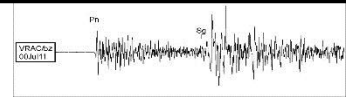


Zpracování seismických dat

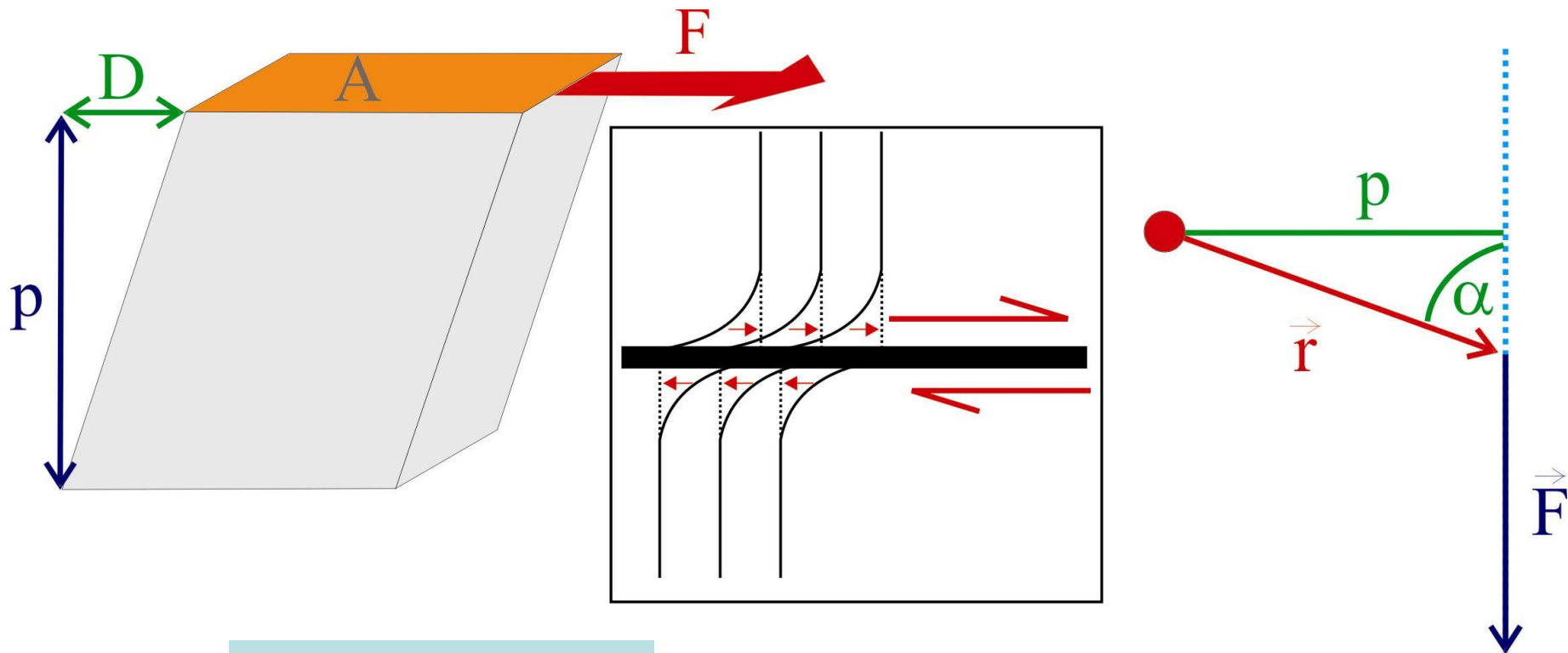
část C: Parametry zdroje

IX. Seismický moment, energie a velikost porušené zóny

Josef Havíř
havir@ipe.muni.cz



a) Seismický moment jako skalární veličina

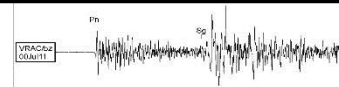
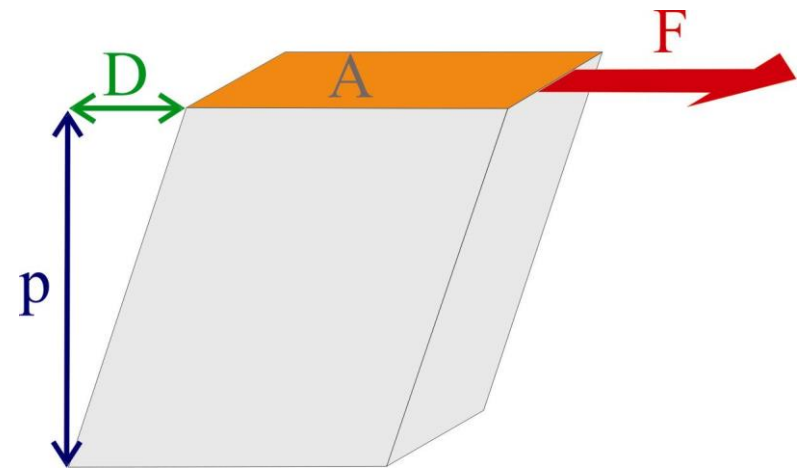
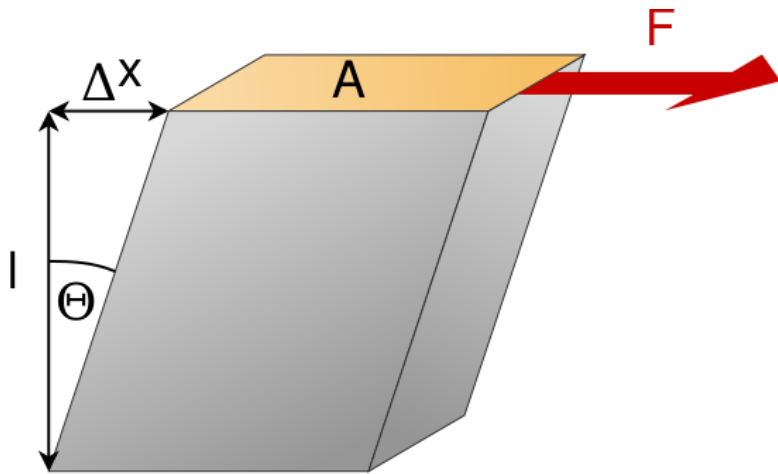


$$M_o = F \cdot p$$

seismický moment - odvození: $M_o = F \cdot p$

$$\tau = \frac{F}{A} \quad \gamma = \frac{\Delta x}{l} = \frac{D}{p} \quad \mu = \frac{\tau}{\gamma} = \frac{F}{A} \cdot \frac{p}{D} = \frac{F \cdot p}{A \cdot D}$$

$$\mu = \frac{F \cdot p}{A \cdot D} \Leftrightarrow \mu \cdot D \cdot A = F \cdot p = M_o$$



Seismický moment M_0 ... je veličina určená pro zemětřesení vznikající vlivem pohybu podél zlomových ploch.

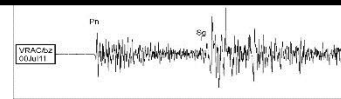
$$M_0 = \mu \cdot D \cdot A$$

μ ... modul pružnosti ve smyku hornin

(průměrná hodnota modulu μ v zemské kůře je 32 GPa, průměrná hodnota modulu μ ve svrchním plášti dosahuje až hodnot 75 GPa)

D ... průměrné posunutí na zlomu

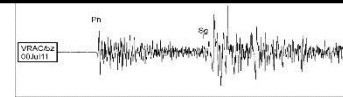
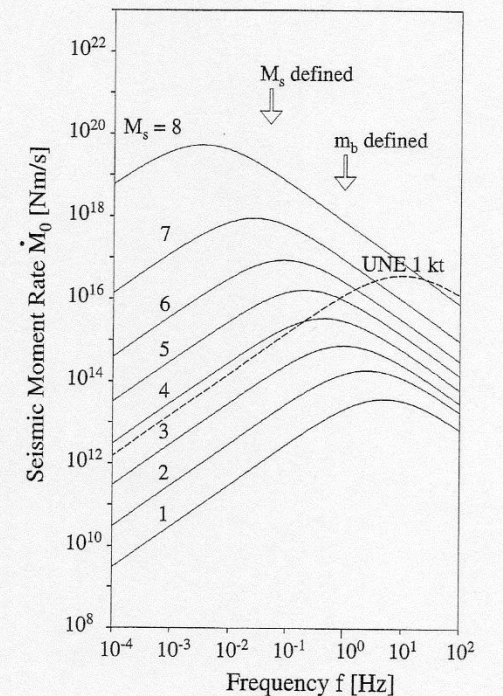
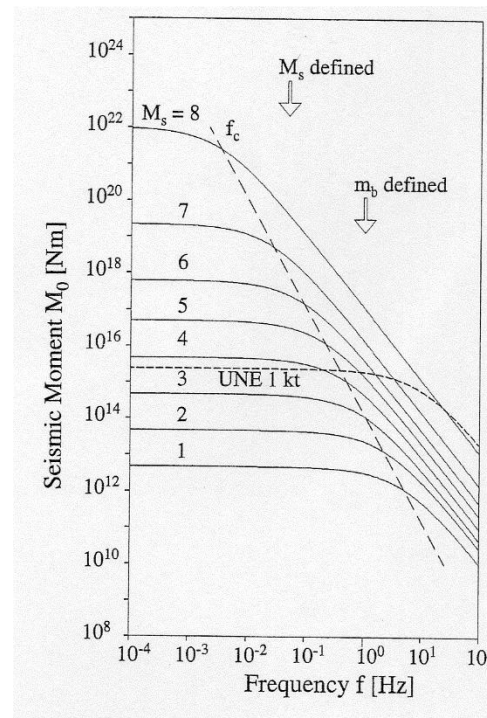
A ... plocha zlomu



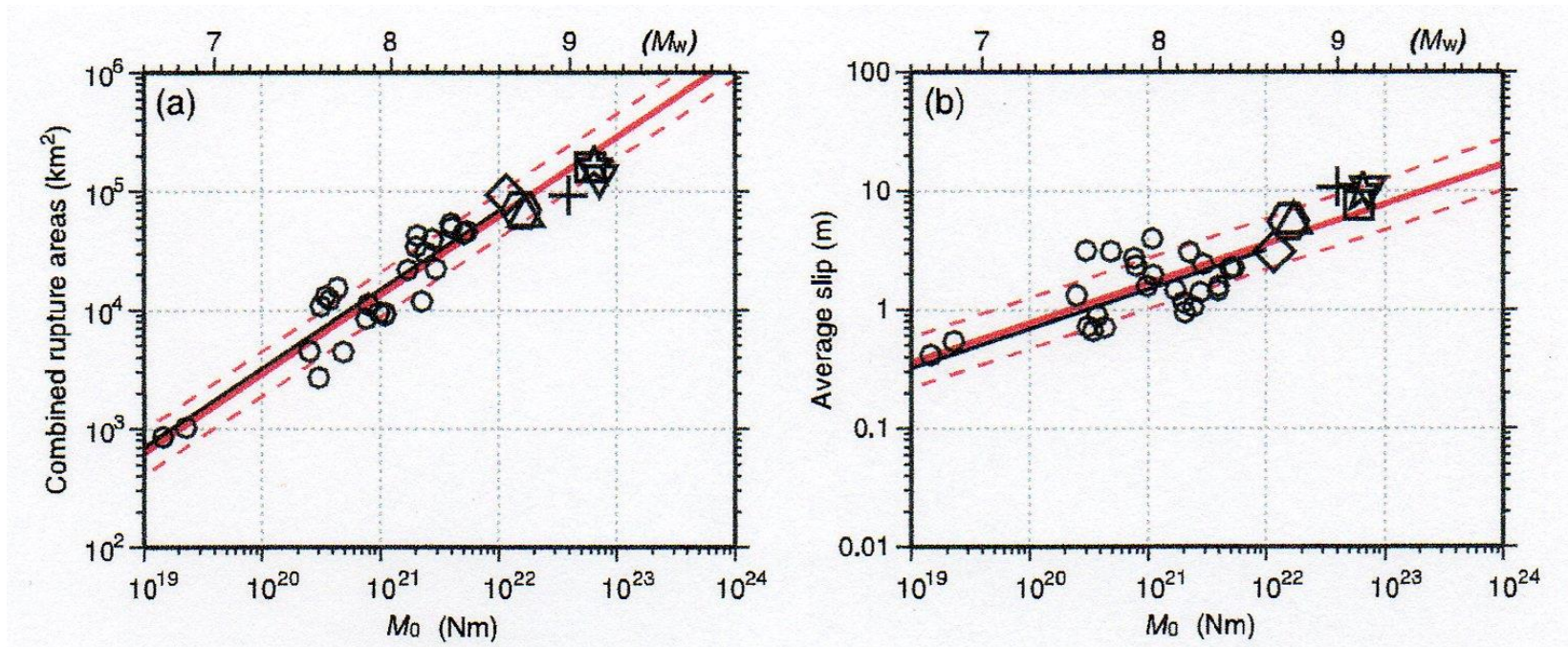
Velikost seismického momentu je mírou velikosti zemětřesení – lze jej proto převádět na magnitudo (M_w – momentové magnitudo):

$$M_w = \frac{2}{3} (\log M_0 - 9.1)$$

kde M_0 je seismický moment



Seismický moment M_0 (a tedy momentové magnitudo M_w) tedy roste s rostoucí plochou porušené zóny a s rostoucí velikostí posunutí na zlomu, přičemž také velikost porušené plochy koreluje s velikostí průměrného posunutí.



Průměrné posunutí se obvykle výrazně liší od maximálního co-seismického posunutí pozorovaného na zlomové ploše.

Maximální hodnoty posunutí u největších zemětřesení dosahují řádově desítek metrů.

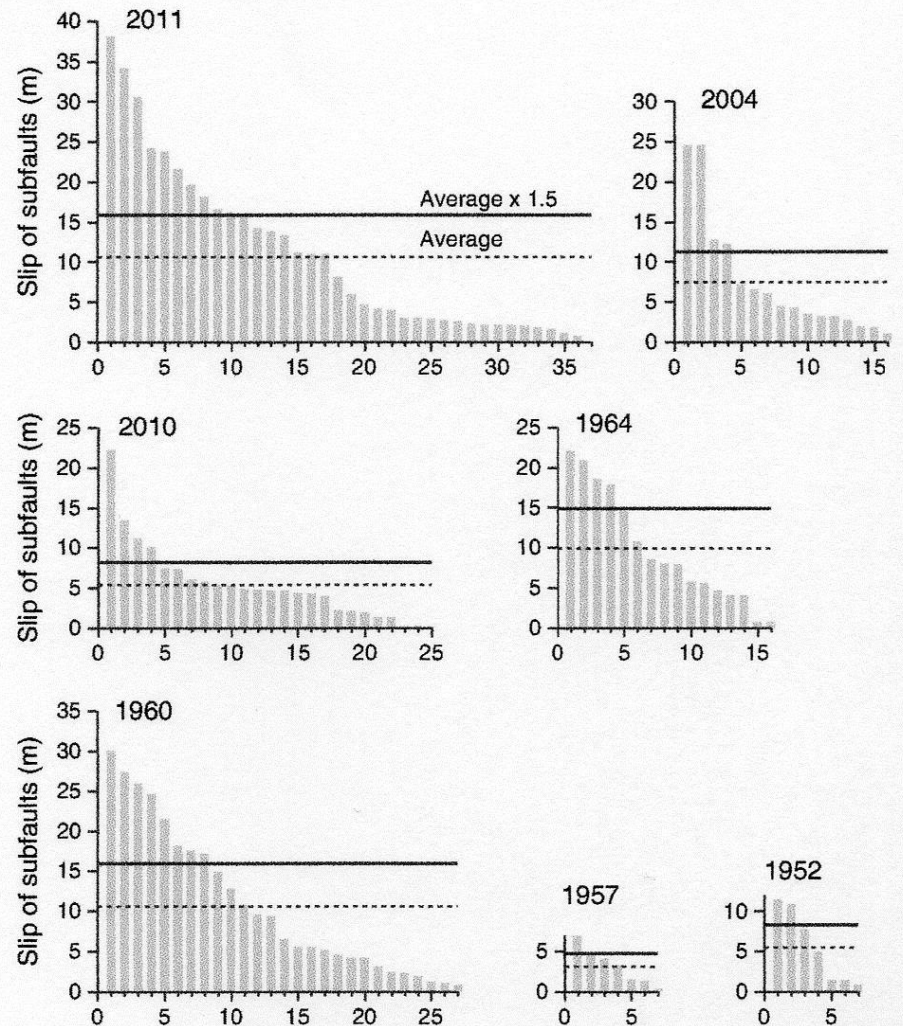


Figure 2. Slip distribution for the seven giant earthquakes compiled in this paper. The subfaults for each earthquake are rearranged with slip amounts in descending order.

Empiricky byl sledován vztah mezi magnitudem (popřípadě momentem) a velikostí porušené části křehké poruchy (plocha či délka zlomu).

Z regresní analýzy vyplývají vztahy typu:

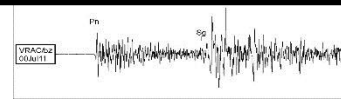
$$\log(L, W, A) = a + b(M_s, M_w)$$

L ... délka zlomu

W ... šířka zlomu

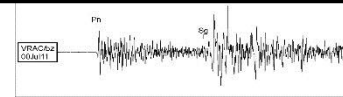
A ... plocha zlomu

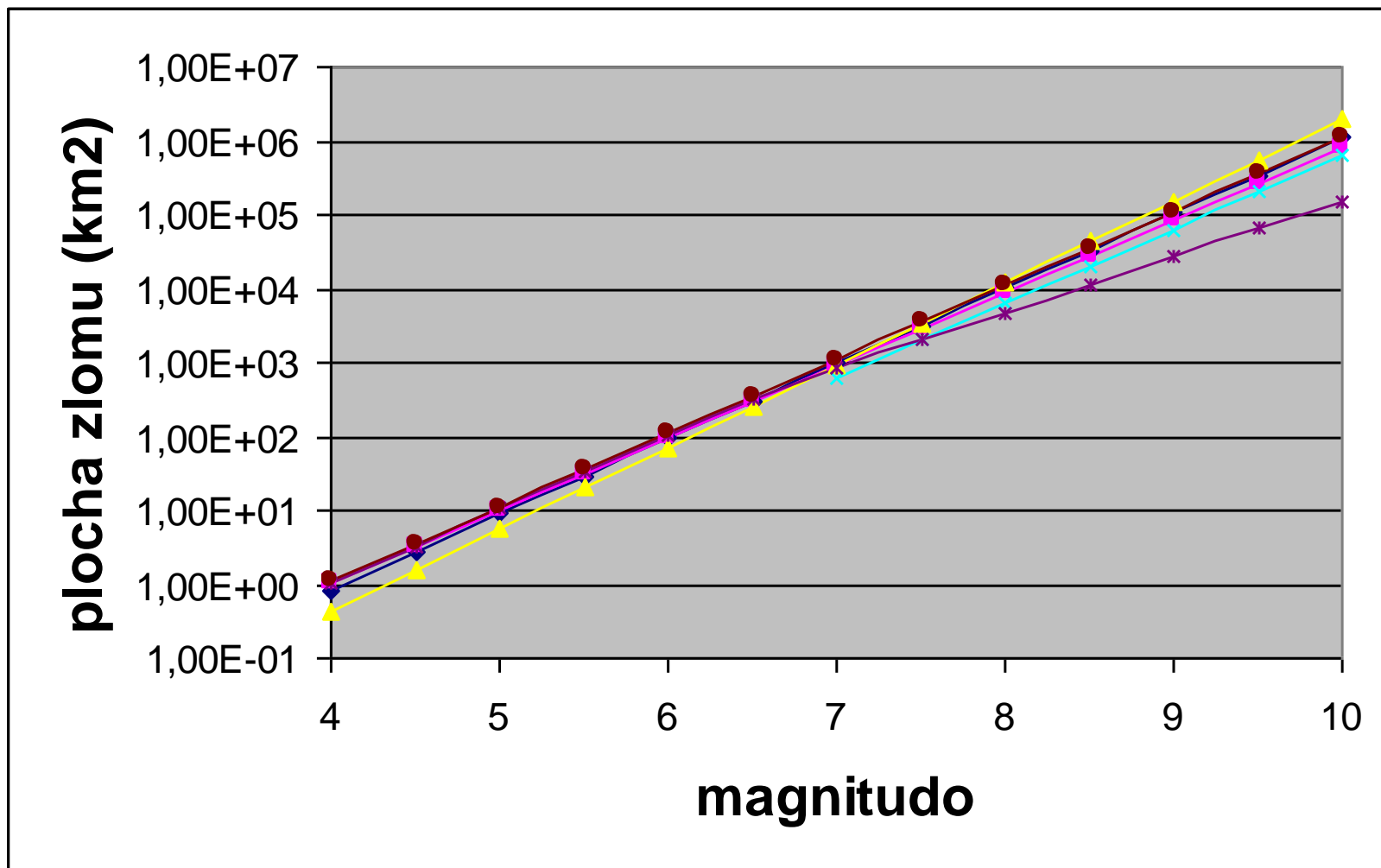
a,b ... regresní koeficienty



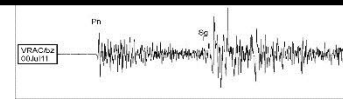
Wells and Coppersmith (1994) all fault types	$M = 0.98 \text{ Log} (A) + 4.07$
Wells and Coppersmith (1994) strike-slip	$M = 1.02 \text{ Log}(A) + 3.98$
Wells and Coppersmith (1994) reverse	$M = 0.90 \text{ Log}(A) + 4.33$
Ellsworth (2001) strike-slip for $A > 500 \text{ km}^2$	$M = \log(A) + 4.1$ (lower range: 2.5 th percentile) $M = \log(A) + 4.2$ (best estimate) $M = \log(A) + 4.3$ (upper range: 97.5 th percentile)
Hanks and Bakun (2001) strike-slip	$M = \log(A) + 3.98$ for $A < 468 \text{ km}^2$ $M = 4/3 \text{ Log}(A) + 3.09$ for $A > 468 \text{ km}^2$
Somerville et al (1999)	$M = \log(A) + 3.95$

Vztahy mezi magnitudem a plochou ruptury podle různých autorů (převzato z Abrahamson 2006).



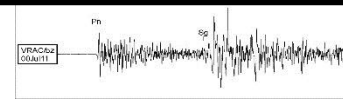


Graf závislosti mezi magnitudem a plochou ruptury podle různých autorů (vzorce převzaty z Abrahamson 2006)



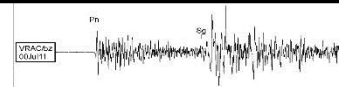
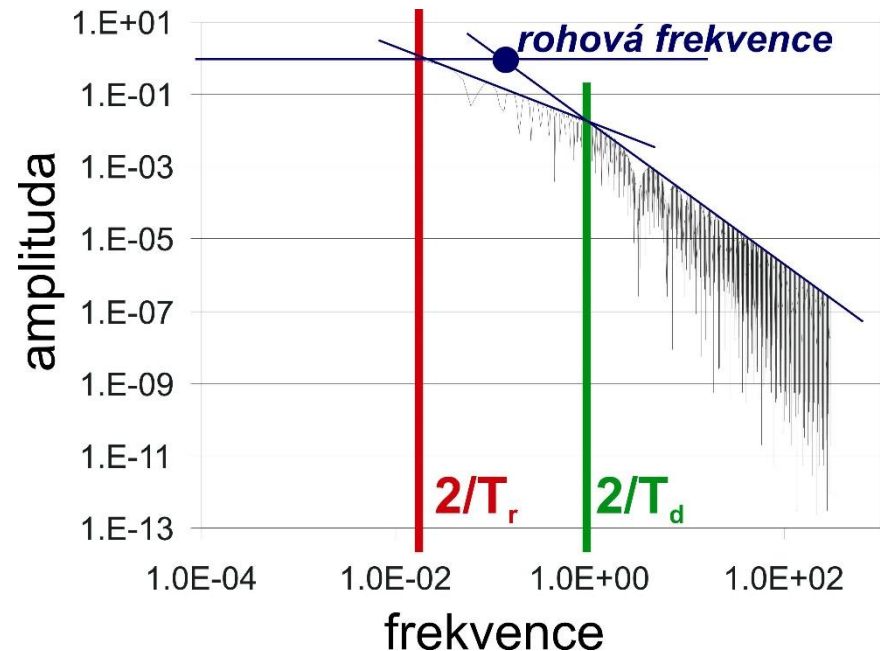
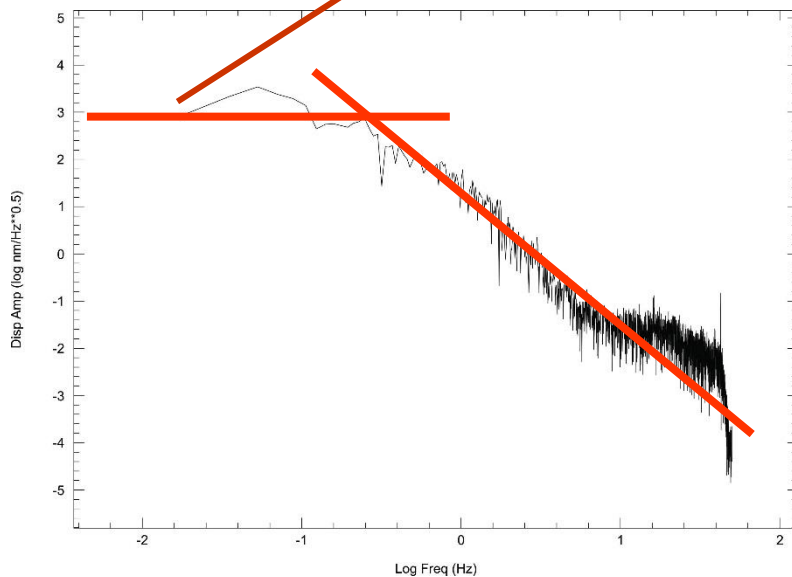
Mw	plocha zlomu (km ²)	délka zlomu (km)
5	~ 5 - 10	~ 1 - 3
6	~ 70 - 110	~ 6 - 12
7	~ 630 - 1100	~ 45 - 60
8	~ 5.000 - 12.000	~ 250 - 330
9	~ 30.000 - 150.000	~ 1.250 - 2.400
10	~ 600.000 - 1.500.000	~ 6.000 - 17.000

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



Velikost seismického momentu souvisí s **rohovou frekvencí** ve spektru zemětřesení a s **úrovní ploché (nízkofrekvenční) části spektra**.

$$A(f) = M_0 \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{f \cdot T_r}{2}\right)}{\frac{f \cdot T_r}{2}} \right| \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{f \cdot T_d}{2}\right)}{\frac{f \cdot T_d}{2}} \right|$$

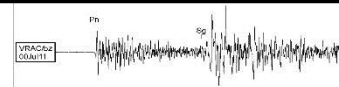
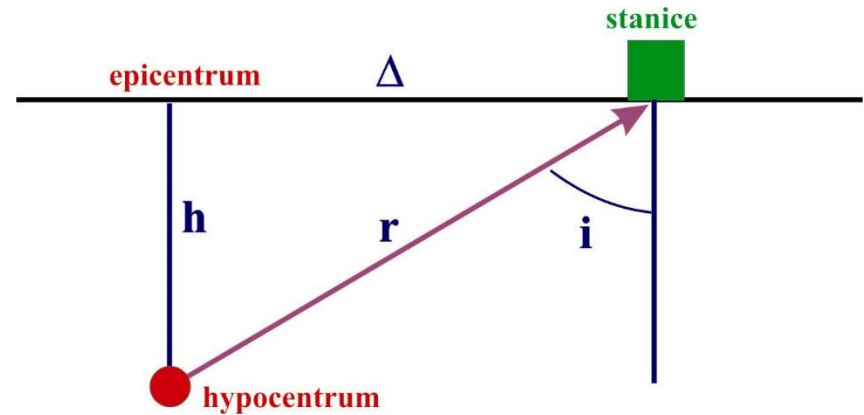
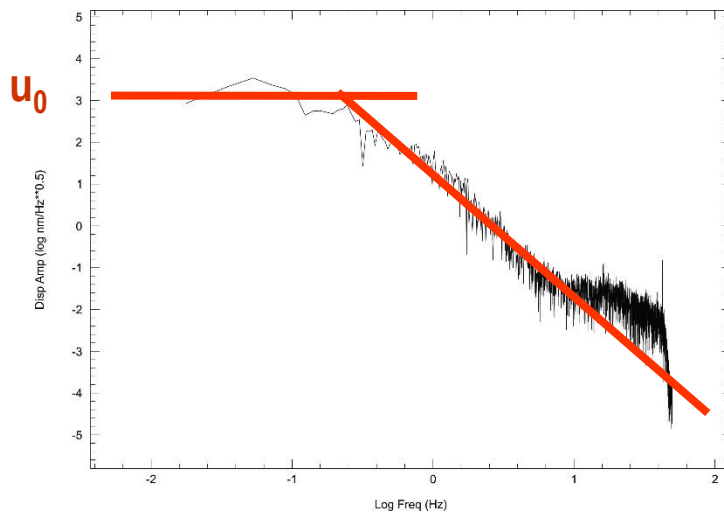


Velikost seismického momentu lze odvodit ze spektra seismického jevu.
Pro homogenní prostředí platí:

$$M_0 = \frac{4 \cdot \pi \cdot r \cdot v_p^3 \cdot \rho \cdot u_0}{\Theta \cdot S_a}$$

i	S _a	i	S _a	i	S _a
0	2.00	30	1.70	60	1.02
10	1.96	40	1.49	70	0.79
20	1.86	50	1.26	80	0.54

r – hypocentrální vzdálenost; v_p – rychlost podélné vlny; ρ – hustota prostředí; u₀ – úroveň ploché části spektra posunutí; Θ – průměrná vyzářovací charakteristika; S_a – zesílení volného povrchu pro P-vlnu



Úzká vazba je také mezi seismickým momentem M_0 a rohovou frekvencí f_c .

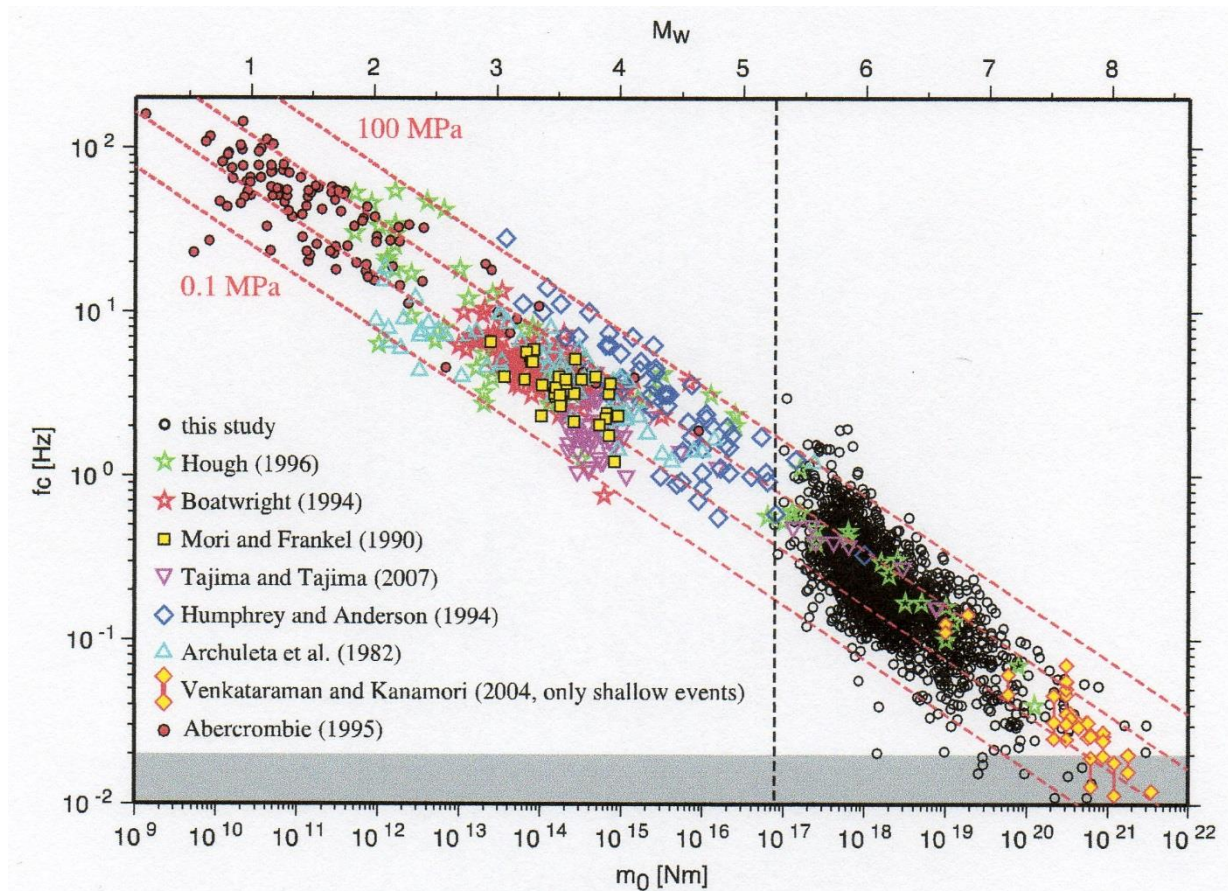
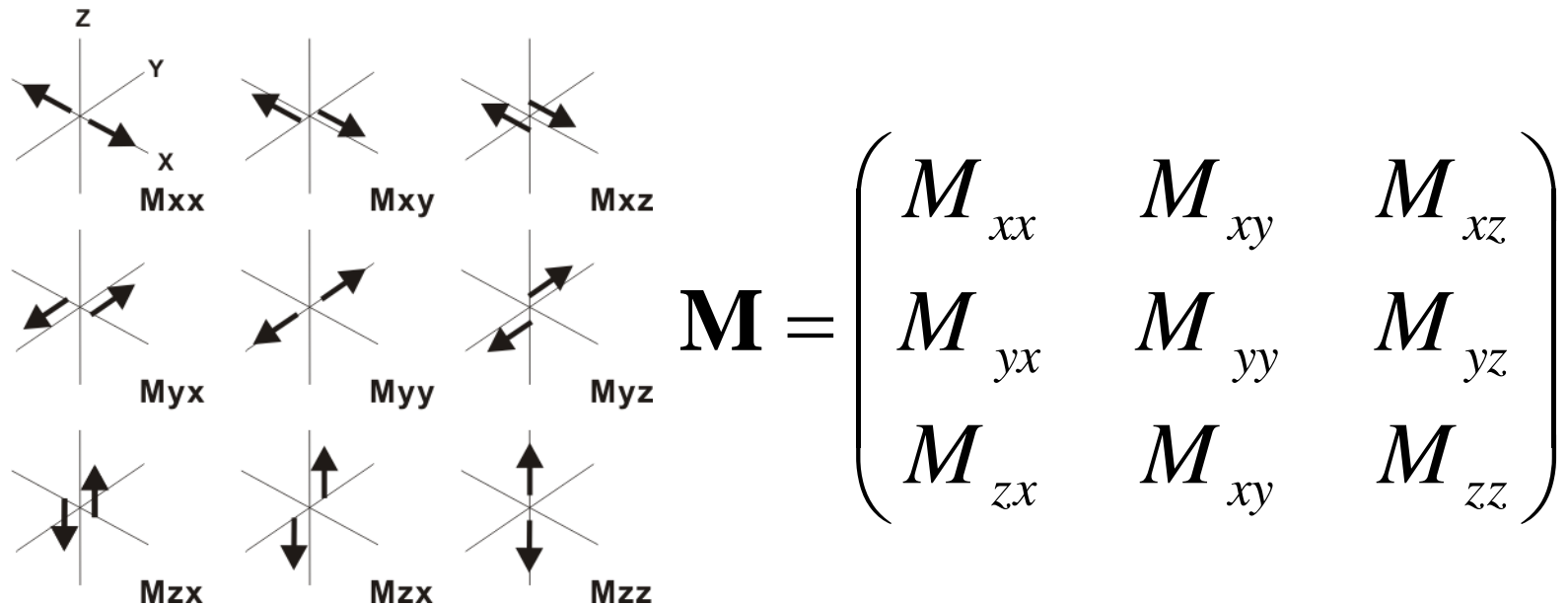


Figure 8. Corner frequency versus seismic moment (lower scale) and moment magnitude (upper scale). The dashed lines show constant stress drops of 0.1, 1, 10, and 100 MPa. The gray shaded area shows the resolution limit of our data. The vertical dashed line marks the lower magnitude cutoff of our data. The results of this study are plotted as open black circles. All other different shaped symbols show data from various other studies. The data suggest self-similarity over a wide moment range.

b) Tenzor seismického momentu

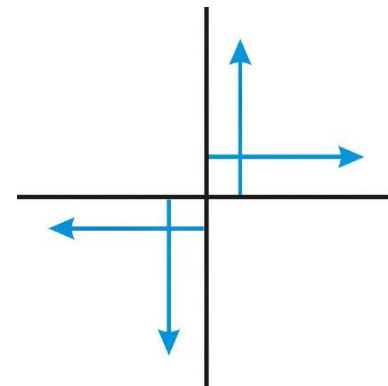
Mechanismus pohybu ve zdroji lze vyjádřit ve formě zdrojového signálu (impulsu), který se šíří z hypocentra. Je popisován ve formě tenzoru 3*3, který nazýváme **tenzorem seismického momentu**, skládajícího se z devíti složek reprezentujících devět jednotlivých párů sil (single-couple forces).



Vztah mezi amplitudou seismických vln a směrem jejich šíření ovšem ukazuje na tzv. **double-couple** model, který popisuje síly působící ve zdroji při pohybu způsobujícím zemětřesení ve formě dvou párů sil.

Každý pár obsahuje dvě síly stejné velikosti a opačného směru, takže **součet všech sil je nulový** (systém není nikam žádnou celkovou silou tlačěn či tažen).

Otočné momenty obou párů sil mají stejnou velikost a opačný směr, takže **součet všech momentů je nulový** (systém není nucen žádným celkovým momentem k rotaci).

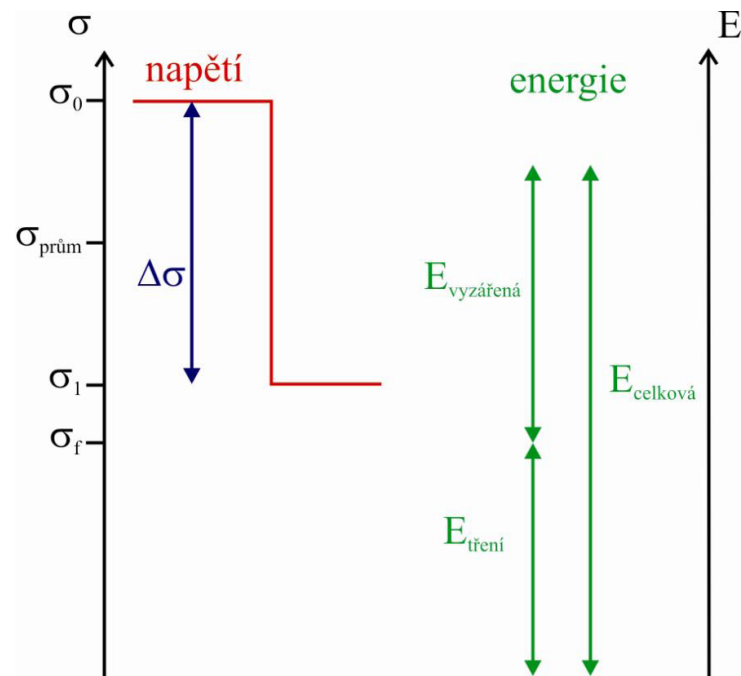


c) Seismická energie

Při vzniku zemětřesení prudce klesá napětí a je uvolněna energie. Je-li σ_0 napětí před zemětřesením a σ_1 napětí po zemětřesení, tak pokles napětí $\Delta\sigma$ je (u běžně sledovaných zemětřesení se $\Delta\sigma$ obvykle pohybuje mezi hodnotami 0.2 až 20 MPa):

$$\Delta\sigma = \sigma_0 - \sigma_1$$

$$\sigma_{\text{prum}} = \frac{\sigma_0 + \sigma_1}{2}$$



Uvolněná energie je úměrná poklesu napětí (respektive průměrnému napětí σ_{prum}), průměrnému posunutí D a ploše zlomu A :

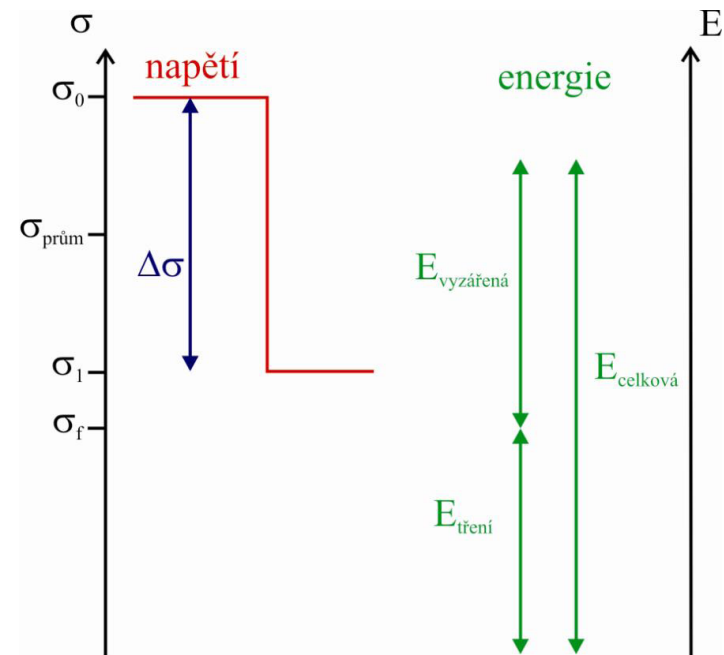
$$E_{\text{celková}} = \sigma_{\text{prum}} \cdot A \cdot D \quad (E \dots \text{práce} = \text{síla} \times \text{dráha})$$

Ne všechna energie je ale vyzářena ve formě elastických vln, část energie je spotřebována na překonání tření:

$$E_{\text{celková}} = E_{\text{vyzářena}} + E_{\text{tření}}$$

příčemž:

$$E_{\text{tření}} = \sigma_f \cdot A \cdot D$$



Pro energii vyzářenou ve formě elastických vln tak platí:

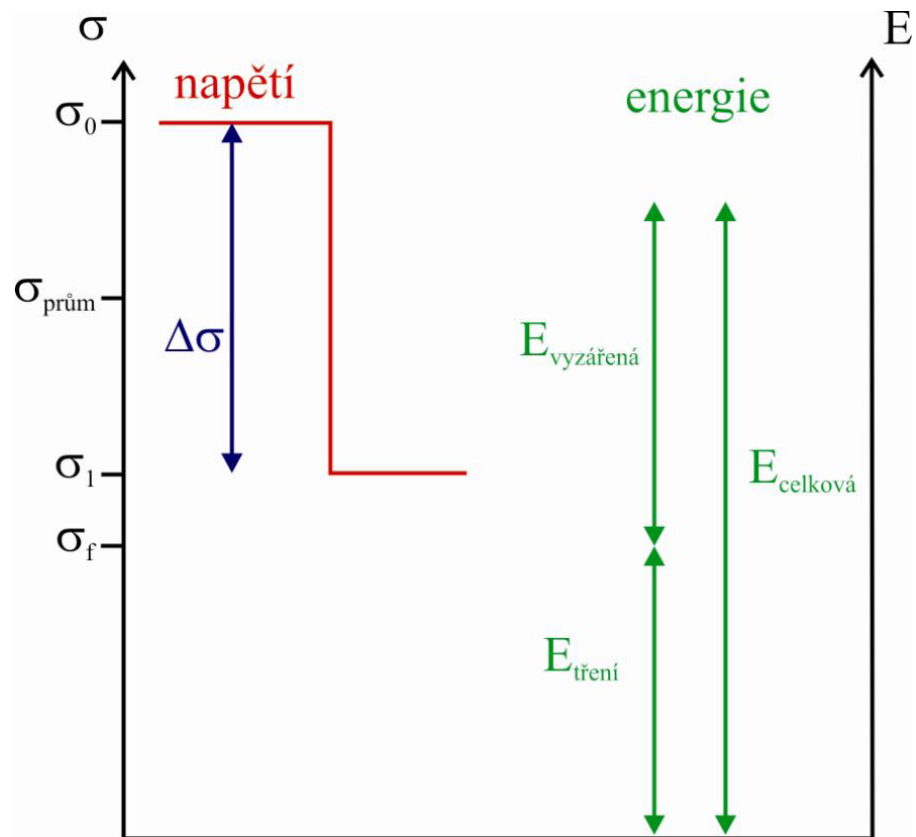
$$E_{\text{vyzarena}} = E_{\text{celková}} - E_{\text{treni}} = \sigma_{\text{prum}} \cdot A \cdot D - \sigma_f \cdot A \cdot D$$

$$E_{\text{vyzarena}} = (\sigma_{\text{prum}} - \sigma_f) A \cdot D$$

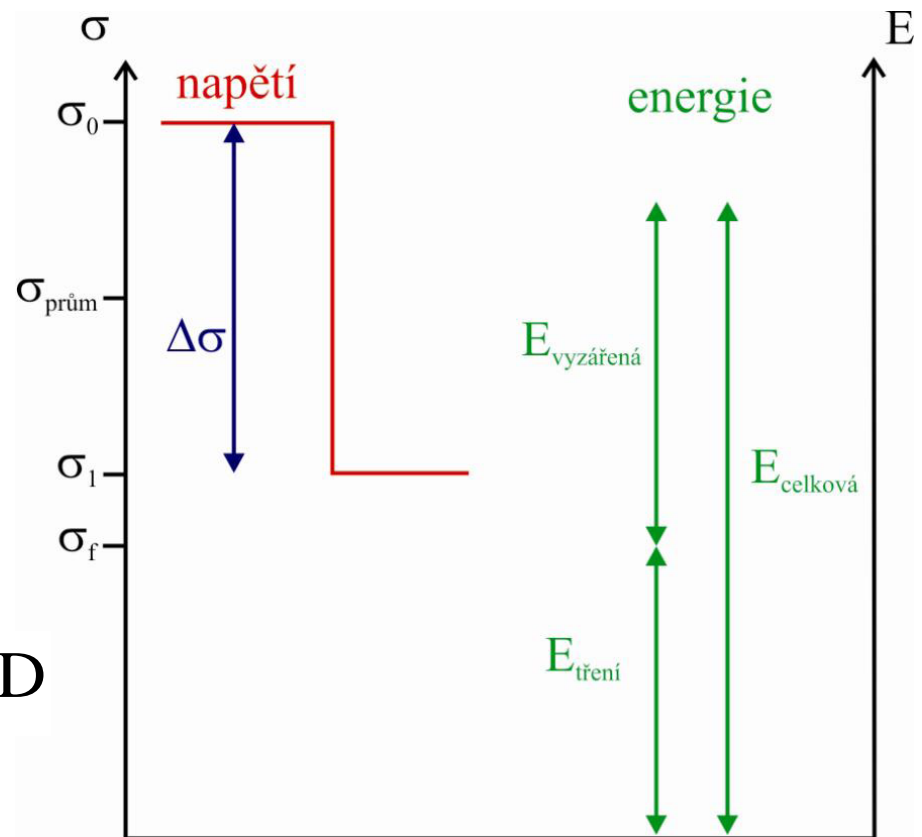
$$E_{\text{vyzarena}} = \left(\sigma_1 + \frac{\Delta\sigma}{2} - \sigma_f \right) A \cdot D$$

$$E_{\text{vyzarena}} = \frac{\Delta\sigma}{2} A \cdot D + (\sigma_1 - \sigma_f) A \cdot D$$

spodní mez vyzářené energie



Čím větší je pokles napětí při seismickém jevu, tím větší je uvolněná energie a tím vyšší je magnitudo zemětřesení.



$$E_{\text{vyzarena}} = \sigma_{\text{prum}} \cdot A \cdot D - \sigma_f \cdot A \cdot D$$

Seismická energie vyzářená ve formě elastických seismických vln souvisí s velikostí zemětřesení a tedy s magnitudem.

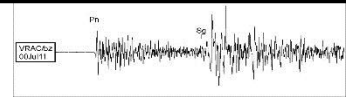
Empiricky byl odvozen vztah pro magnitudo vycházející z hodnoty seismické energie:

$$M_e = \frac{2}{3} \log E_s - 2.9$$

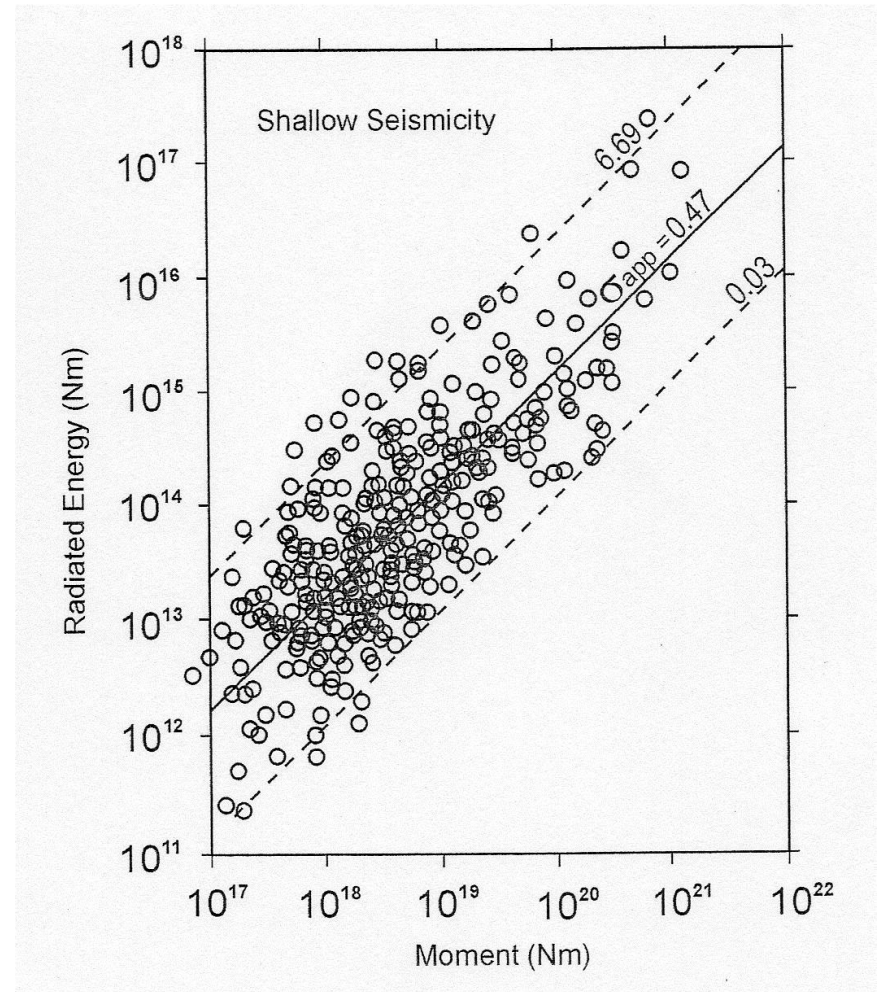
Podle empirických vztahů Gutenberga a Richtera platí také:

Pro slabší jevy (m_b není saturováno): $\log E = 2.4m_B - 1.2$

Pro silnější jevy (m_b je saturováno): $\log E = 1.5M_s + 4.8$



Seismická energie dobře koreluje se seismickým momentem (mezi seismickou energií a seismickým momentem je lineární vztah).



Definujeme-li τ_a jako tzv. apparent stress: $\tau_a = \sigma_{\text{prum}} - \sigma_f$

A vezmeme-li v úvahu, že pro vyzařenou (respektive seismickou) energii E_{vyzarena} (respektive E_s) platí:

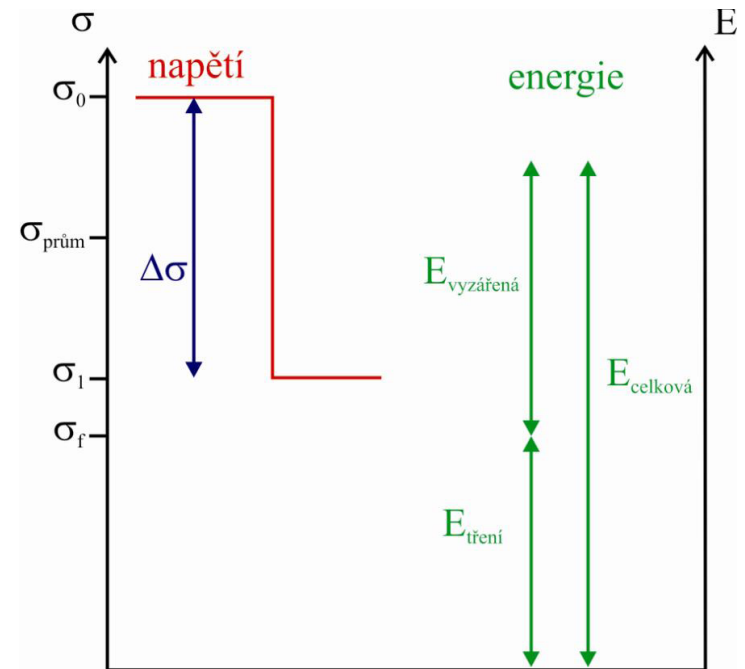
$$E_{\text{vyzarena}} = \sigma_{\text{prum}} \cdot A \cdot D - \sigma_f \cdot A \cdot D$$

Pak můžeme pro seismickou energii a Seismický moment odvodit vztah:

$$E_s = \tau_a \cdot A \cdot D$$

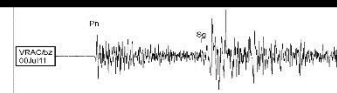
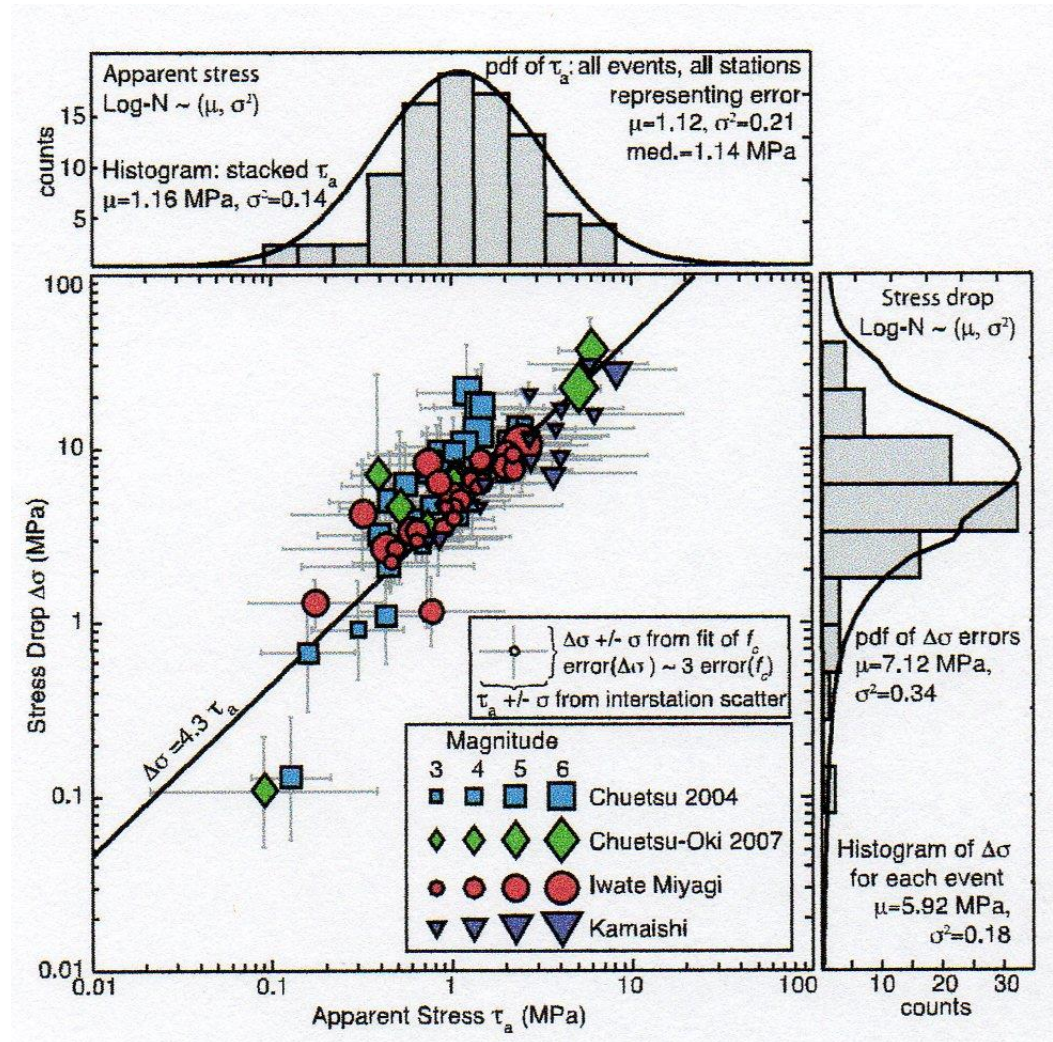
$$M_0 = \mu \cdot A \cdot D$$

$$\Leftrightarrow \frac{E_s}{M_0} = \frac{\tau_a \cdot A \cdot D}{\mu \cdot A \cdot D} = \frac{\tau_a}{\mu}$$



Přitom se ukazuje, že mezi poklesem napětí $\Delta\sigma$ a hodnotou τ_a je přibližně lineární vztah:

$$\Delta\sigma = 4.3 * \tau_a$$



d) Pokles napětí

Studie ukazují, že pokles napětí $\Delta\sigma$ se u většiny studovaných zemětřesení pohybuje mezi hodnotami 0.1 a 20 Mpa.

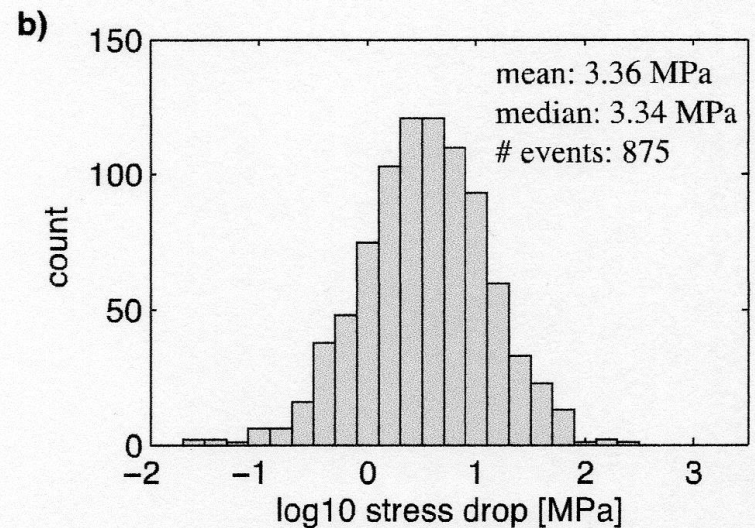
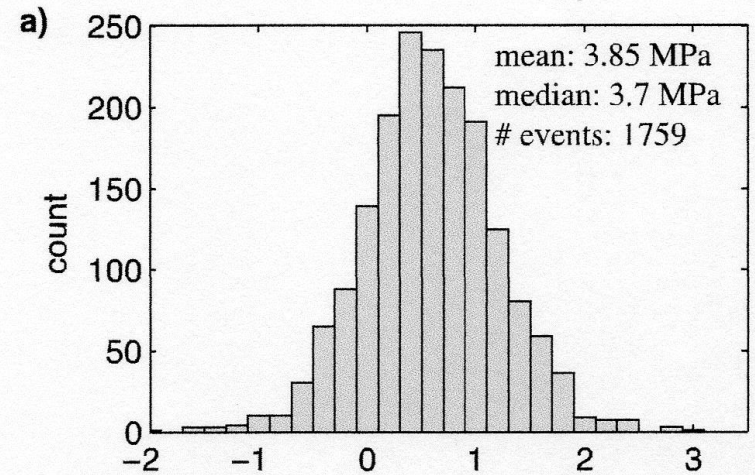
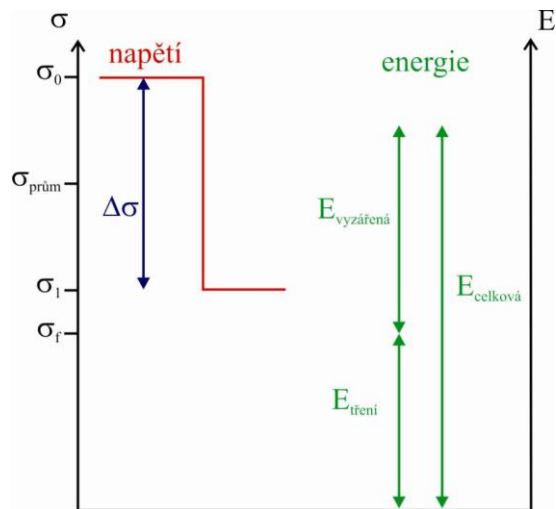
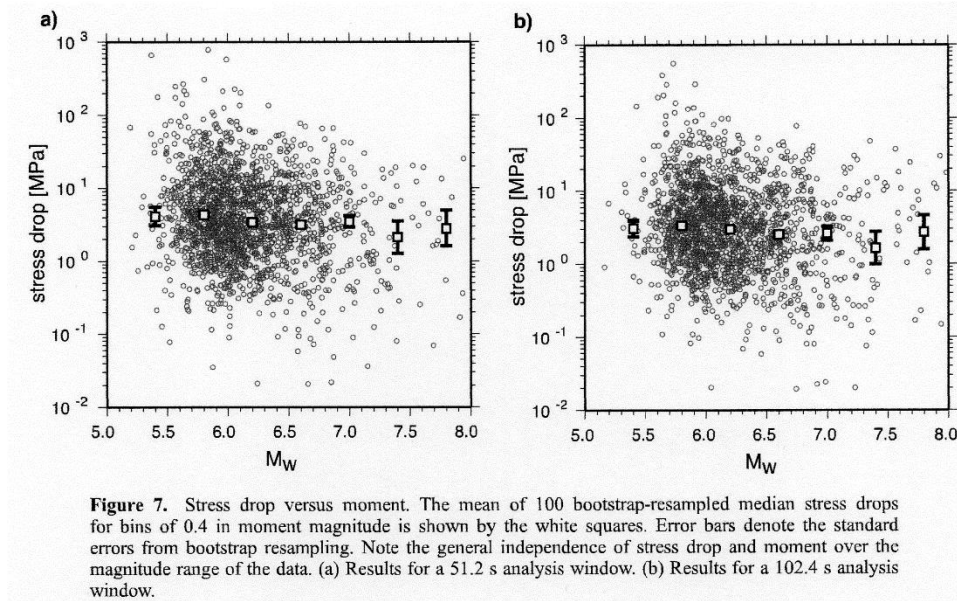


Figure 6. Histogram of logarithmic stress drop estimates for different minimum numbers of required stations. (a) For at least three stations per event. (b) For at least 20 stations per event.

Poklesem napětí $\Delta\sigma$ nejeví závislost na hodnotě magnituda (nekoreluje s velikostí zemětřesení).



Studie ukazují, že pokles napětí $\Delta\sigma$ roste s rostoucí rigiditou horninového prostředí a s rostoucím průměrným posunutím na zlomové ploše, ale naopak klesá s rostoucí velikostí porušené zóny.

$$\Delta\sigma \approx \frac{\mu \cdot D}{L}$$

$$\Delta\sigma = \frac{7}{16} \frac{M_0}{L^3}$$

Naopak, lze vysledovat určitou souvislost mezi poklesem napětí $\Delta\sigma$ a charakterem tektonického režimu. Relativně vyšší hodnoty $\Delta\sigma$ lze pozorovat v případě transformních zlomů v oceánské kůře a v případě vnitrodeskových jevů. Obecně jsou relativně vyšší hodnoty $\Delta\sigma$ v případě horizontálních posunů.

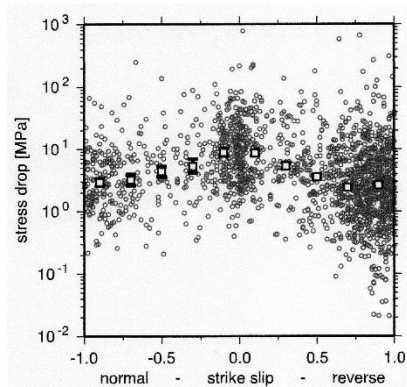


Figure 10. Stress drop versus focal mechanism. The white squares show the mean of 100 bootstrap-resampled median stress drops per bin. Error bars denote the standard error from bootstrap resampling. Note the highest stress drops for strike slip events.

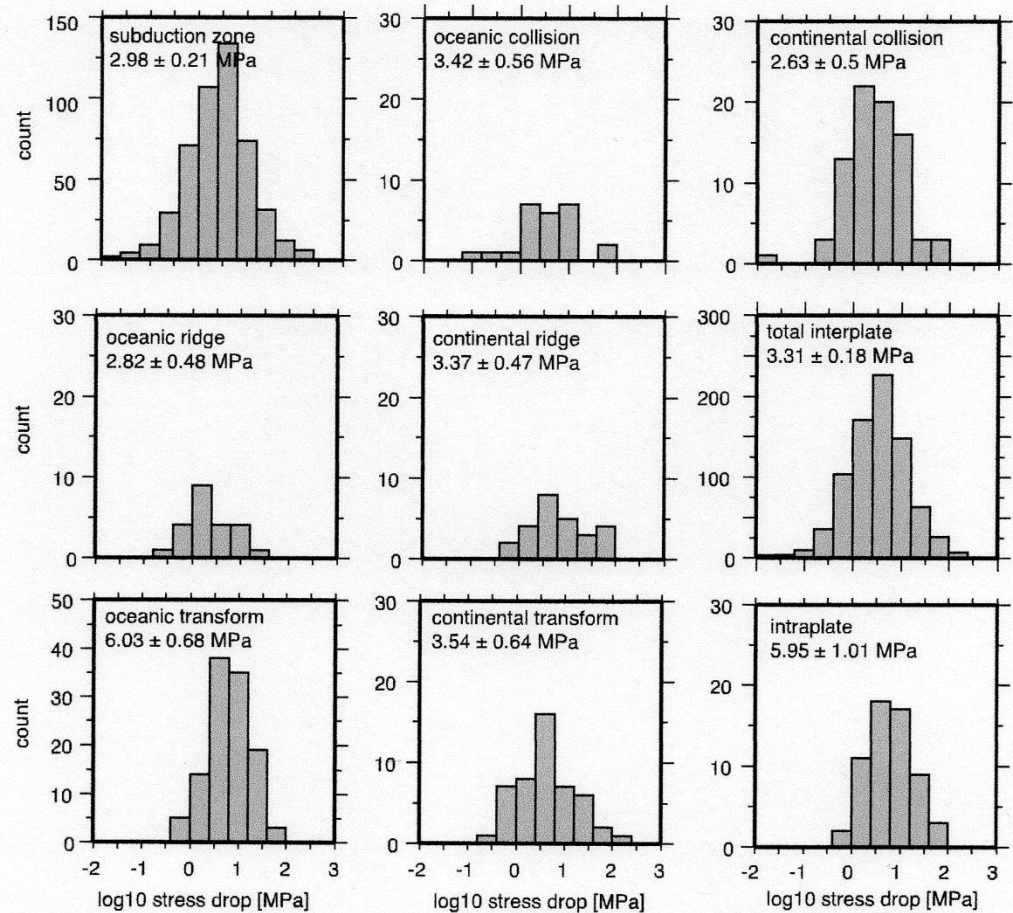


Figure 18. Histograms of stress drop distributions by tectonic region. See Table 1 for number of events in each class. The listed number denote the median stress drops together with their standard errors.