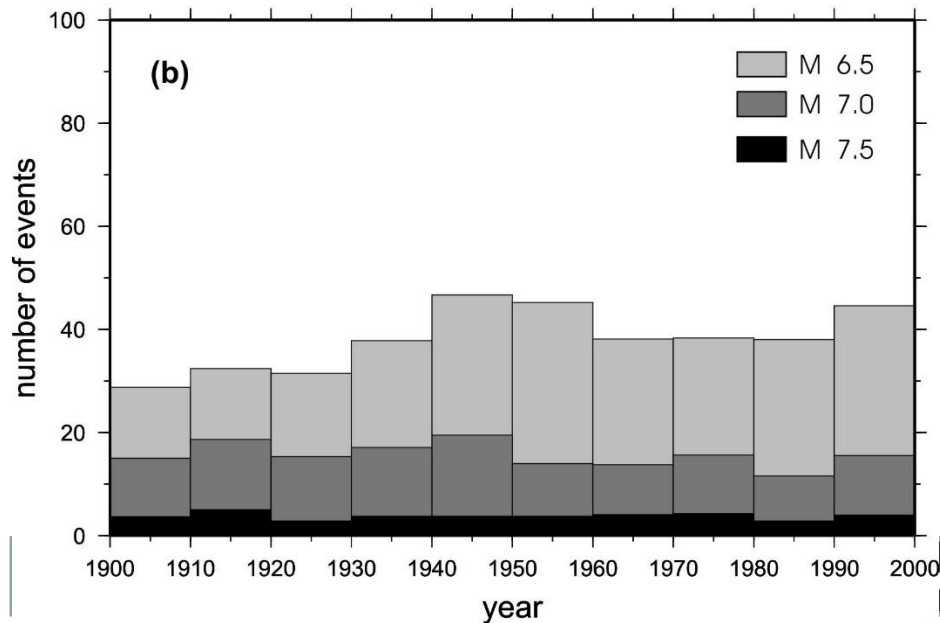
počty zemětřesení s  $M > 7$  v globální databázi NEIC



***globální seismicita: roční počty zemětřesení s  $M > 7$  v letech 1900-2018 (data převzata z NEIC – neúplná data před rokem 1950).***

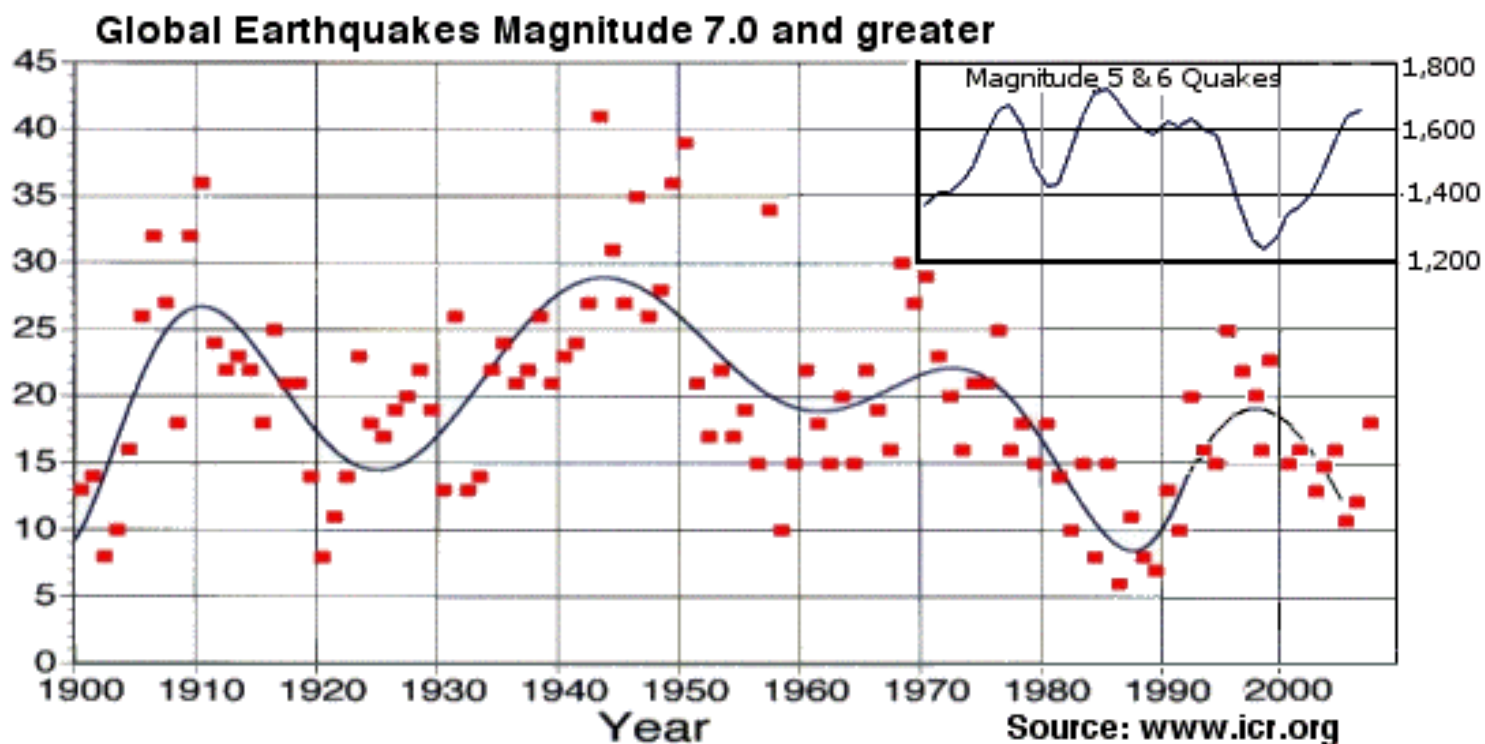


Relativně vyšší seismická aktivita byla v posledním století zjištěna v letech 1940-1965.

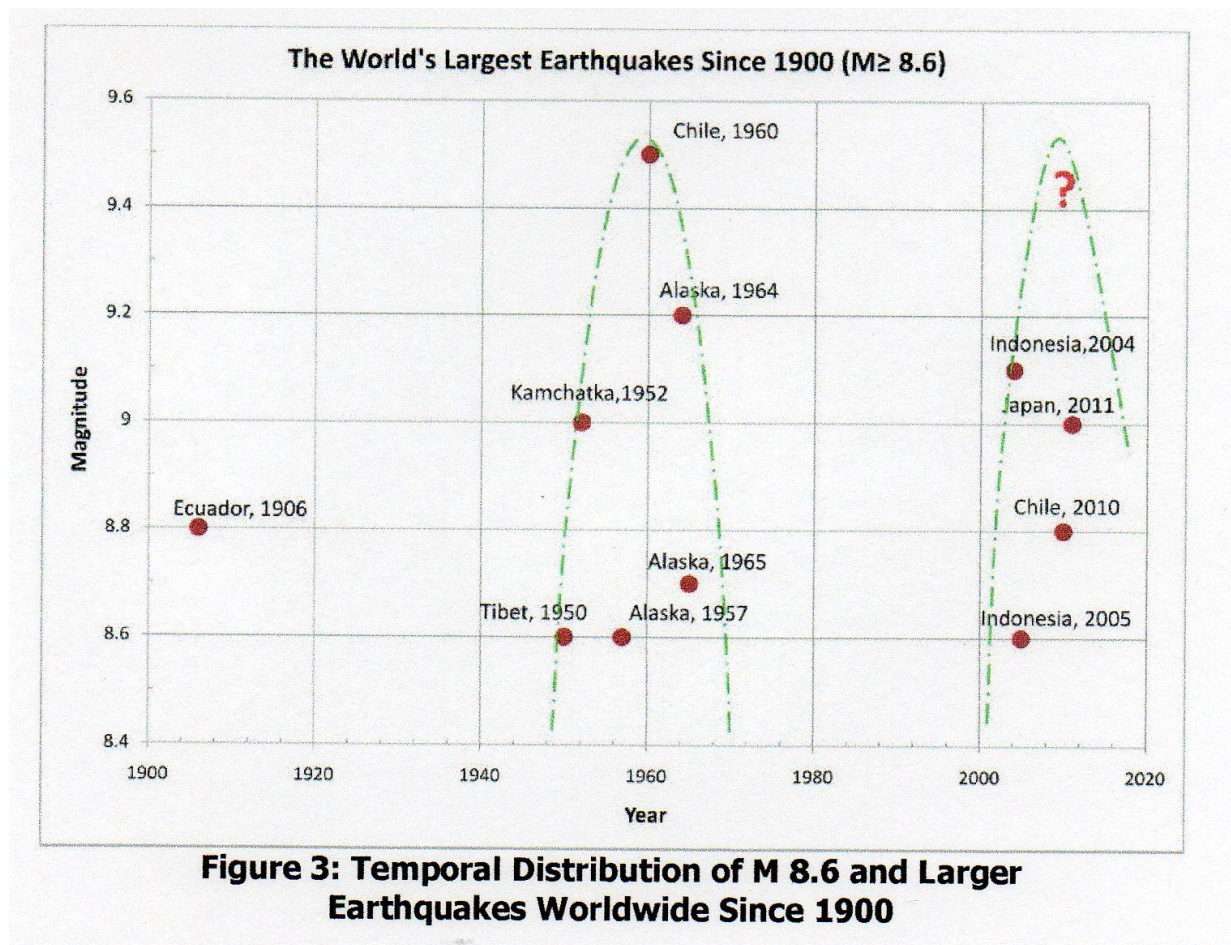


*distribuce silných zemětřesení v čase od roku 1900 (Engdahl, Villasenor 2002).*

Počty silných otřesů během posledního století v čase kolísají, ale nejeví tendenci k dlouhodobému poklesu či vzrůstu počtu jevů s časem.



Na druhé straně se zdá, že výskyty extrémně silných zemětřesení se kumulují v řádově desetiletí trvajících obdobích zvýšené seismické aktivity.



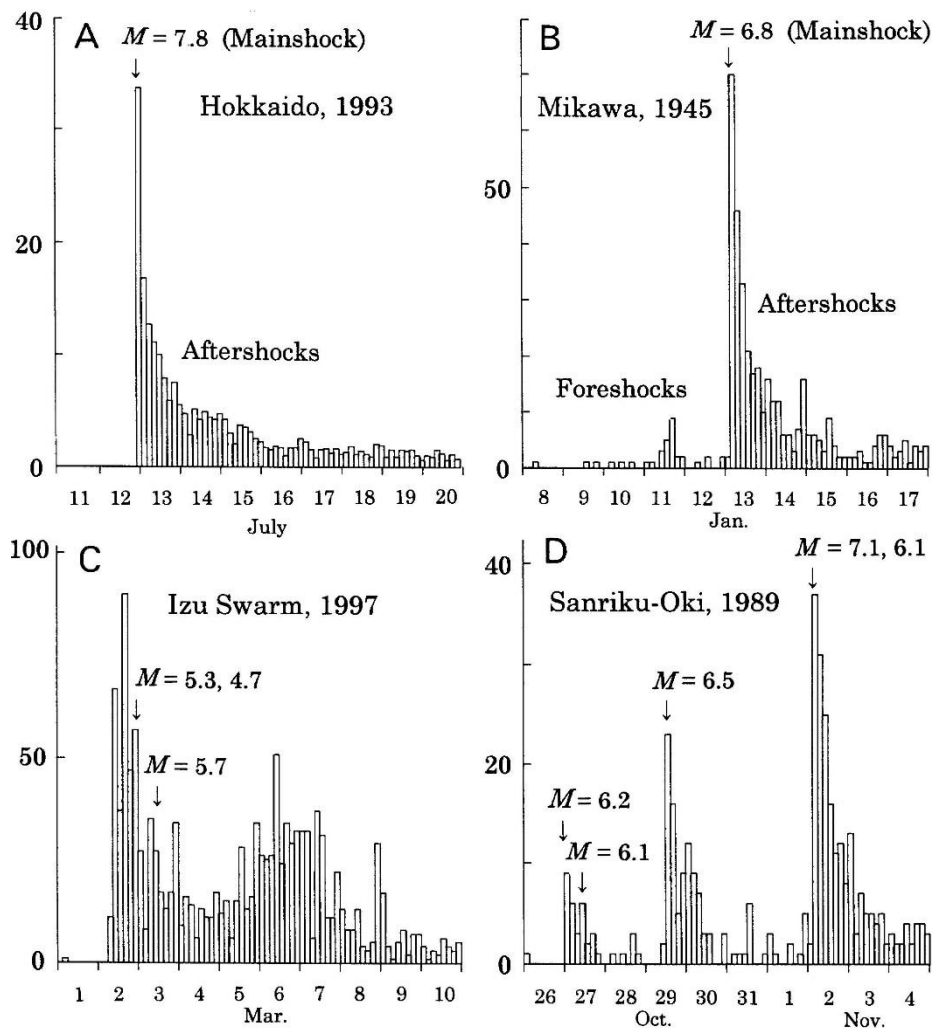
<b>charakteristika zemětřesení</b>	<b>magnitudo</b>	<b>průměrný počet za rok</b>
ničivé	8.0 a více	~1
velké	7.0 – 7.9	~ 13
silné	6.0 – 6.9	~ 128
střední	5.0 – 5.9	~ 1.319
lehké	4.0 - 4.9	~ 13.000
menší	3.0 – 3.9	~ 130.000
velmi slabé	2.0 – 2.9	~ 1.300.000

*Rozdělení zemětřesení podle velikosti (počty podle dat NEIC).*



# Seismické sekvence a seismické roje

Seismická aktivita se projevuje buď časově izolovanými otřesy, nebo sekvencemi více otřesů.

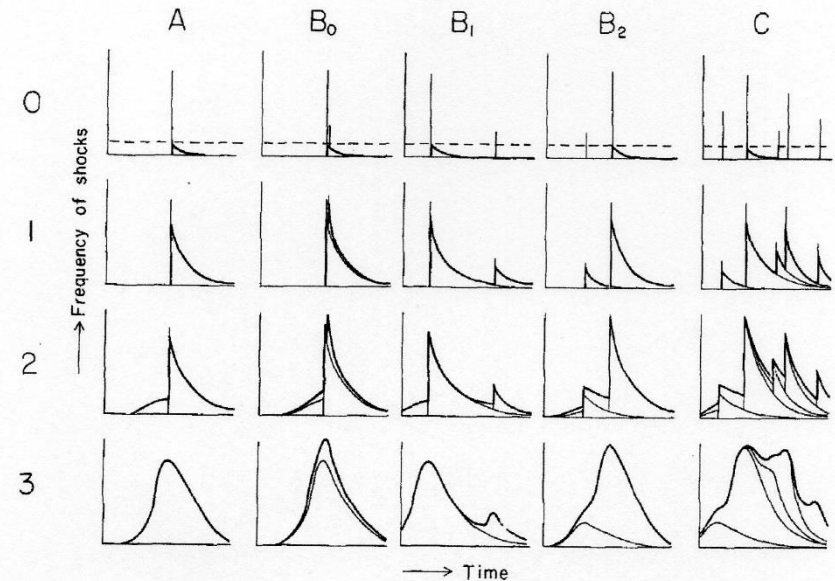


*Příklady časových sekvencí zemětřesení podle Utsu (2002) -*

*obr c) je seismický roj v užším slova smyslu*

Podle charakteru distribuce jevů v čase, s ohledem na jejich počet a magnitudo, lze rozlišit několik základních typů sekvencí otřesů:

- izolovaný jev
- hlavní otřes následovaný dotřesy
- hlavní otřes s předtřesy a následovaný dotřesy
- seismický roj



	A	B <sub>0</sub>	B <sub>1</sub>	B <sub>2</sub>	C
0	Single event *	(Doublet) *			Multiplet *
1	Main shock – aftershock series				#
2	Foreshock – main shock – aftershock series				#
3	Swarm				

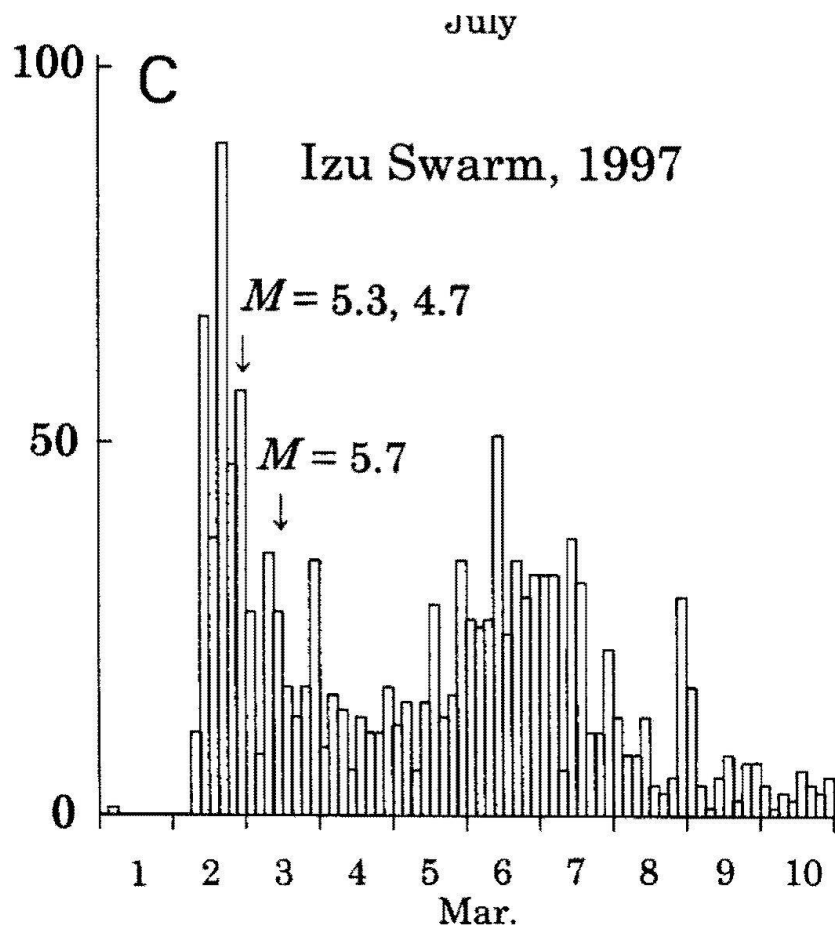
Fig. 75. Types of earthquake sequences. Length of the vertical bar represents the size of the "main shock".

\* When the events above the broken line only are observed.

# If one main shock has exceedingly large magnitude, the sequence is no more called swarm.

(podle Utsu 1970)

Jako seismický roj se obvykle označuje série otřesů, které se vyskytly v krátkém čase na jednom místě, kde žádný otřes svou velikostí nepřevyšuje výrazně ostatní.



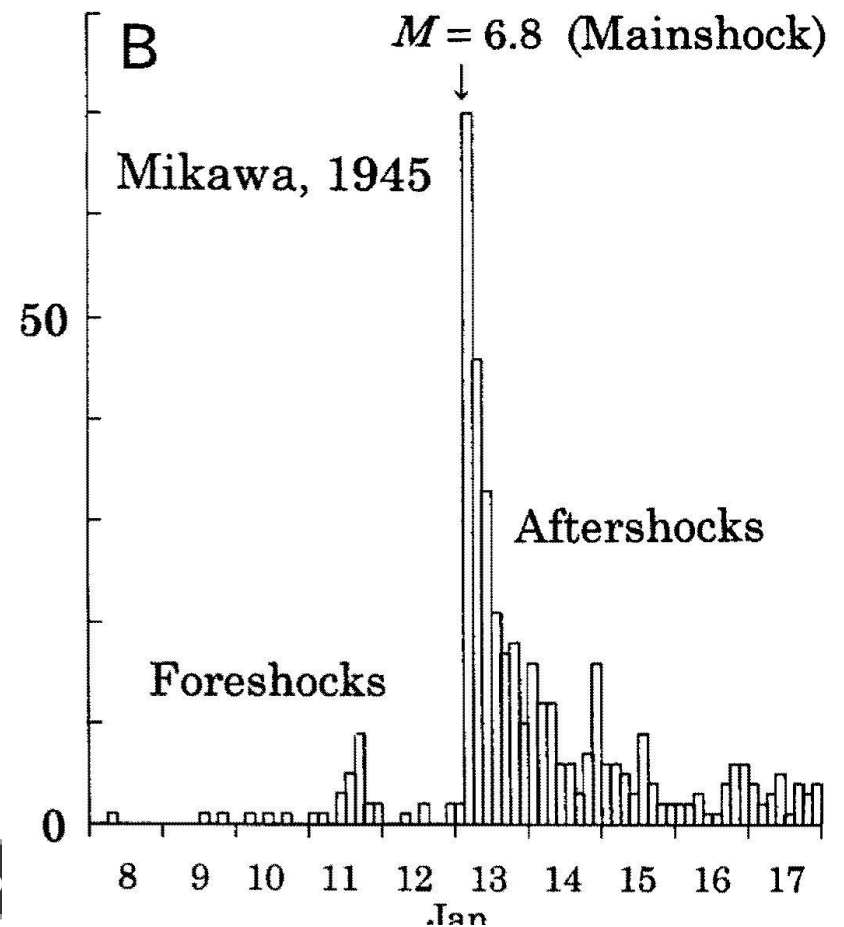
*Příklady časových sekvencí zemětřesení podle Utsu (2002) -*

*obr c) je seismický roj v užším slova smyslu*

Obvyklé jsou sekvence s **hlavním otřesem**, jehož magnitudo výrazně převyšuje magnitudo ostatních jevů, za kterým následují **dotřesy** a před kterým se mohou vyskytnout **předtřesy**.

*Příklady časových sekvencí zemětřesení podle Utsu (2002) -*

*obr c) je seismický roj v užším slova smyslu*



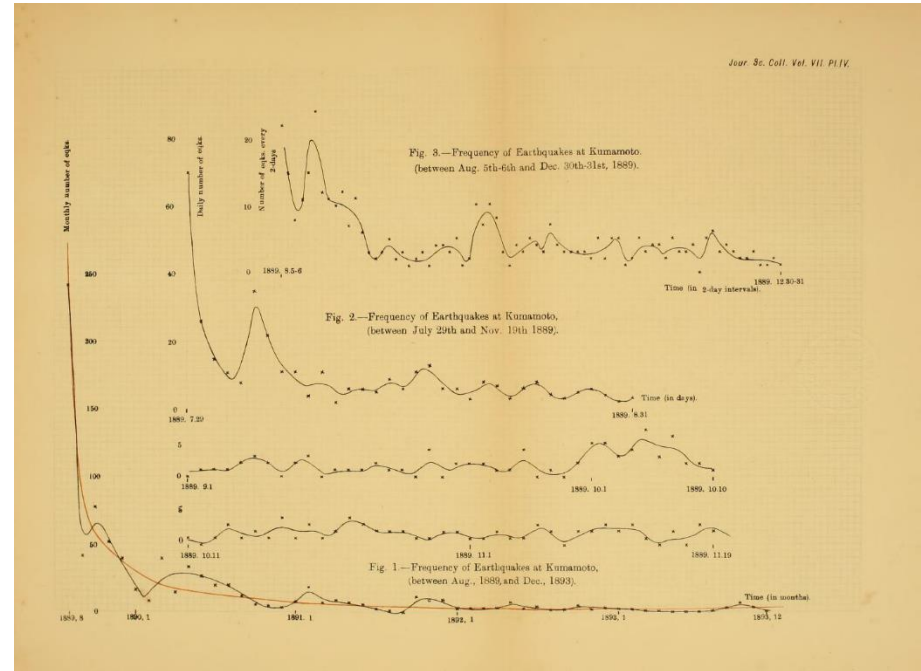
Omori při studiu dotřesů následujících po zemětřesení z roku 1891 (M = 8) v regionu Nobi (střední Japonsko) zjistil, že počet dotřesů klesá s časem podle vztahu:

$$n(t) = \frac{K}{(t + c)}$$

$K$  a  $c$  jsou konstanty,  $t$  je čas



**Fusakichi Omori**  
(1868-1923)



Omori si všiml při studiu dotřesů po zemětřesení v Nobi (1891,  $M=8.0$ ), že je tu závislost mezi časem od hlavního otřesu a počtem dotřesů:

$$n(t) = \frac{K}{(t + c)}$$

kde  $n(t)$  je počet dotřesů v daném čase  $t$ ,  $K$  a  $c$  jsou konstanty popisující charakter seismicity v daném místě.

Pro kumulativní počet dotřesů  $N(t)$  pak platí:

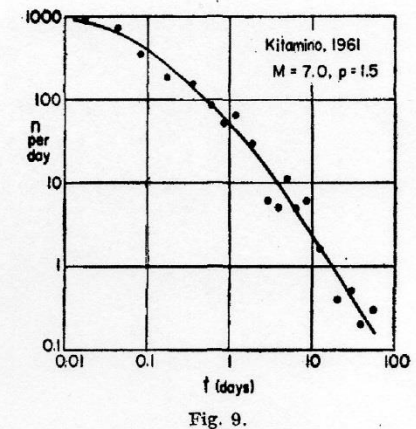
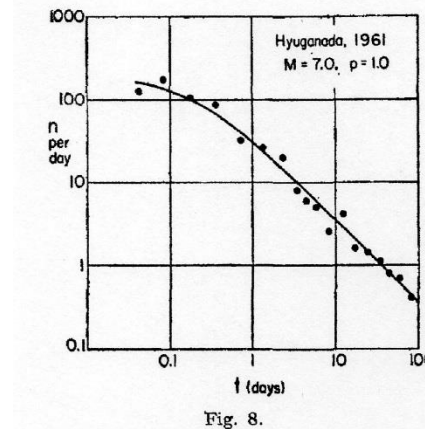
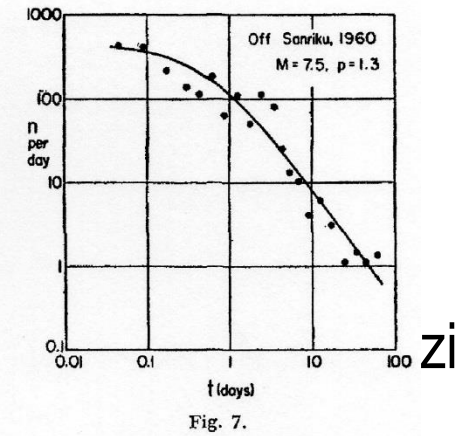
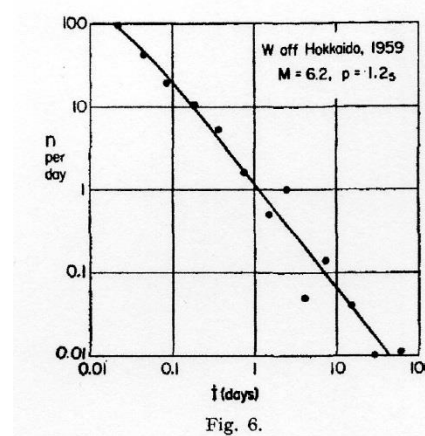
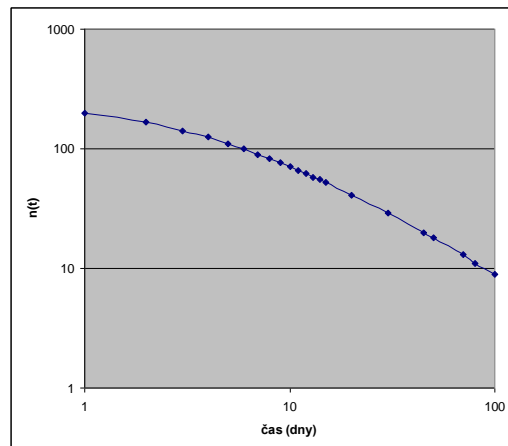
$$N(t) = \int_0^t n(s) ds = K \ln \left( \frac{t}{c} + 1 \right)$$

je tu tedy lineární vztah mezi kumulativním počtem a logaritmem času  $t$

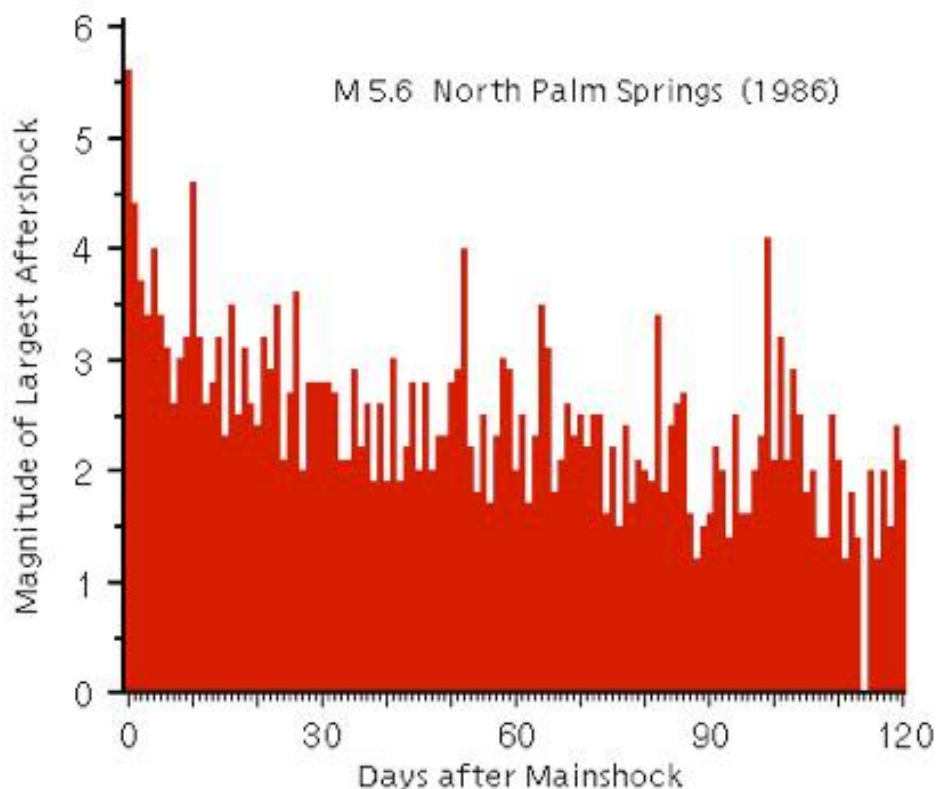
Později (Utsu 1961) bylo empiricky doloženo, že tento vztah je obecně platný pro různé sekvence dotřesů ve formě (tzv. **Omoriho vztah**):

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

kde parametr  $p$  varíruje hodnotami 1.0 a 1.5

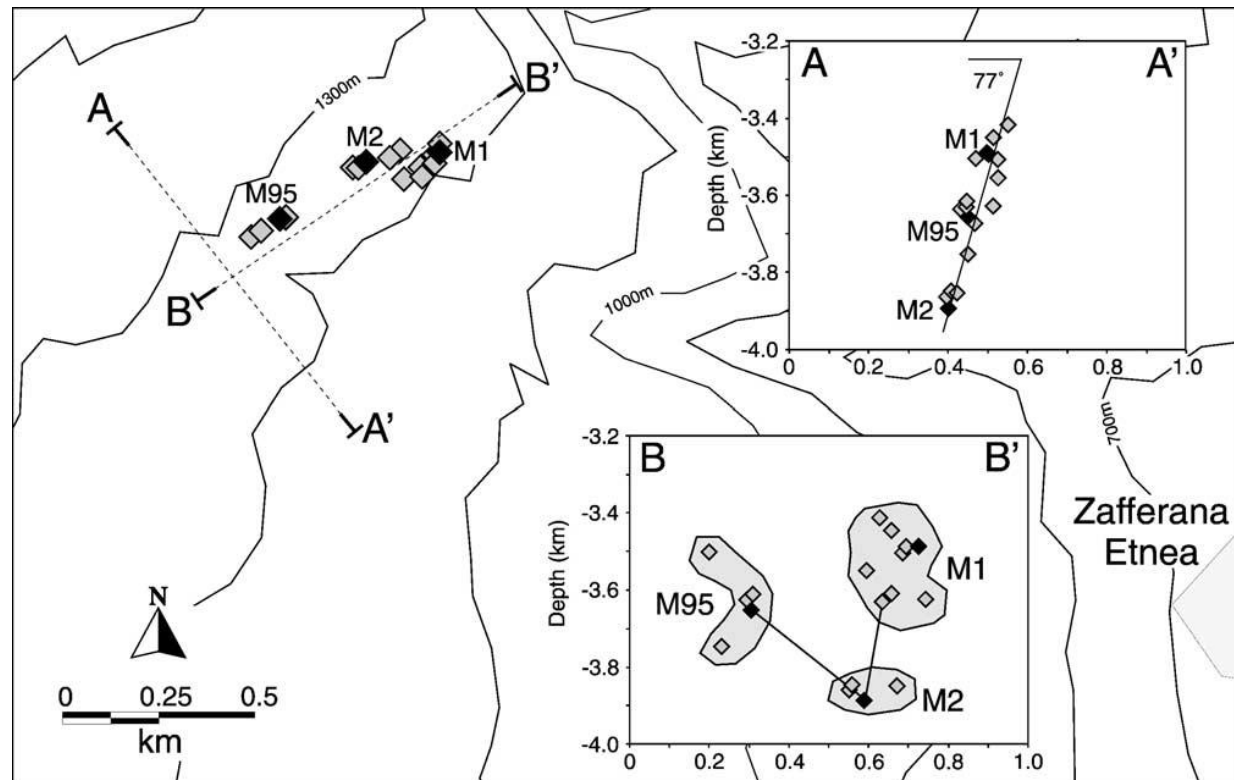


Bath (1965) ukázal, že rozdíl mezi magnitudem hlavního otřesu a největšího následujícího dotřesu je přibližně konstantní a pohybuje se kolem hodnoty 1.2 (tzv. **Bathovo pravidlo**)





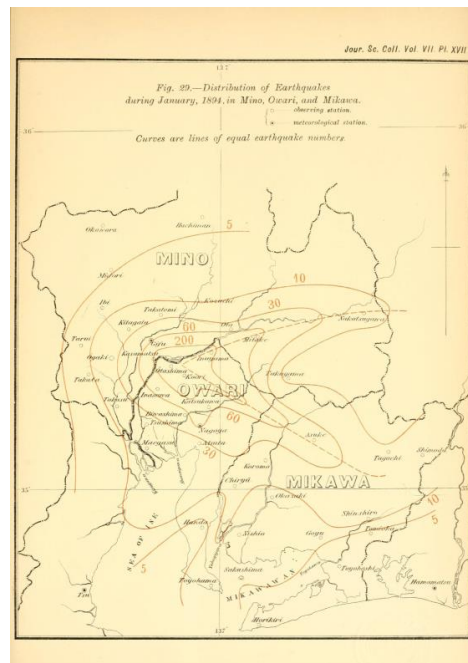
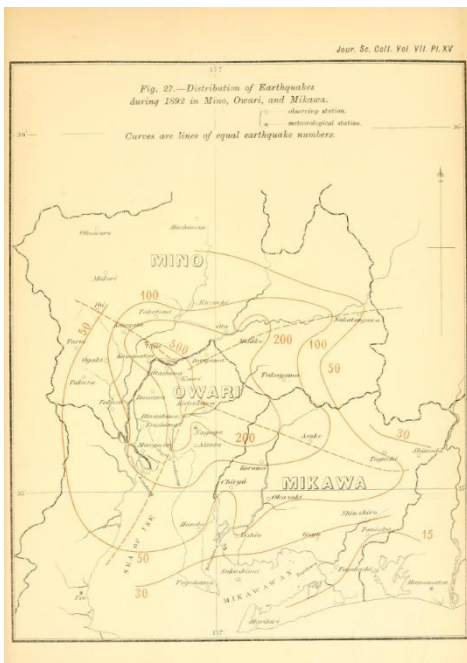
Prostorová distribuce hypocenter může ukazovat geometrii seismicky aktivní zóny (zlomu).



*Distribuce hypocenter a geometrie křehké poruchy - příklad z regionu Etny (Alparone, Gambino 2003).*

## Příklad prostorové distribuce epicenter v epicentrální oblasti Mino-Owari (střední Japonsko):

Omori v práci z r. 1895 statisticky vyhodnotil otřesy, které následovaly po silném zemětřesení v oblasti Mino-Owari (28. 9. 1891,  $M_s=8.0$ ). Předpokládá se, že hlavní otřes souvisel s pohybem na zlomu Neodani orientovaném ve směru SZ-JV.



## 8.3: Seismické ohrožení

Při současném stavu poznání je predikce jednotlivého seismického jevu obtížná a často nespolehlivá. Je ale možné určit alespoň charakteristiku makroseismických projevů, které lze očekávat se stanovenou pravděpodobností v daném místě.

Cílem studia seismického ohrožení je stanovit mezní charakteristiky účinků zemětřesení v daném místě.

Lze rozlišit základní principy:

- deterministický (DSHA)
- neodeterministický (NDSHA)
- pravděpodobnostní (PSHA)

# Deterministický princip určení seismického ohrožení:

Je založen na vyhodnocení vlivu tzv. určujícího zemětřesení:

1. Určení zdrojů seismického ohrožení
2. Výběr určujícího zemětřesení
3. Stanovení útlumových křivek
4. Určení seismického ohrožení na dané lokalitě

Výhodou deterministického přístupu je relativní jednoduchost výpočtů.

Nevýhody: Neobsahuje náhodné neurčitosti, nelze zohlednit četnost zemětřesení (a tedy ani časovou periodicitu apod.)

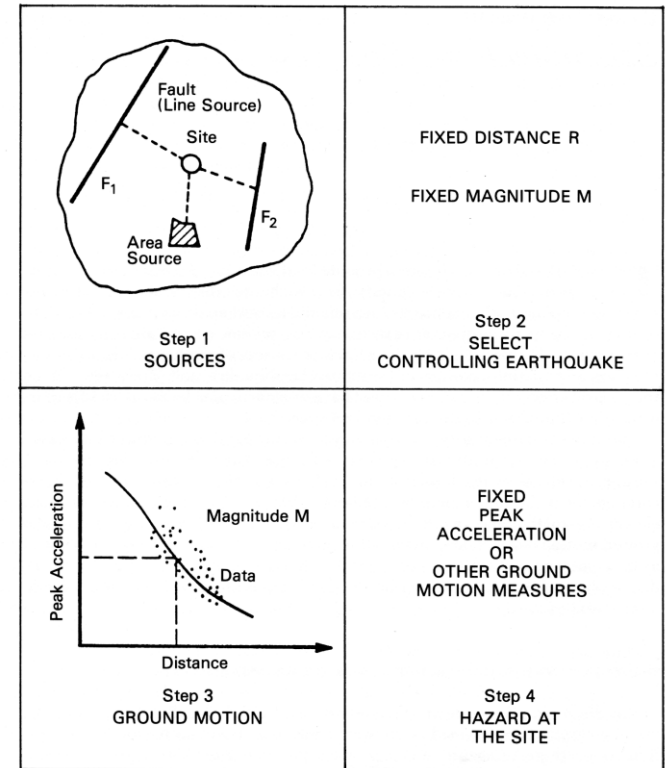
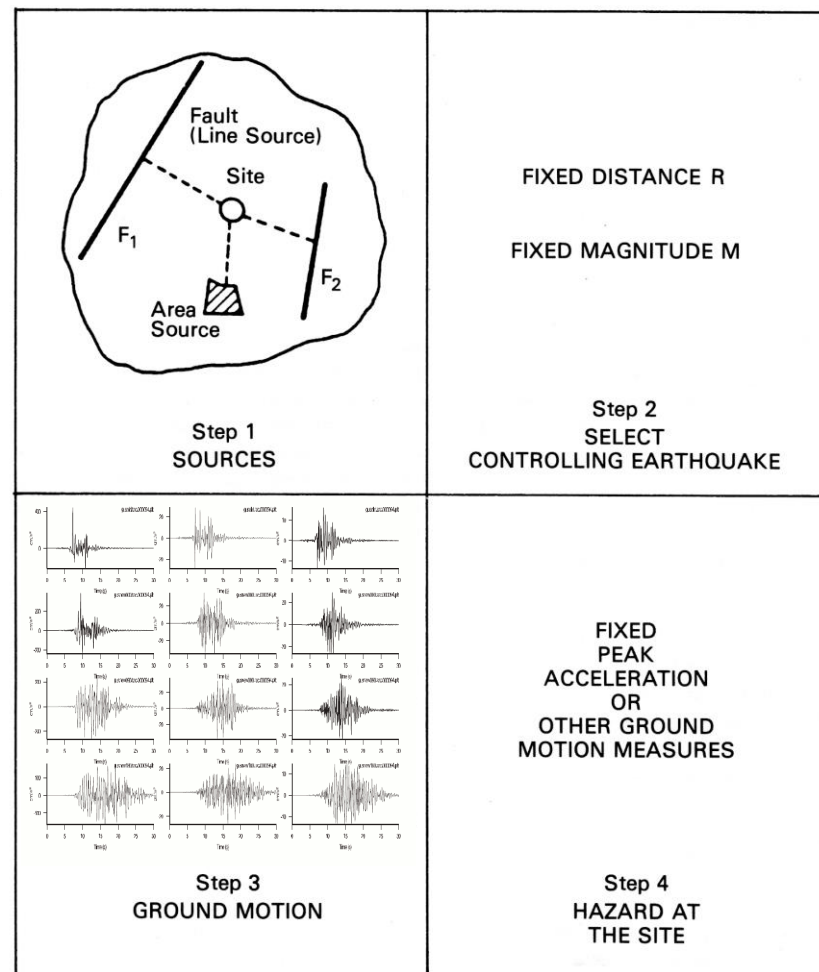


FIGURE 4.1 Basic steps of deterministic seismic hazard analysis (after TERA Corporation 1978).

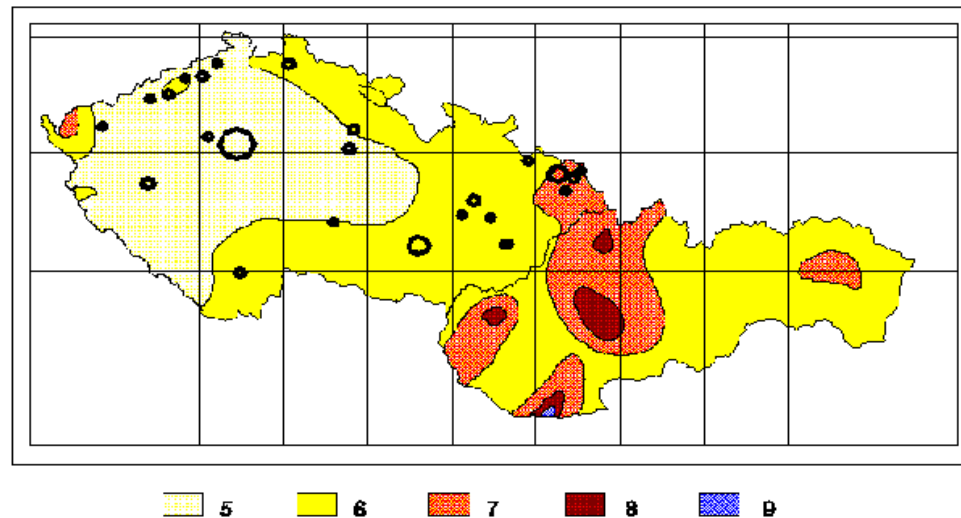
# Neodeterministický princip určení seismického ohrožení:

Je založen na vyhodnocení rozsáhlého souboru syntetických seismogramů (nepotřebujeme útlumové křivky).



# Pravděpodobnostní princip určení seismického ohrožení:

Jeho cílem je kvantifikace pravděpodobnosti, že během daného časového úseku bude překročena daná maximální hodnota zrychlení a sestavení mapy seismického ohrožení za účelem dlouhodobé předpovědi pravděpodobných maximálních seismických účinků.



*Mapa dlouhodobě očekávané seismické intenzity na území České a Slovenské republiky.*

K nejčastějším veličinám zobrazovaným v mapách seismického ohrožení jsou hodnoty **maximální seismické intenzity** nebo **maximálního zrychlení** pohybu půdy, které jsou v daném místě očekávány se **stanovenou pravděpodobností** během:

- a) stanoveného časového úseku (**exposure time** ... T)
- b) Stanovené doby opakování (**return period** ... RP)

Kde  $r = 1 - \text{NEP}$  je pravděpodobnost, s jakou dojde k události, tj. k překročení limitní hodnoty seismické intenzity nebo zrychlení (naopak NEP, non-exceedance probability, je pravděpodobnost, že událost nenastane)

$$\text{RP} = \frac{T}{r^*} \quad r^* \cong r(1 + 0.5r)$$



## Příklad určení RP

Sledujeme události, které nenastanou v průběhu 50 let s pravděpodobností 0.9:

$$r^* \cong r(1 + 0.5r) = 0.1(1 + 0.05) = 0.105$$

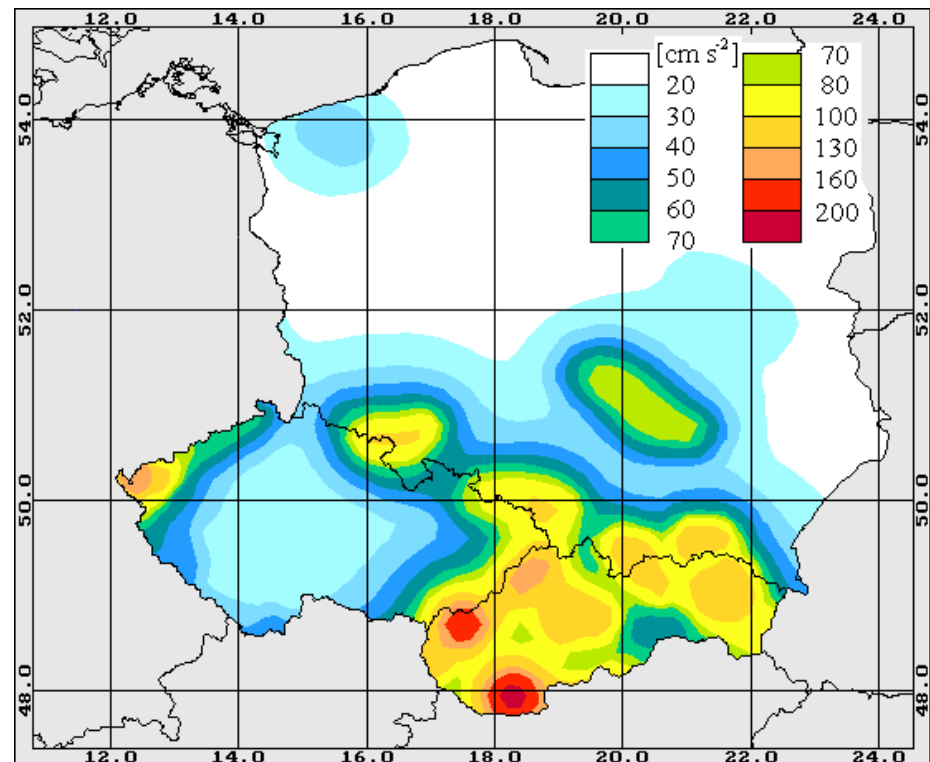
$$RP = \frac{T}{r^*} = \frac{50}{0.105} \cong 475 \textit{ let}$$

## Příklad

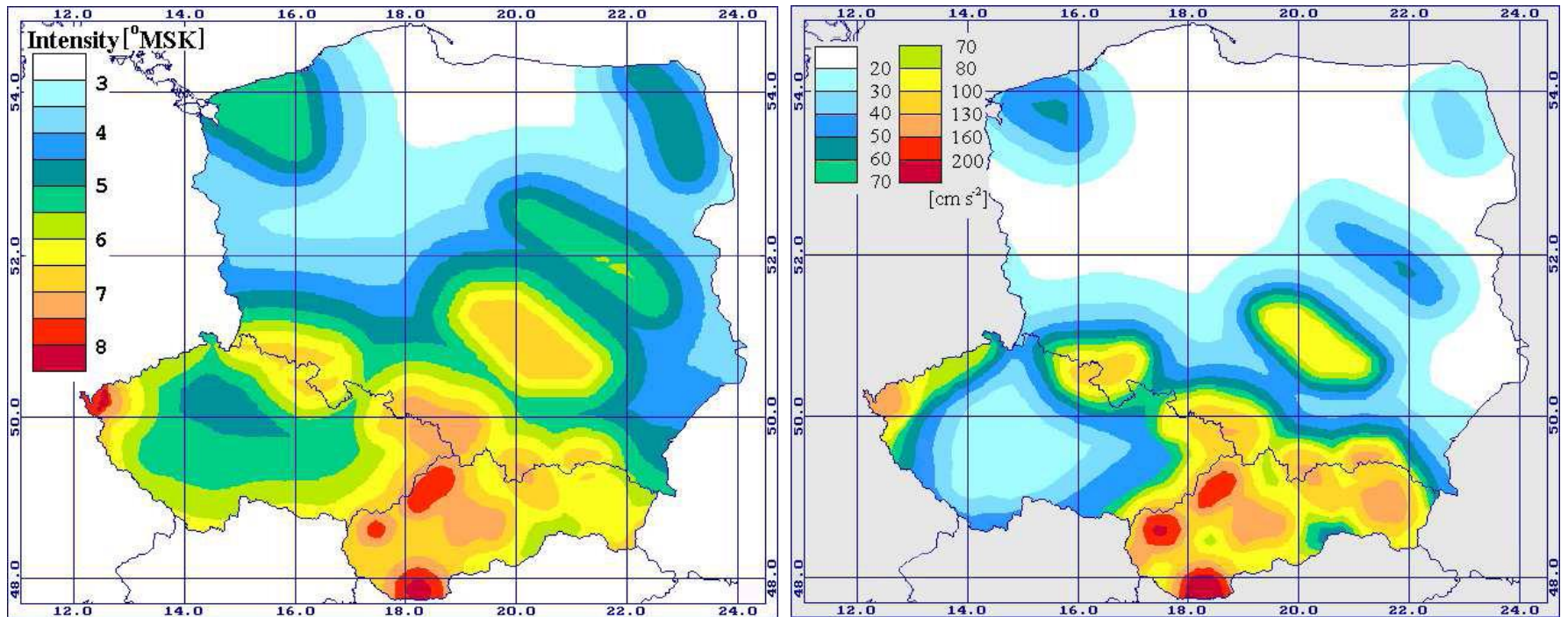
Sledujeme pak tedy prostorovou distribuci takových hodnot intenzity, maximálního zrychlení apod., které jsou v daném místě překročeny jednou za  $RP=475$  let!

$RP \cong 475 \text{ let}$

*Mapa maximálního očekávaného zrychlení na území ČR, Polska a Slovenska  $RP = 475$  let (Schenk et al. 2001).*

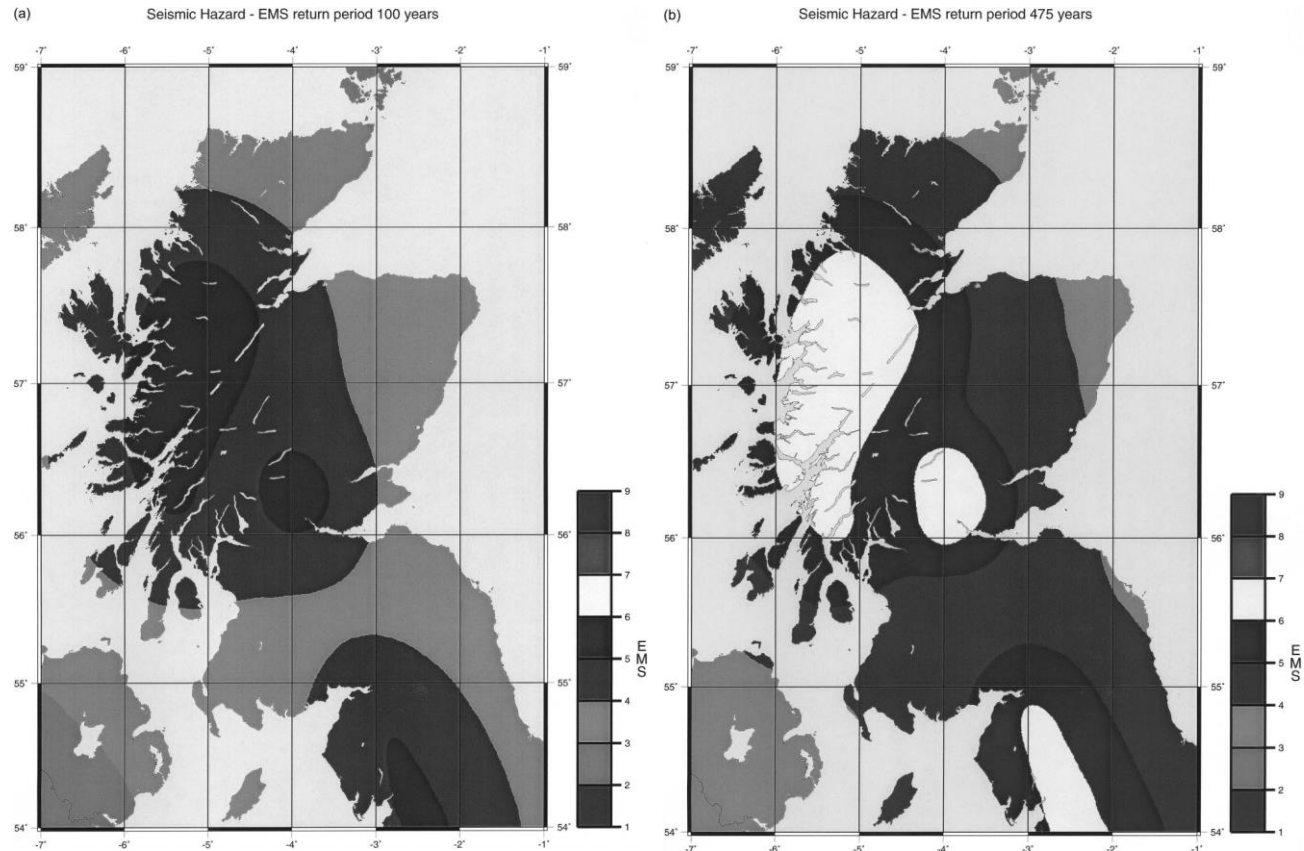


Mapy seismického ohrožení tak ukazují očekávané hodnoty např. seismické intenzity nebo maximálního zrychlení pro danou pravděpodobnost a daný časový úsek  $T$ , respektive pro danou hodnotu  $RP$ .



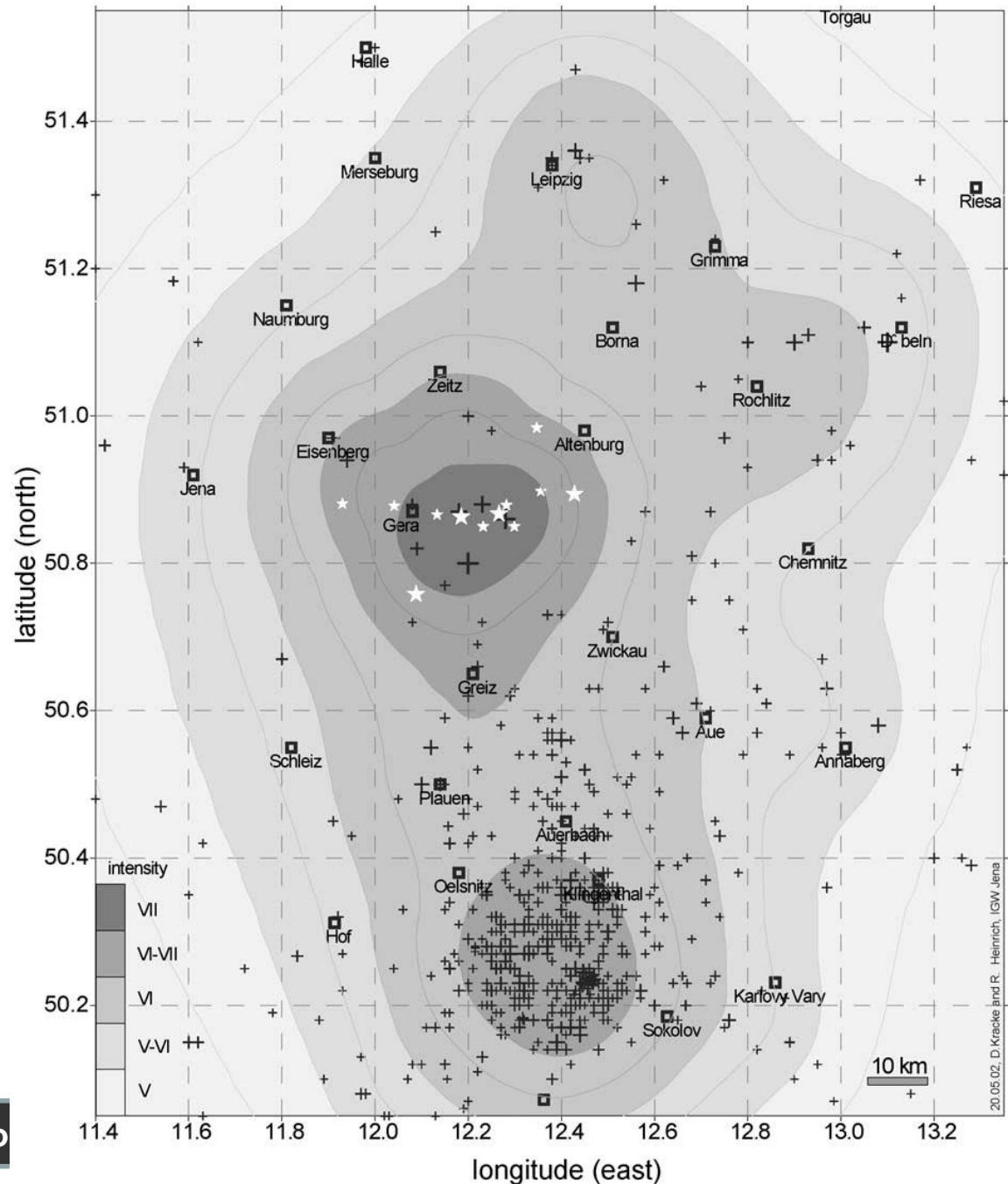
*Mapy očekávaných hodnot seismické intenzity (vlevo) a maximálního zrychlení (vpravo) na území ČR, Polska a Slovenska pro  $RP = 1000$  let (Schenk et al. 2001).*

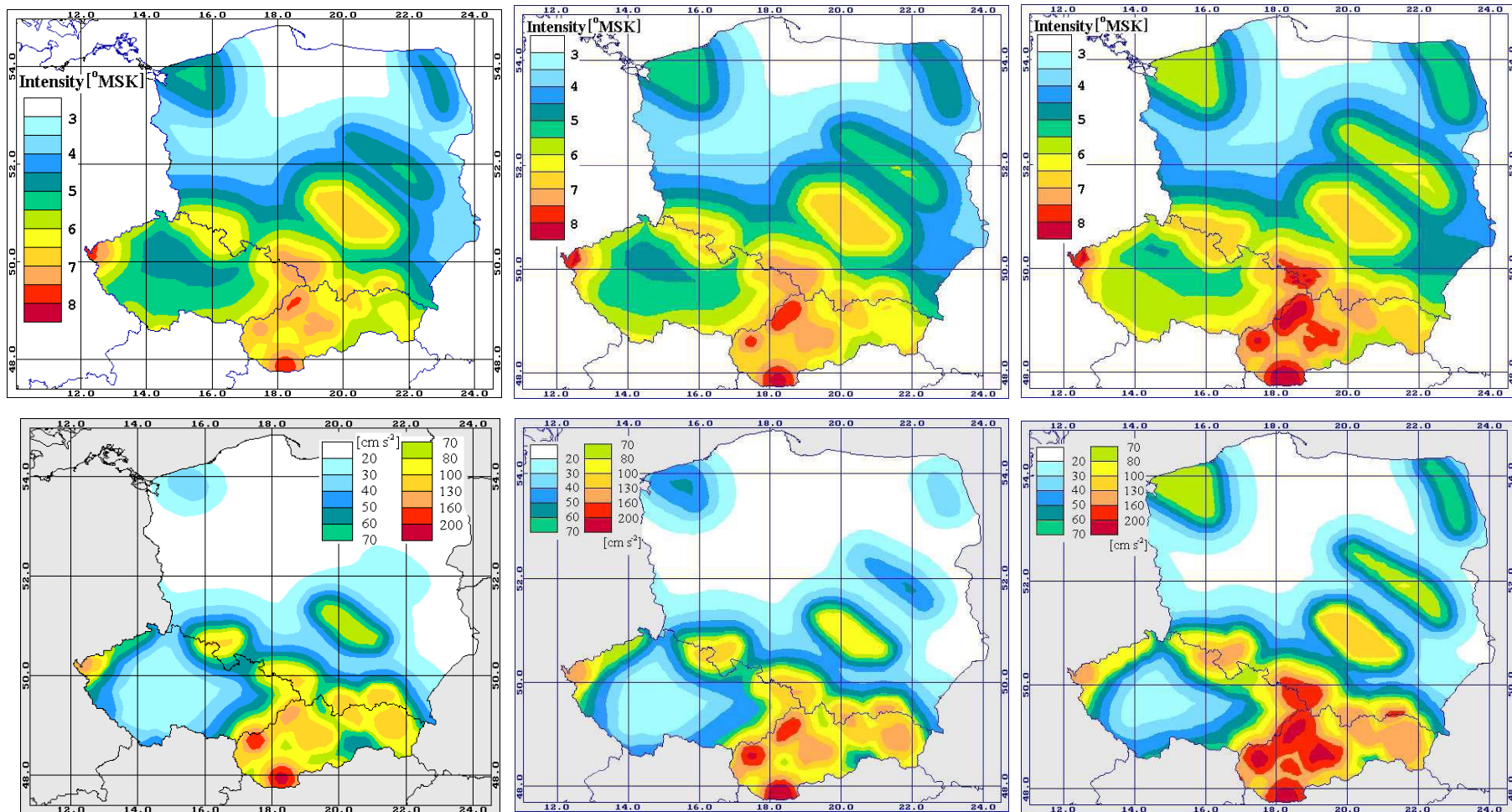
Charakter isolínií mapy seismického ohrožení závisí na zvoleném časovém úseku  $T$ , respektive na dané hodnotě  $RP$ .



*Mapy očekávaných hodnot seismické intenzity na území Skotska pro časový úsek  $RP$  100 let (vlevo) a 475 let (vpravo) (Musson, Henni 2001).*

*Mapa očekávaných hodnot seismické intenzity na území východního Saska (Německo) pro časový úsek 50 let a pravděpodobnost 10% (Kracke, Heinrich 2004).*

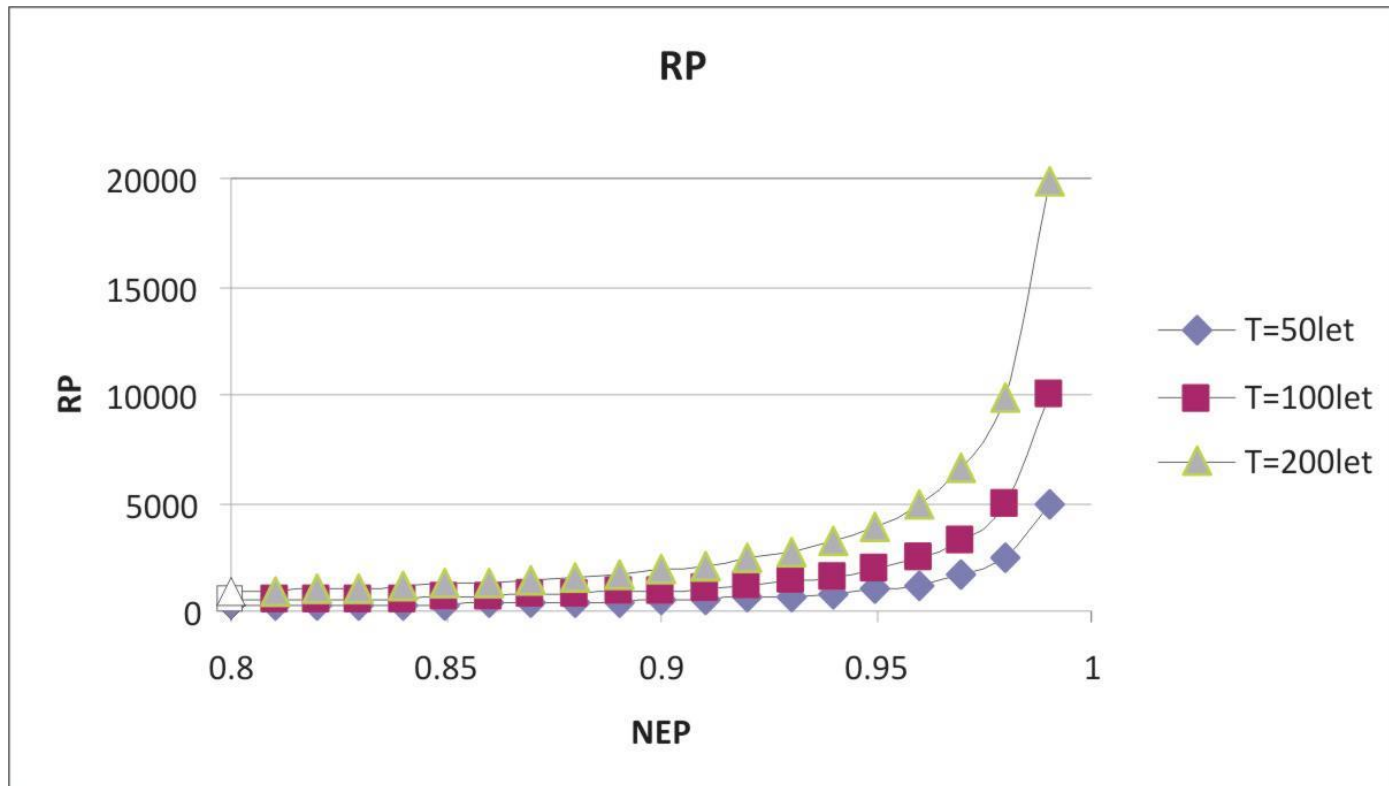




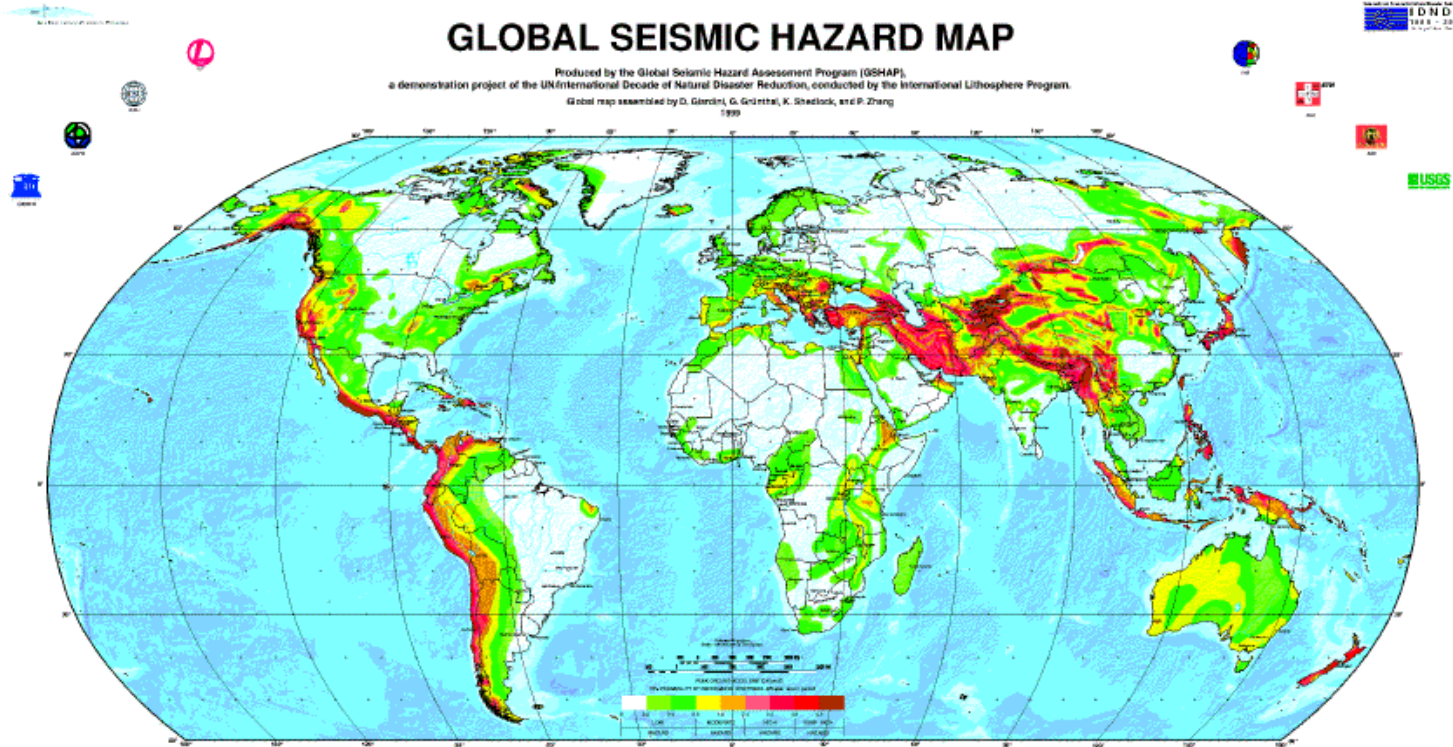
*Mapy očekávaných hodnot seismické intenzity (nahore) a maximálního zrychlení (dole) na území ČR, Polska a Slovenska pro RP = 475 let (vlevo), 1000 let (uprostřed) a 5000 let (vpravo) (Schenk et al. 2001).*

Změna sledované pravděpodobnosti (nebo délky sledovaného časového úseku  $T$ ), vede ke změně hodnoty RP.

Pro velké pravděpodobnosti NEP nabývá RP (return period) velmi vysokých hodnot.



# Globální seismické ohrožení - projekt GSHAP (The Global Seismic Hazard Assessment Program - od 1992 do 1999)



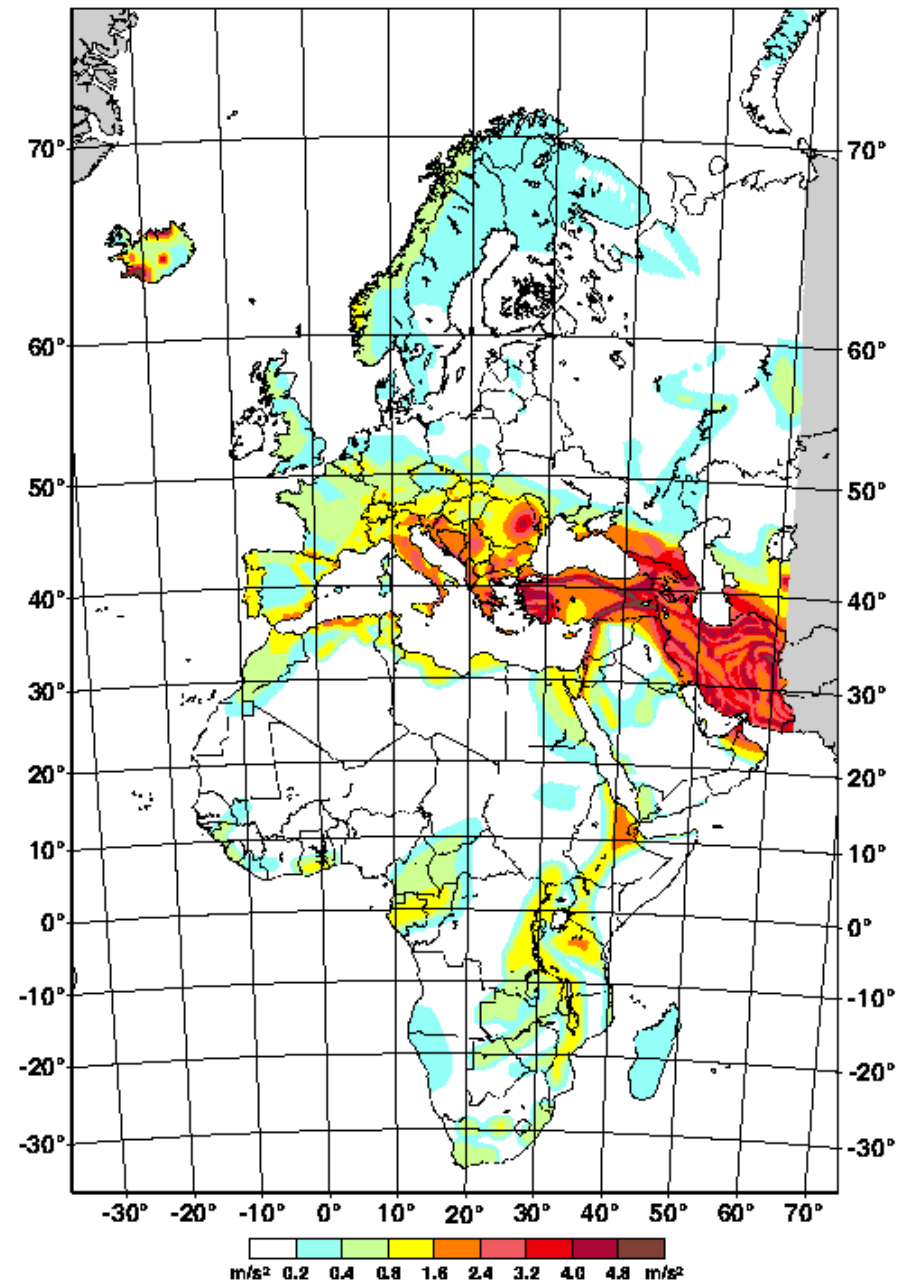
Return period = 475 let

(10% pravděpodobnost nepřekročení hodnot během 50 let)



# Seismické ohrožení v Evropě a v Africe

Return period = 475 let  
(10% pravděpodobnost nepřekročení hodnot během 50 let)



## Pro studium seismického ohrožení potřebujeme:

- vymežit zdrojové zóny
- charakterizovat seismicitu vymezených zón (magnitudo-četnostní vztahy, maximální očekávané magnitudo)
- určit pravděpodobnosti a prostorovou distribuci zemětřesení ve vymezených zónách
- charakterizovat typická spektra zemětřesení ve vymezených zónách
- charakterizovat vztah mezi maximálním zrychlením a epicentrální vzdáleností pro zemětřesení ve vymezených zónách

## - vymežit zdrojové zóny

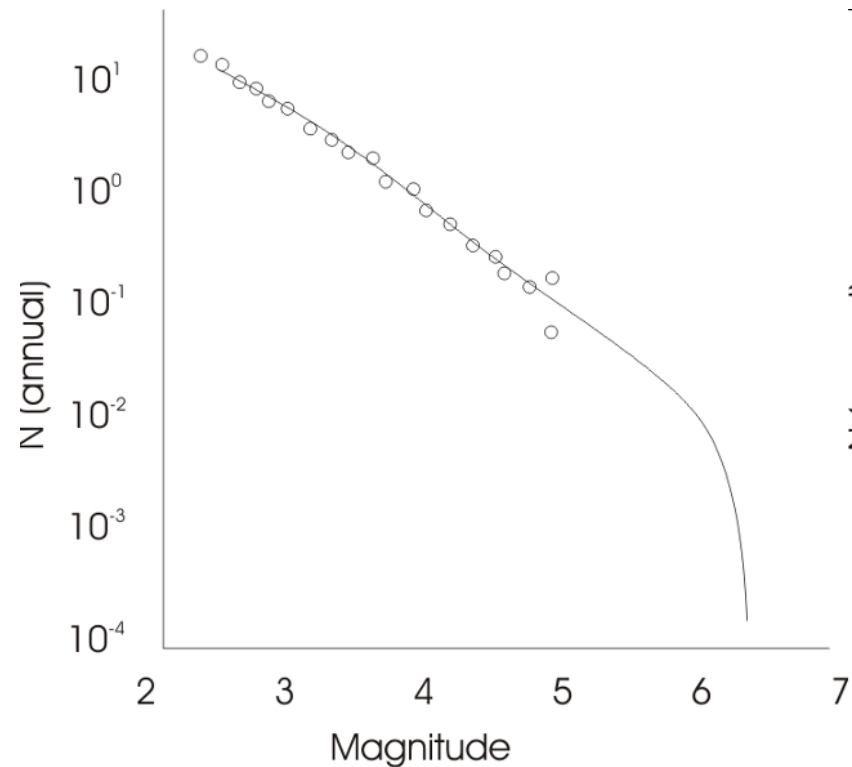
tj. určit všechny možné plošné či lineární zdroje seismické aktivity, které mohou ovlivnit sledované místo



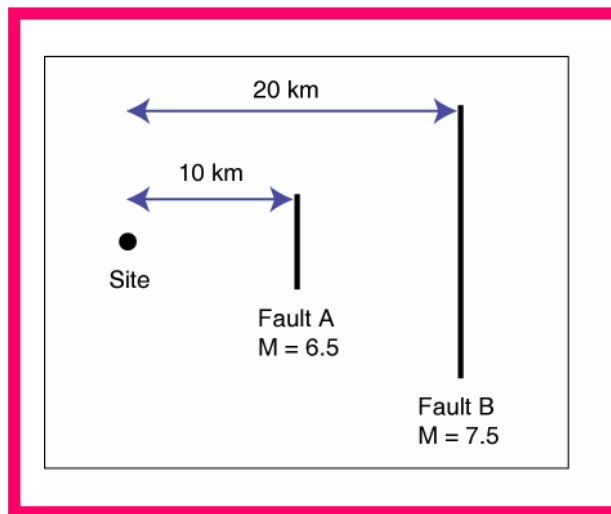
**Aktivní seismické zóny (vlevo) a zdrojový seismický model (vpravo) pro určení seismického ohrožení v regionu Itálie (Meletti et al. 2008).**

## - charakterizovat seismicitu vymezených zón

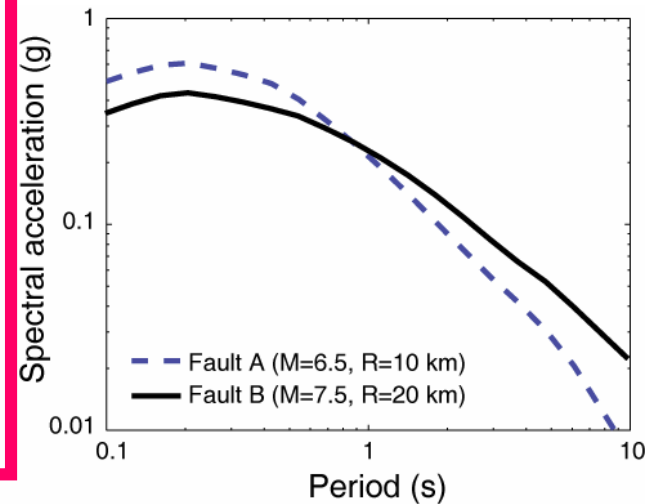
tj. sestavit magnitudo-četnostní vztahy, určit maximální očekávané magnitudo apod.



- určit pravděpodobnosti a prostorovou distribuci zemětřesení ve vymezených zónách

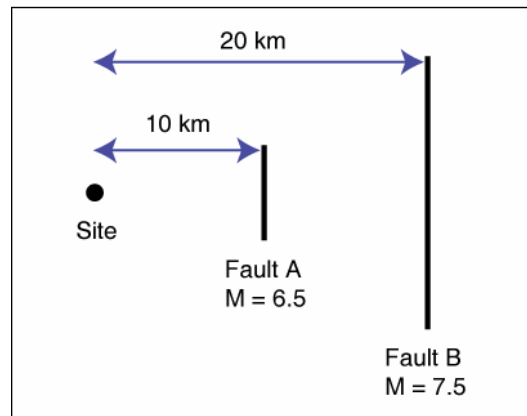


(a)

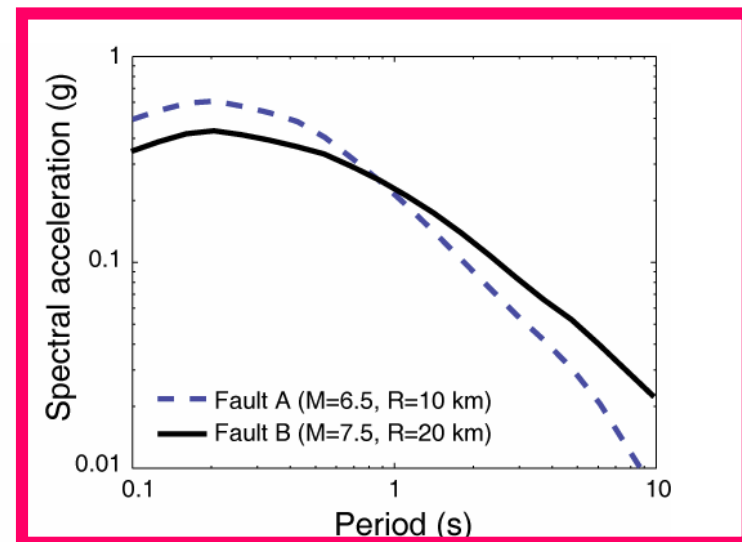


(b)

- charakterizovat typická spektra zemětřesení ve vymezených zónách

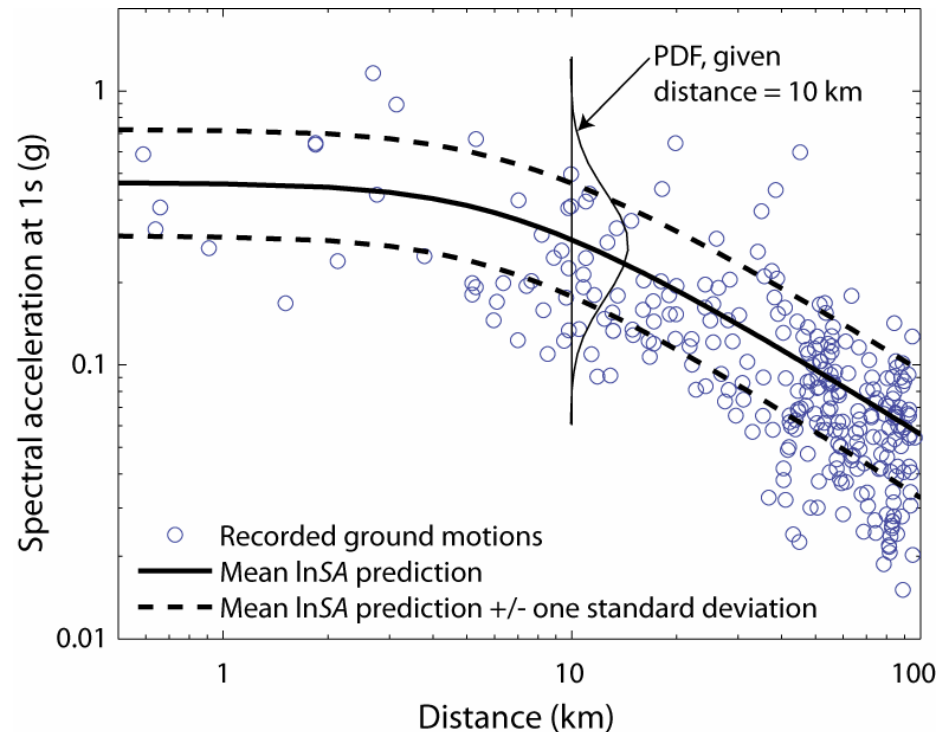


(a)



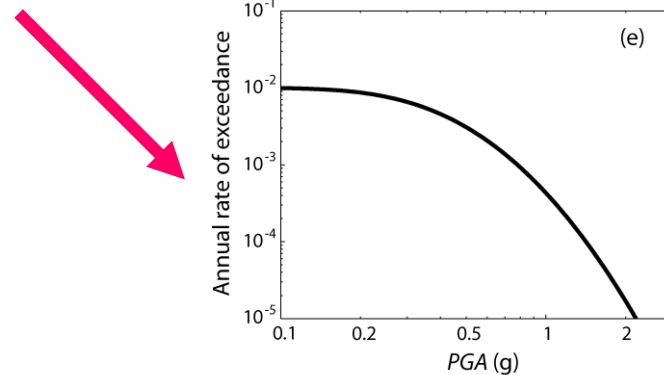
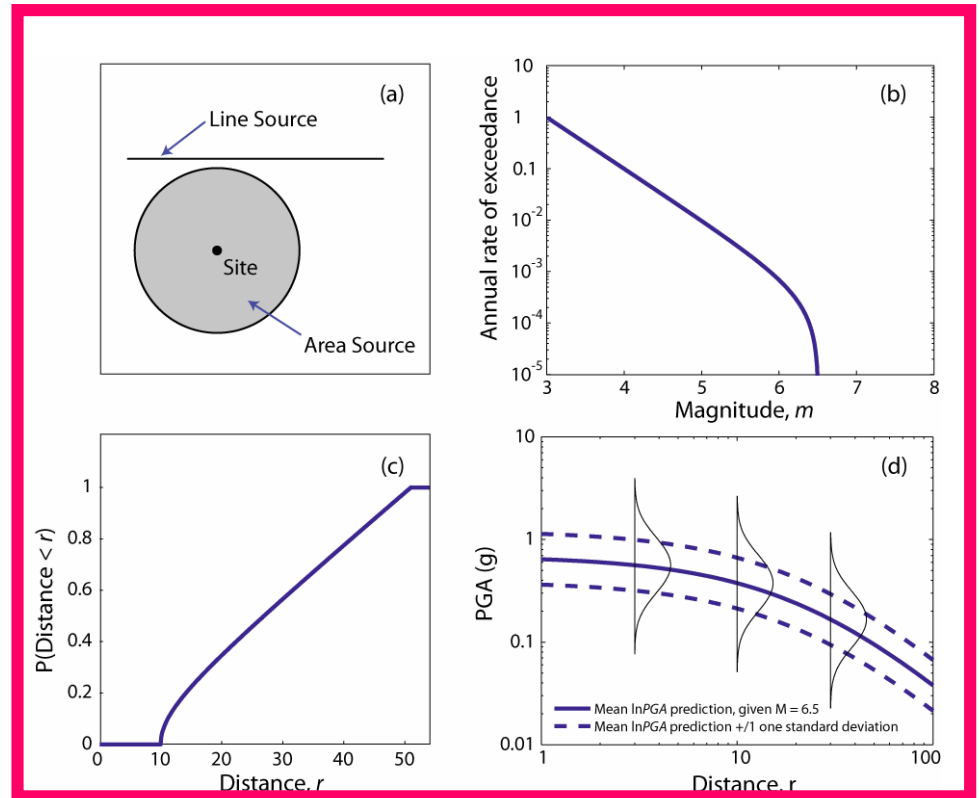
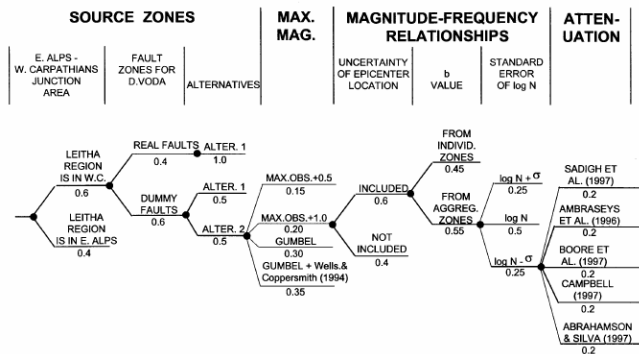
(b)

- charakterizovat vztah mezi maximálním zrychlením a epicentrální vzdáleností pro zemětřesení ve vymezených zónách



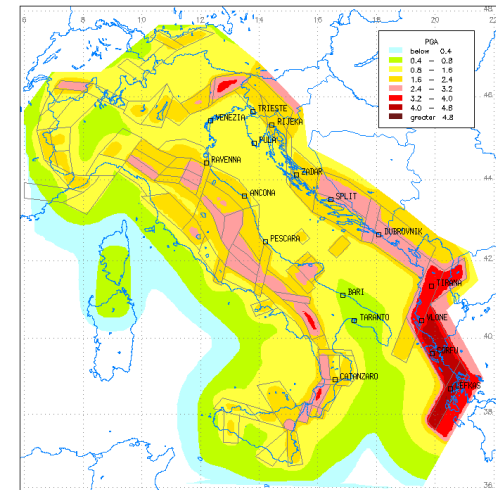
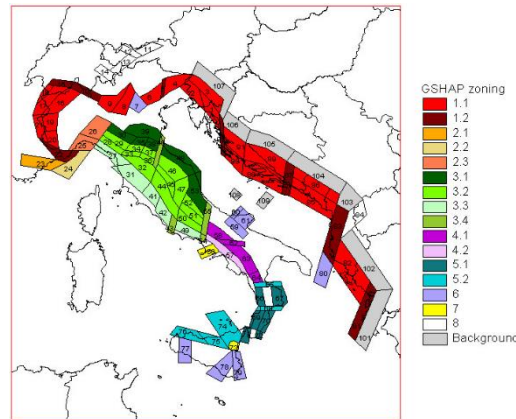
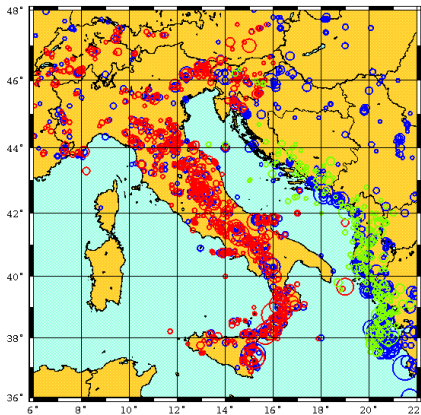
Po zohlednění všech potřebných vlivů je možné kvantifikovat velikost seismického účinku (např. maximálního zrychlení) pro danou dobu RP.

Různé modely charakterizující parametry stanovené v jednotlivých krocích jsou zohledněny pomocí logických stromů.





# Studium seismického ohrožení v regionu Jaderského moře - testovací region projektu GSHAP



distribuce seismických jevů

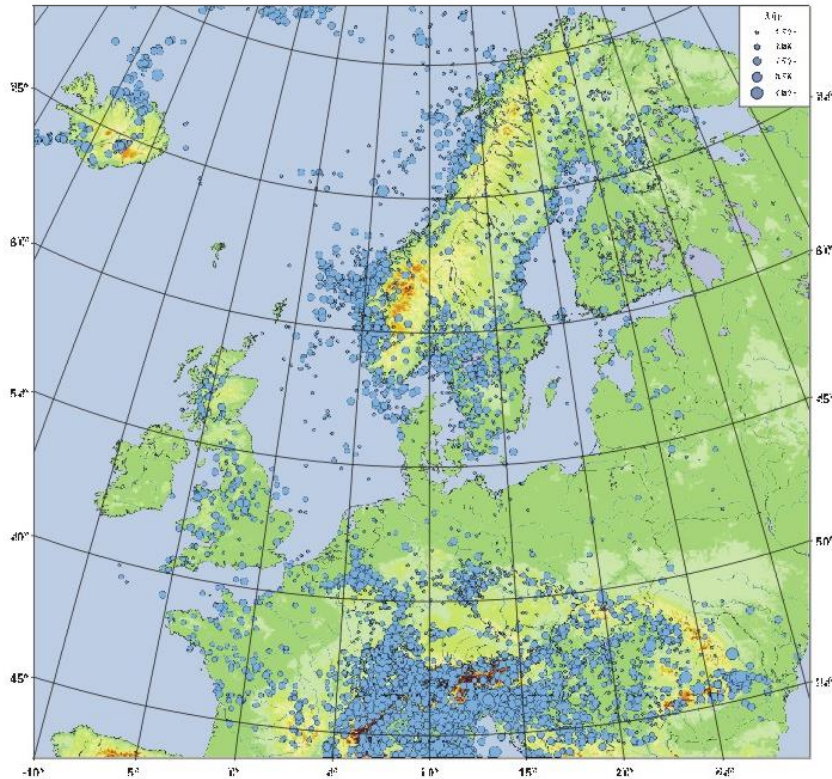


vymezení zdrojových zón



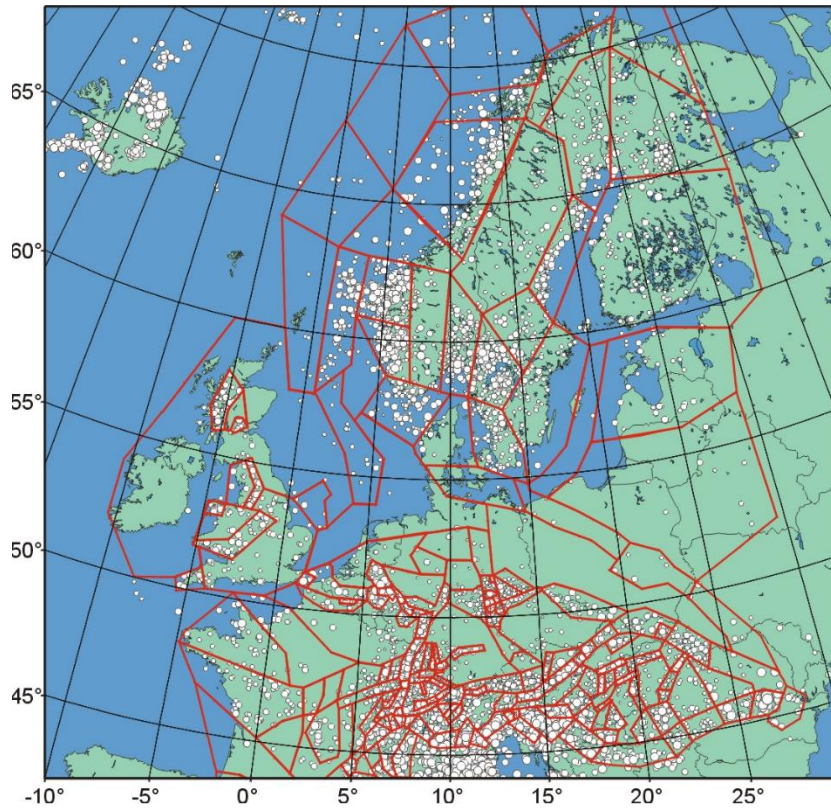
mapa seismického ohrožení

# Střední a severní Evropa (projekt GSHAP)



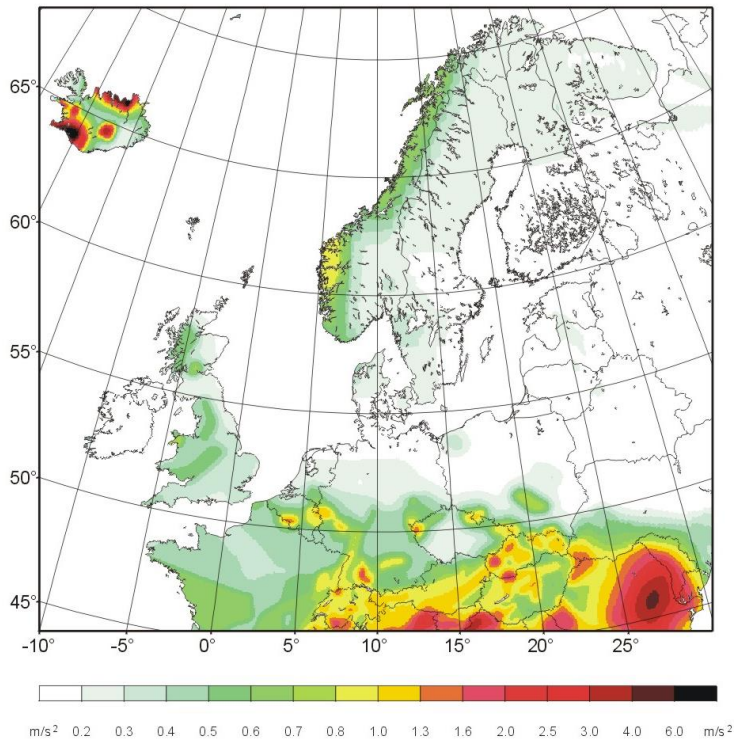
## distribuce seismických jevů

# Střední a severní Evropa (projekt GSHAP)



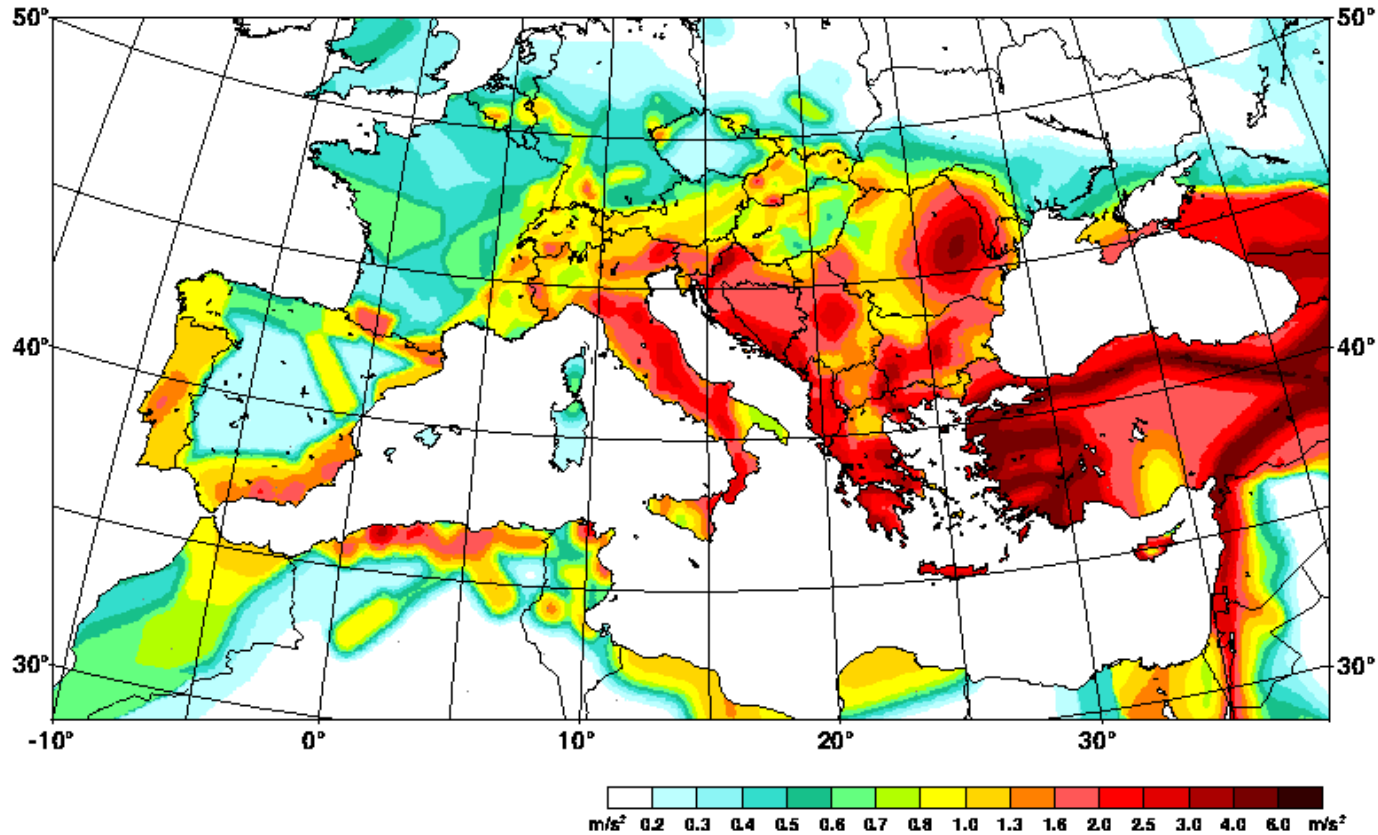
**vymezení zdrojových zón**

# Střední a severní Evropa (projekt GSHAP)



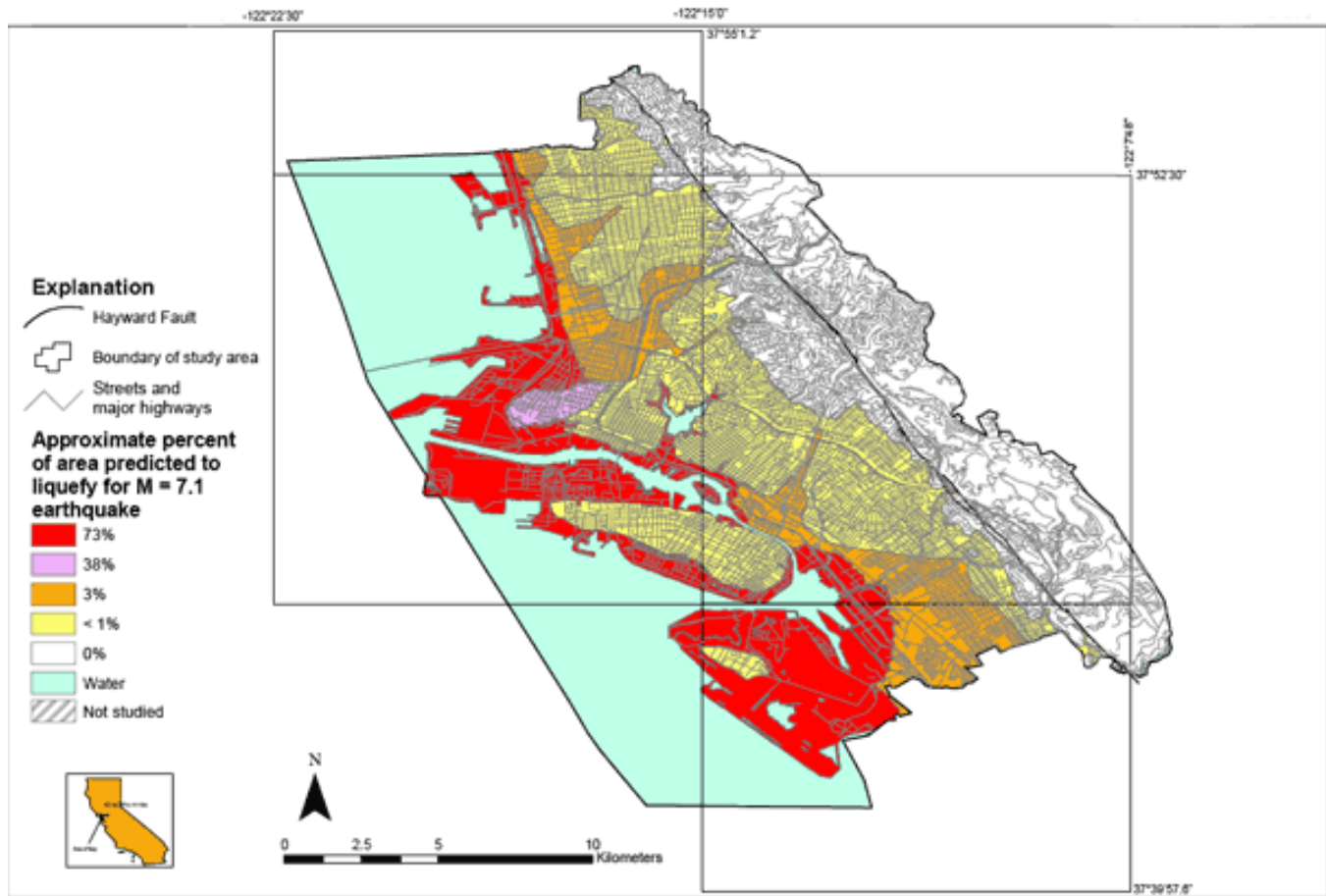
**mapa seismického ohrožení (RP = 475 let)**

## Jižní Evropa a Středoziemní moře (projekt SESAME)

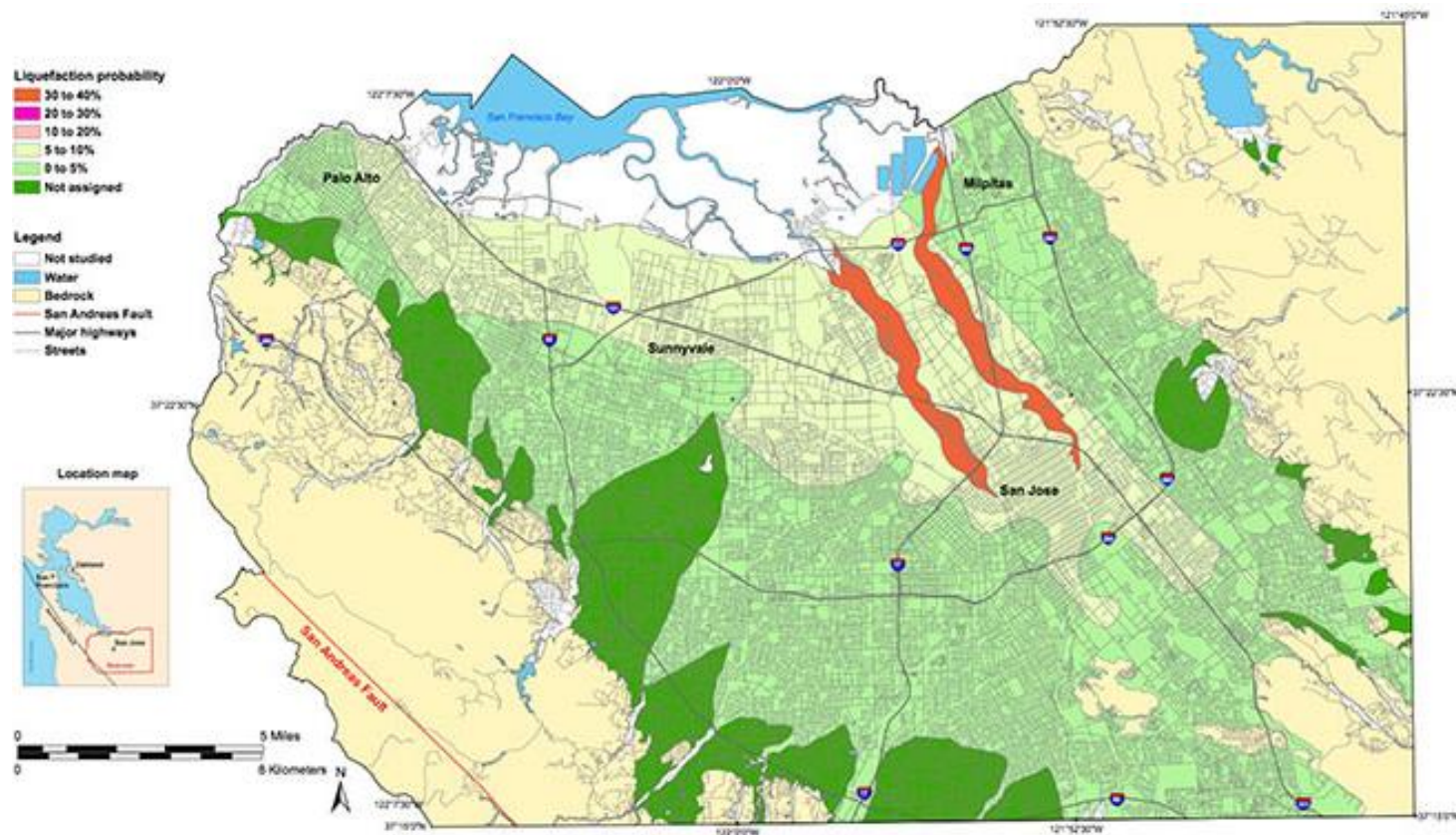


mapa seismického ohrožení (RP = 475 let)

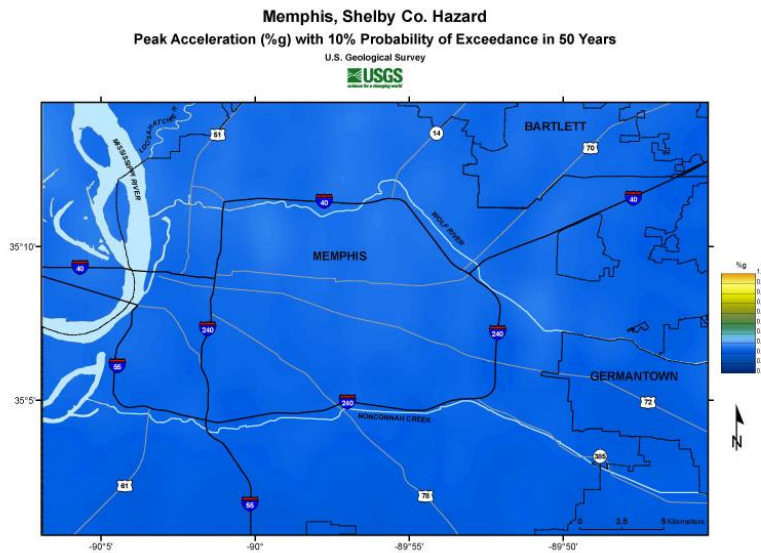
Mohou být sledována i další rizika (vedle rizika překročení maximálního zrychlení). Např. riziko zkapalnění:



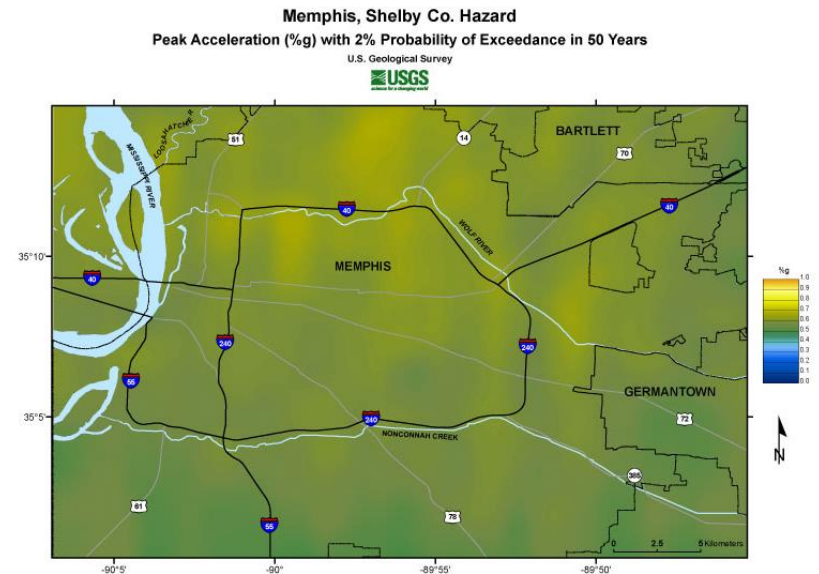
# Mapa rizika zkapalnění v regionu Northern Santa Clara Valley (USGS):



Mohou být tvořeny mapy pro různá RP - např. pro různé pravděpodobnosti NEP při stejném časovém úseku T:



**NEP = 90%**



**NEP = 98%**



## 8.4: Seismická rizika

## 8.4.b: Seismická rizika

## Seismické riziko:

Vyjadřuje pravděpodobnost, že daná seismická událost způsobí předem definované škody.

Nejde tedy jen o velikost seismické události a pravděpodobnost jejího výskytu (tj. o seismické ohrožení), ale je sledována a testována také např. odolnost staveb. Cílem je navrhnout řešení (např. konstrukční prvky staveb), které by při dané úrovni seismického ohrožení vedly ke snížení seismického rizika.



Můžeme rozlišit různé účinky (následky) zemětřesení a tím i různá rizika:

**primární**

přímo spojené s otřesem půdy

**sekundární**

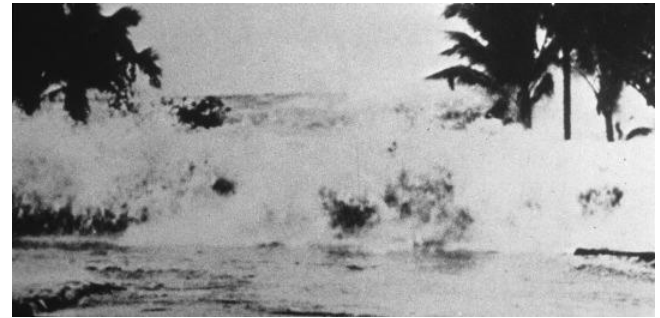
doprovodné jevy

**na zlomu**

přímo na struktuře, jejíž pohyb generoval zemětřesení

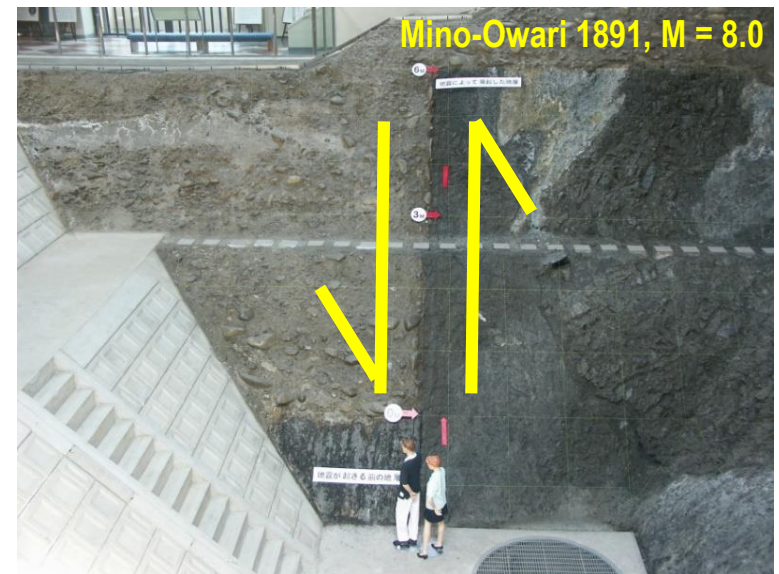
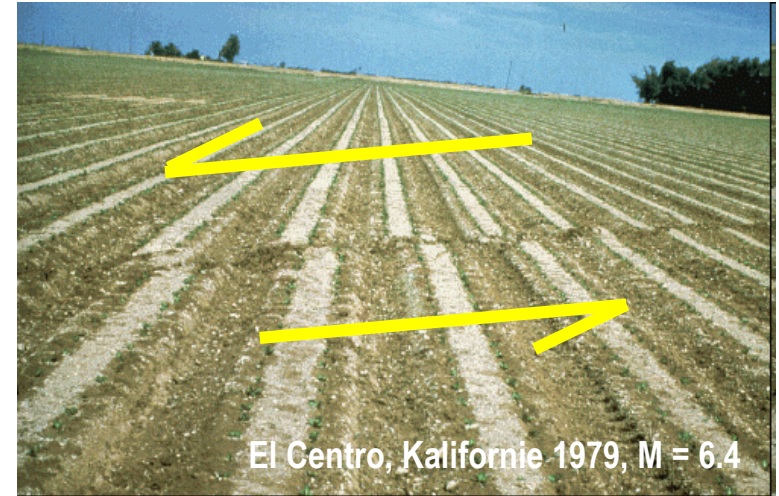
**mimo zlom**

mimo strukturu, jejíž pohyb generoval zemětřesení



# Primární účinky na zlomu

- posunutí na zlomech
- vznik zlomových svahů
- vznik trhlin



 Tensile stress       Dextral strike-slip

# Primární účinky mimo zlom

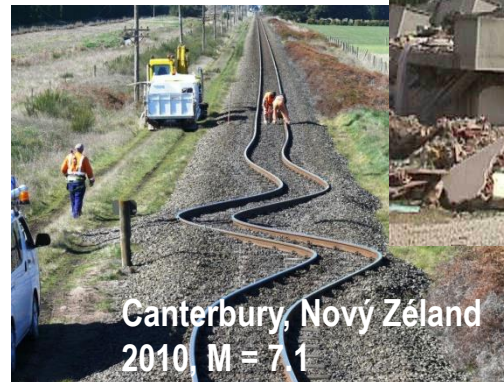
- pád neupevněných (či uvolněných) předmětů
- destrukce staveb
- zkapalnění sedimentu



Honšū 1978, M = 6.7



Niigata 1964, M = 7.6



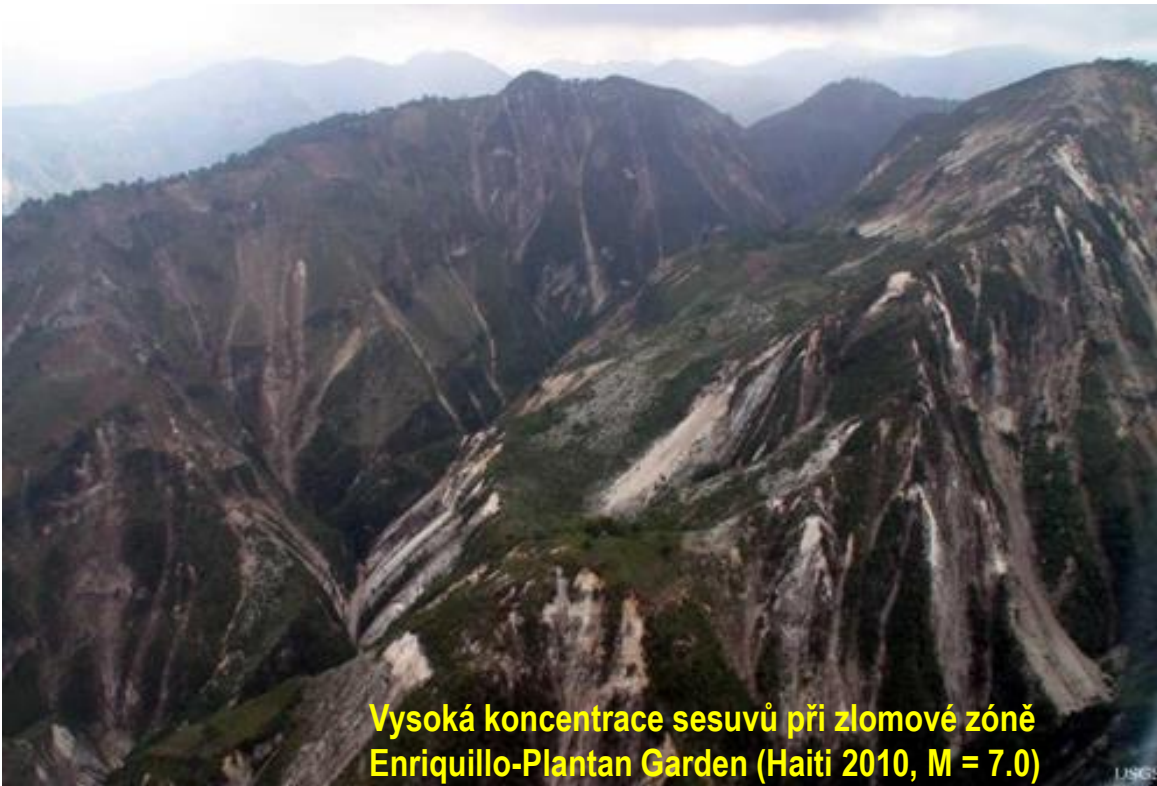
Canterbury, Nový Zéland  
2010, M = 7.1



Izmit 1999, M = 7.6

## Sekundární účinky na zlomu

- sesuvy na zlomových svazích



Vysoká koncentrace sesuvů při zlomové zóně  
Enriquillo-Plantain Garden (Haiti 2010, M = 7.0)

## Sekundární účinky mimo zlom

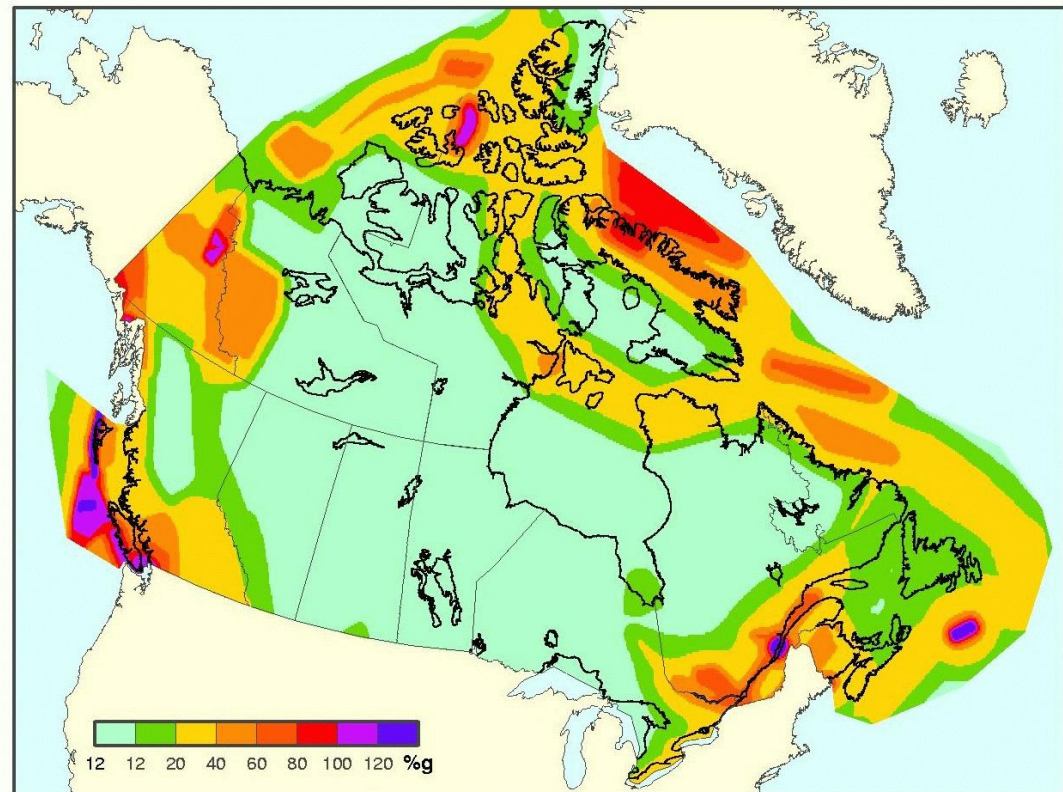
- sesuvy mimo zlomové svahy
- tsunami
- požáry





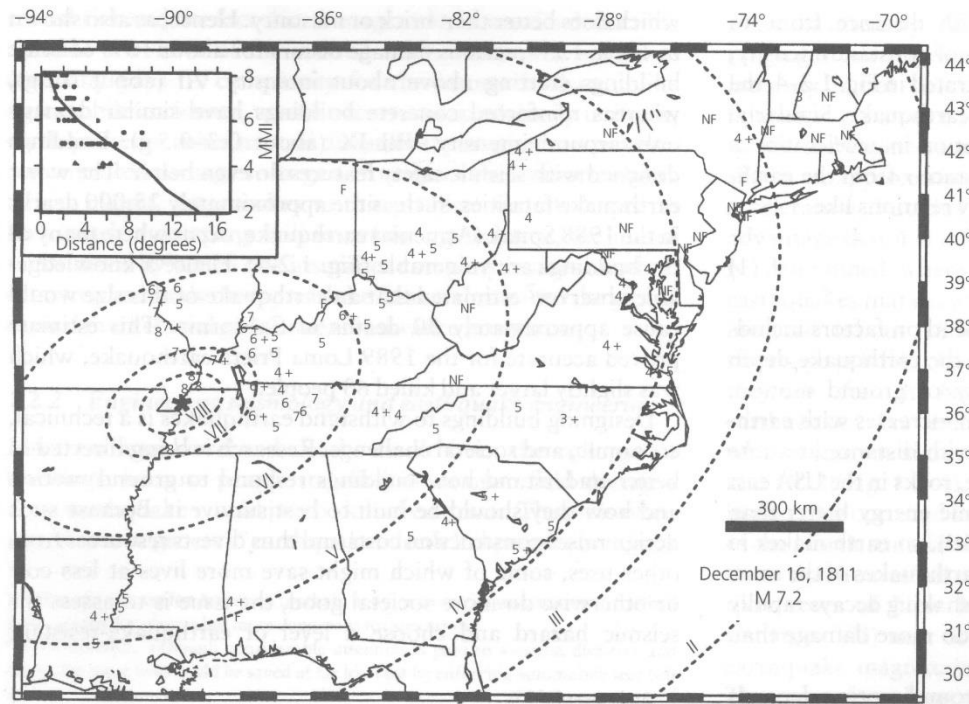
## 8.4.b: Seismické inženýrství

Pro seismické inženýrství je důležitým parametrem předpokládané zrychlení pohybu půdy způsobené zemětřesením.



*Mapa Kanady s maximálními hodnotami zrychlení (v %g), u nichž je 2% pravděpodobnost, že nebudou dosaženy během 50 let.*

Významným zdrojem poznání distribuce očekávaných hodnot seismické intenzity jsou makroseismické studie historických zemětřesení.

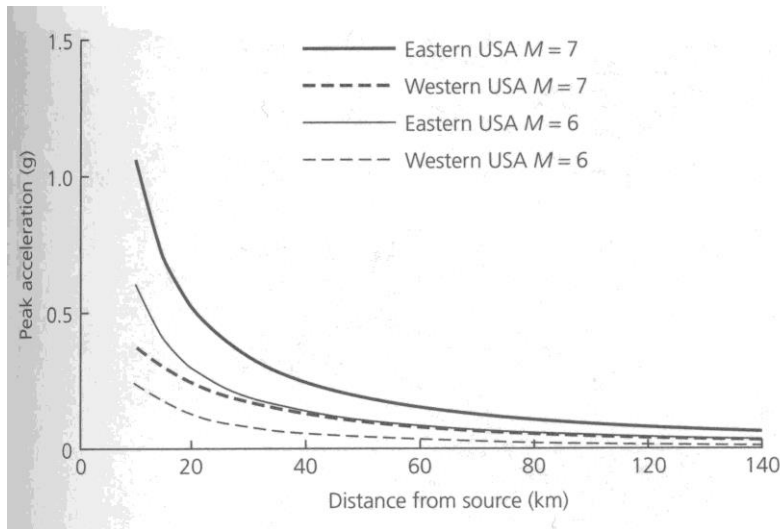


*Izoseisty pro tři historická zemětřesení z let 1811-1812 v zóně New Madrid (Stein, Wyession 2003).*

Očekávané zrychlením pohybu půdy  $a(M,r)$  lze odvodit z velikosti zemětřesení  $M$  a vzdálenosti  $r$ .

$$a(M, r) = b \cdot 10^{cM} \cdot r^{-d}$$

kde  $a, b, c$  jsou konstanty závislé na geologických poměrech, hloubce zemětřesení, zdrojovém mechanismu a frekvenci



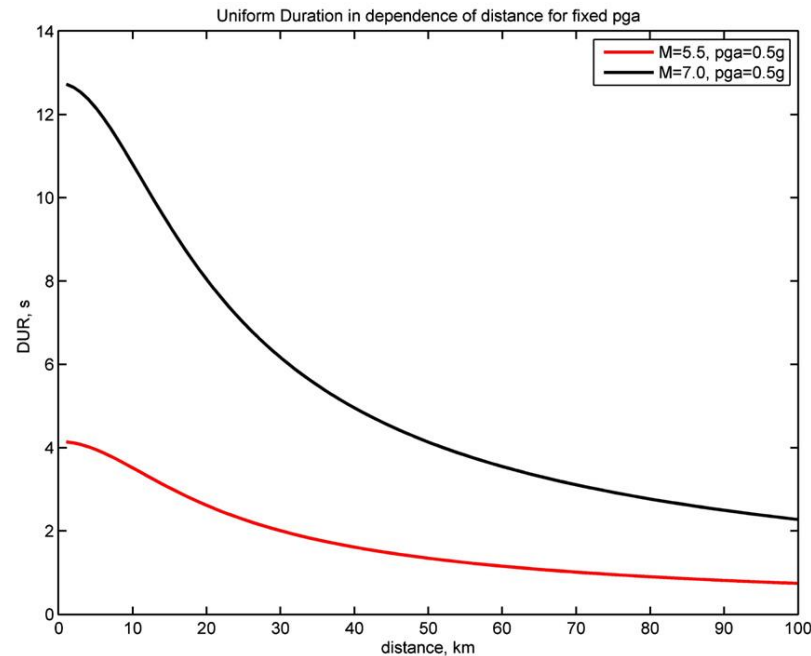
*Předpokládané vztahy mezi vzdáleností a zrychlením pohybu půdy (Stein, Wyssession 2003).*

## Mezi zrychlením pohybu půdy a intenzitou je úzký vztah.

intenzita	zrychlení	některé účinky
I		
II		
III		
IV	0.015-0.02g	slabé otřesy beze škod
V	0.03-0.04g	střední otřesy, velmi malé škody, téměř všeobecně pocítěno
VI	0.06-0.07g	silné otřesy, pohybuje s nábytek, pády tašek ze střech, poškození komínů
VII	0.10-0.15g	velmi silné otřesy, střední škody, pády některých komínů, otřesy jsou pocítěny i osobami v jedoucích autech
VIII	0.25-0.30g	částečný kolaps některých budov, panely vypadávají ze skeletových konstrukcí
IX	0.50-0.55g	závažné škody, poškození i na budovách speciálních konstrukcí, porušení podzemních potrubí
X	více než 0.6g	zřícené některé dobře stavěné dřevěné stavby, zřícena velká část zděných budov a budov se skeletovou konstrukcí, velké trhliny v zemi
XI		zříceny téměř všechny cihlové stavby, zříceny mosty
XII		totální zničení všech staveb

***Tabulka hodnot seismické intenzity modifikované Mercalliho škály a odpovídajícího zrychlení pohybu půdy (Stein, Wyssession 2003).***

Významným parametrem je doba trvání (duration) otřesů, která je závislá na velikosti zemětřesení a na epicentrální vzdálenosti.



*Závislost doby trvání otřesů na vzdálenosti pro fixované akcelerometry (Klugel 2008).*

Dopad překročení mezních hodnot na stavby a zařízení je frekvenčně závislý. Záleží nejen na velikosti uvolněné seismické energie (a tedy na amplitudě pohybu půdy), ale také na frekvenčním spektru.

Pro posouzení seismického rizika je nutné znát frekvenční spektrum "typického zemětřesení" pro daný region.

Důležitý je vztah převládajících frekvencí otřesu a vlastních frekvencí stavby či zařízení - hrozba rezonance.

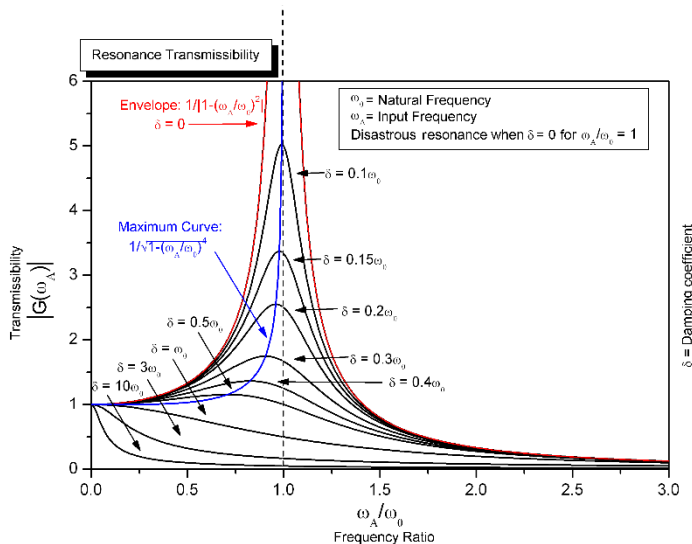
Vlastní frekvence  $f_n$ :

$$\text{pružina} : f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

k - tuhost pružiny, m - hmotnost

$$\text{kyvadlo} : f_n = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{L}}$$

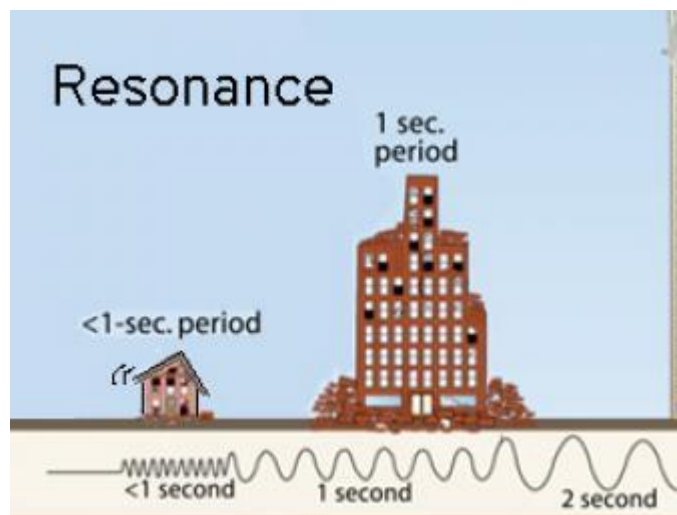
g - zrychlení, L - délka kyvadla





Vlastní frekvence budov závisí na jejich výšce – obecně s rostoucí výškou její hodnota klesá.

počet podlaží	vlastní perioda (sekundy)
2	0.2
5	0.5
10	1.0
20	2.0
30	3.0



U výškových budov hrozí rezonance s frekvencí povrchových seismických vln blízkých jevů.

Příklad zemětřesení Mexico City, 19. 9. 1985 – destrukce dvacetipatrových budov s vlastní periodou okolo 2 sekund (nižší ale i vyšší budovy vykázaly větší odolnost).

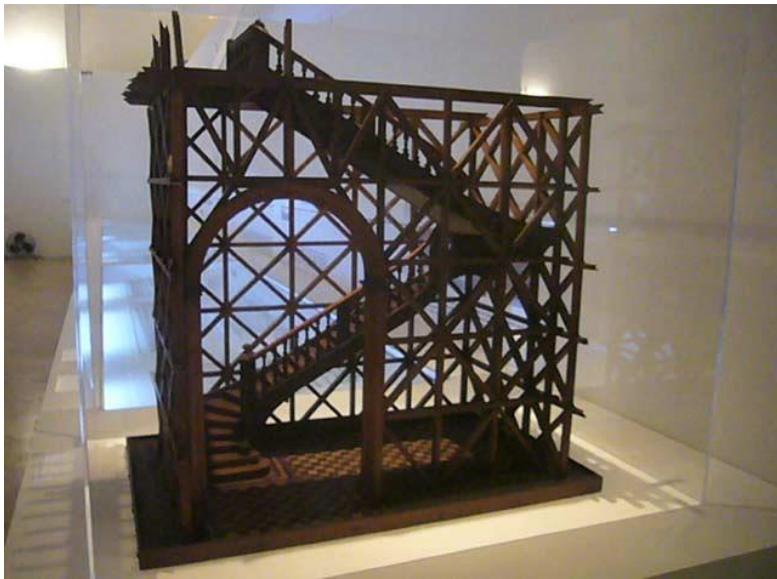
**Seismické inženýrství** - obor zabývající se zabezpečením staveb proti zemětřesení. Cílem je navrhnout a realizovat konstrukci, která by byla odolná proti očekávaným seismickým jevům.



*Test konstrukce na otřesovém stole.*

Odolnost staveb lze výrazně zvýšit využitím vhodných materiálů a konstrukcí.

V seismicky aktivních regionech se osvědčilo začlenění opěrných konstrukcí z pružného materiálu (dřevo), které mohou zabránit zřícení poškozené stavby.

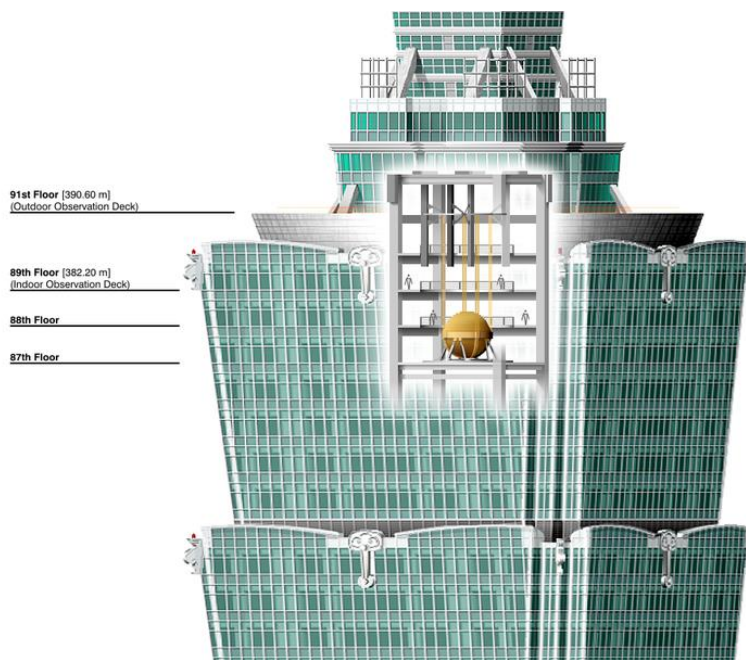


*Model dřevěného seismicky odolného schodiště (Lisabon).*



*Křížové zpevňující prvky (Indie).*

U extrémně vysokých budov jsou navrhovány konstrukční prvky, které mohou tlumit výkyvy.

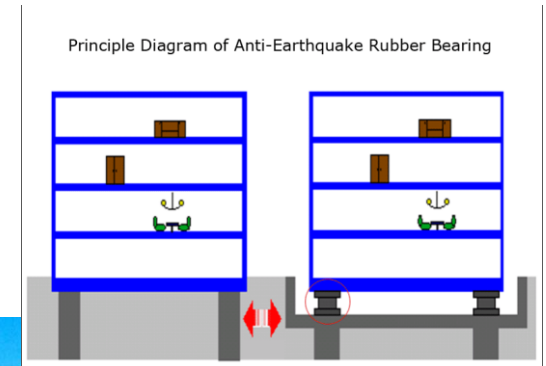


*Závaží tlumící výkyvy mrakodrapu Taipei 101.*

**Base isolation systémy** - stavby s oddělenou základnou, kde konstrukční prvky umožňují střížné pohyby a tlumí tak střížné síly působící na stavbu při zemětřesení.

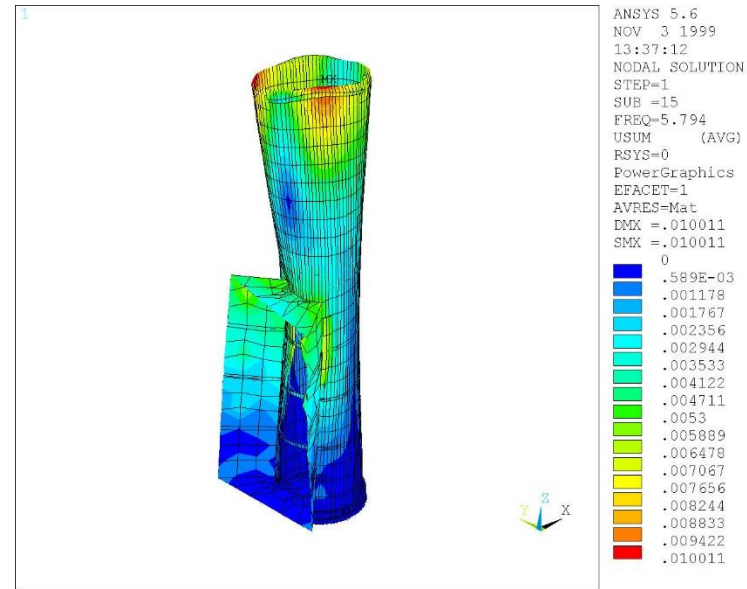
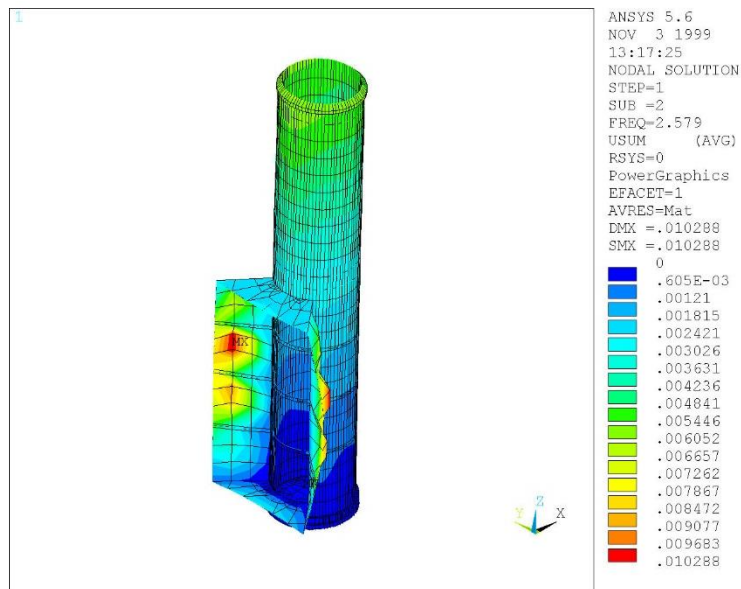


*Mausoleum v Pasargadae (Persie, 6 st.př.n.l.)  
Nejstarší stavba s konstrukčními prvky  
odpovídajícími "base isolation" systému.*



*Test běžné konstrukce (vlevo) a konstrukce s  
"base isolation" systémem (vpravo).*

Vlastní konstrukce stavby je testována vůči předpokládanému zemětřesení, aby bylo zjištěno, které části konstrukce jsou více a které méně namáhány.



*Teoretické výpočty namáhání konstrukce ocelového komínu při různých módech vibrace (Kala et al. 2006).*