

Zpracování seismických dat

část A: Seismický signál jako vlnová funkce

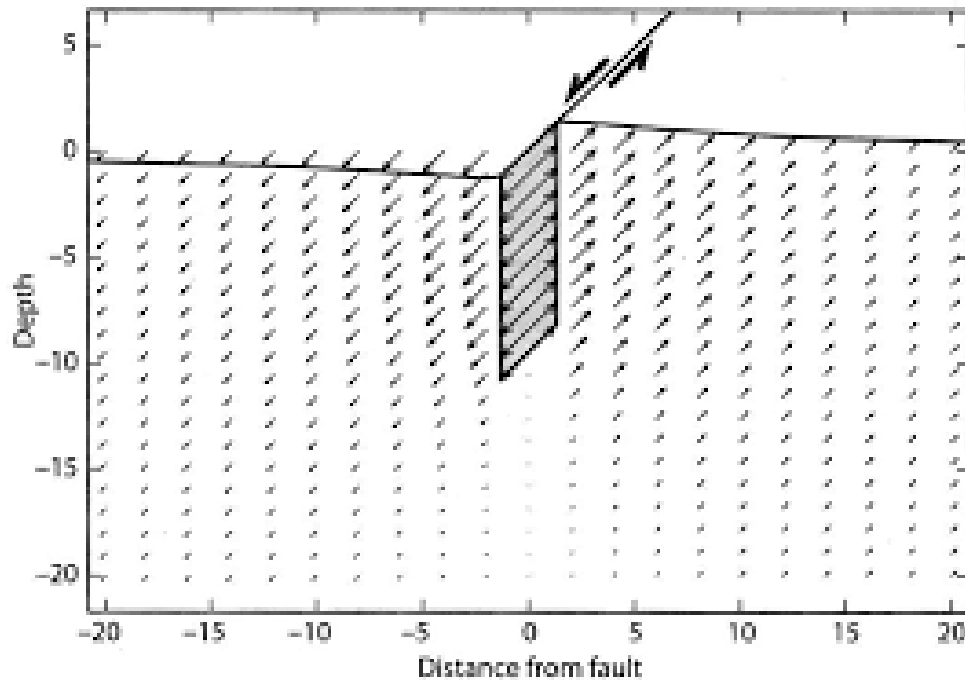
III. Tvar seismického signálu

Josef Havíř
havir@ipe.muni.cz

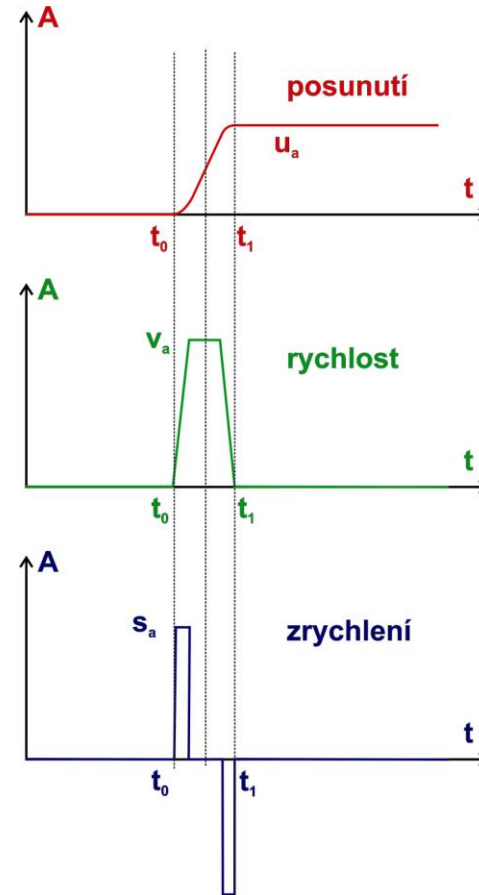
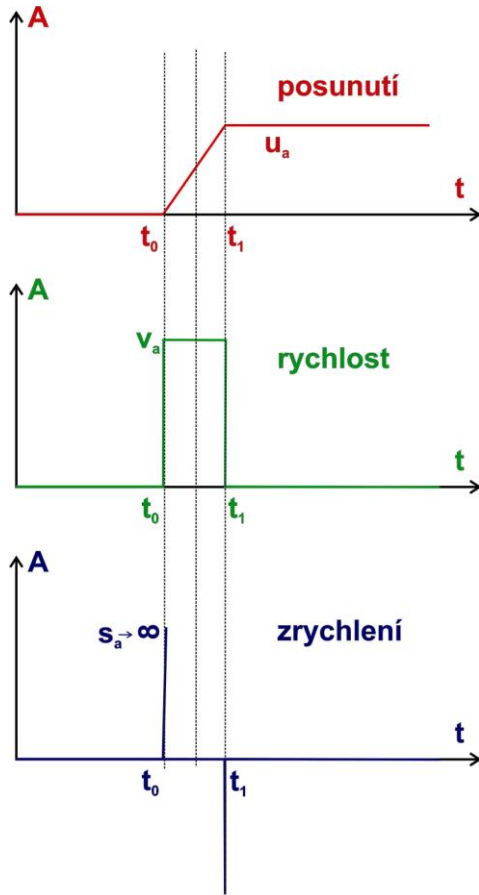


a) Ideální tvar seismické fáze

Úvahy o ideálním tvaru seismické fáze vychází z předpokladu, že seismický jev je iniciován náhlým posunutím na zlomu.



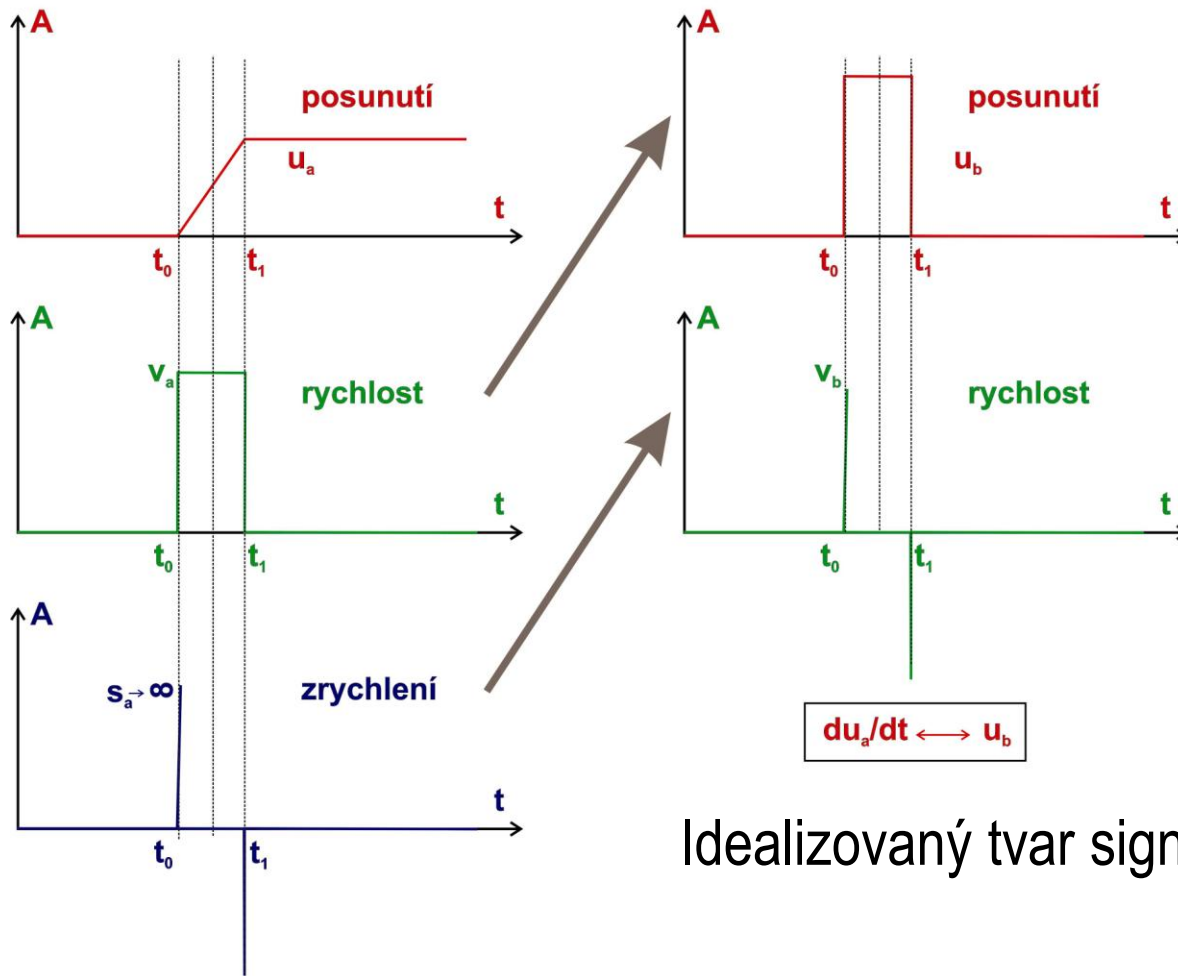
Předpokládáme-li tektonické zemětřesení způsobené posunem na zlomu, můžeme předpokládat ve zdroji jednoduché časové funkce popisující pohyb ve zdroji.



Dále od zdroje se pak časové funkce liší.

v blízkosti zdroje

daleko od zdroje

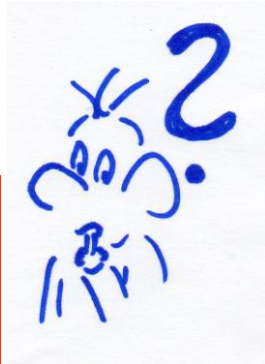


Idealizovaný tvar signálu je impuls (pík).

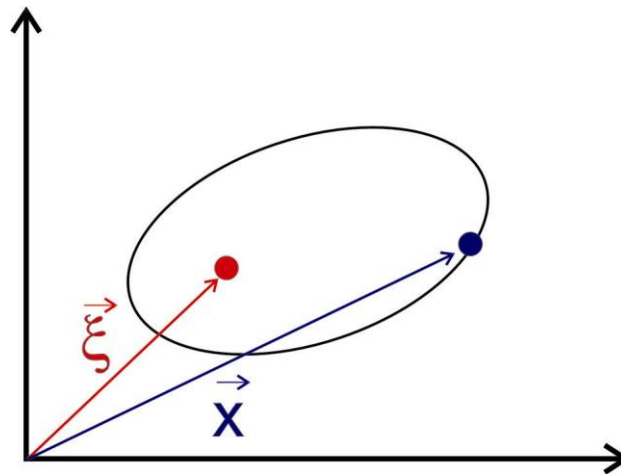


Dále od zdroje je posunutí (a tedy tvar signálu) ovlivněno nejen dynamikou a kinematikou zdroje, ale také vlastnostmi horninového prostředí. Vliv prostředí nám popisuje tzv. **greenův tenzor**.

$$u_n(\vec{x}, t) = M_{pq}(\vec{\xi}, \tau) * G_{np,q}(\vec{x}, t; \vec{\xi}, \tau)$$

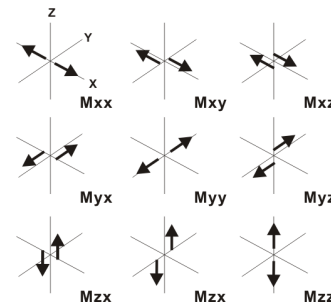
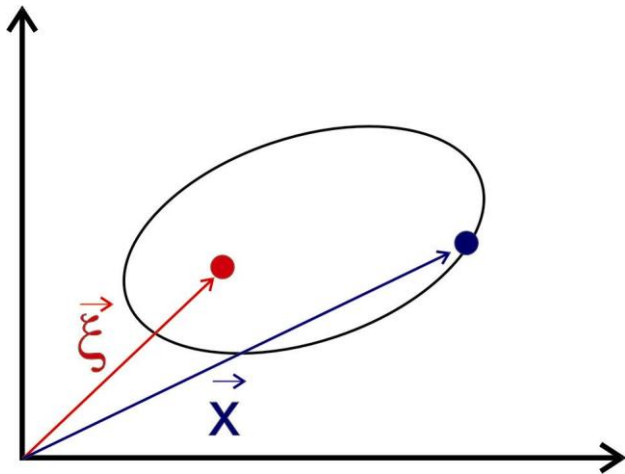


George Green
(1793-1841)



Výsledné posunutí je popisováno jako reakce na silový impuls působící v místě ξ a v čase τ , přičemž greenův tenzor popisuje odezvu prostředí na tento impuls v místě x a čase t .

$$u_n(\vec{x}, t) = M_{pq}(\vec{\xi}, \tau) * G_{np,q}(\vec{x}, t; \vec{\xi}, \tau)$$



momentový tenzor –
popisuje působící momenty sil v místě ξ a čase τ , které způsobily pohyb

greenův tenzor –
popisuje odezvu v místě x a čase t

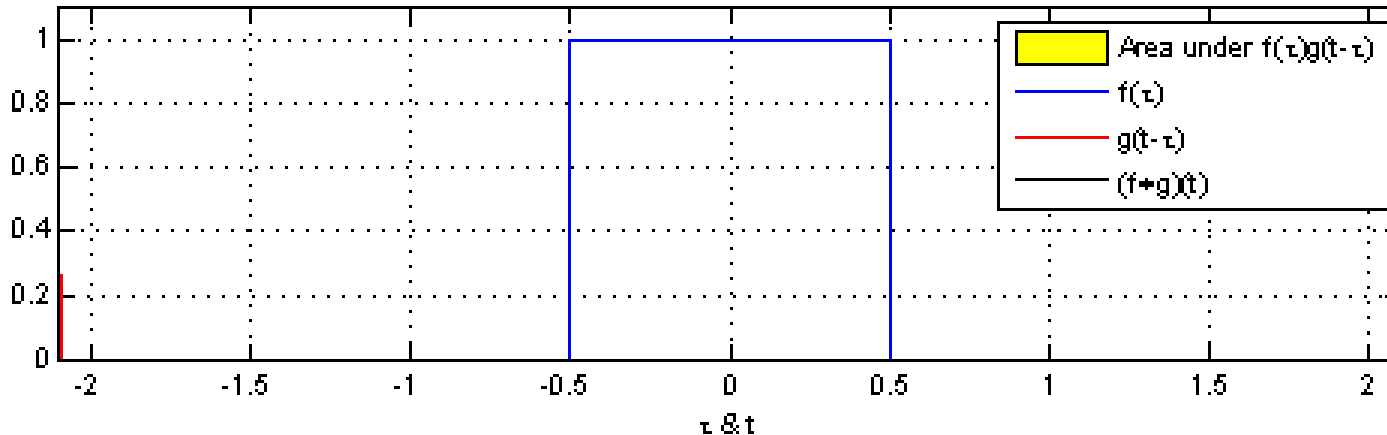
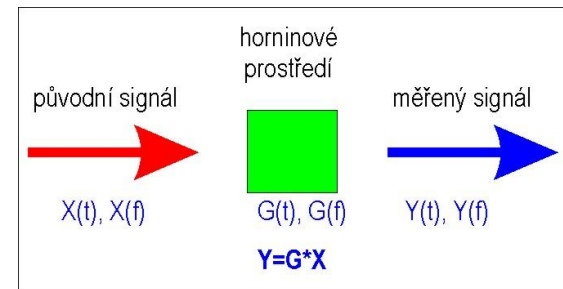


$$u_n(\vec{x}, t) = M_{pq}(\vec{\xi}, \tau) * G_{np,q}(\vec{x}, t; \vec{\xi}, \tau)$$



Operace mezi funkcemi M a G v časové oblasti je konvoluce.

$$u_n(t) = \int_{-\infty}^{\infty} M_{pq}(\alpha) \cdot G_{np,q}(t - \alpha) d\alpha$$



Při vyjádření v závislosti na frekvenci degraduje na součin.

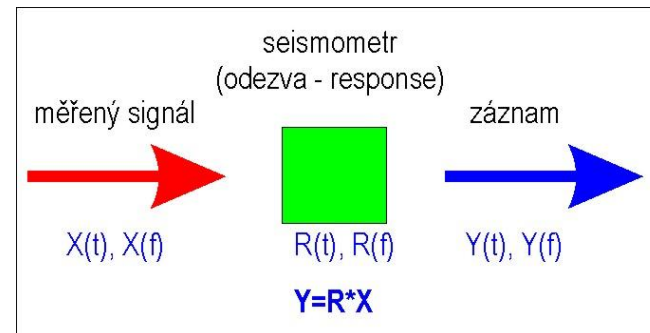
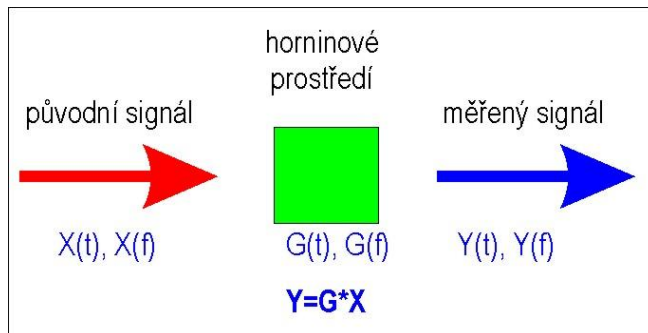


b) Funkce odezvy

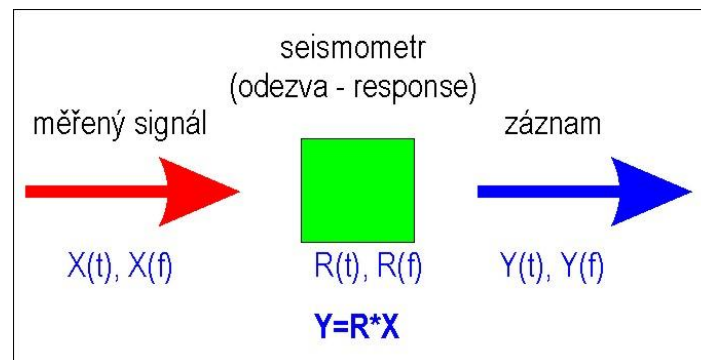
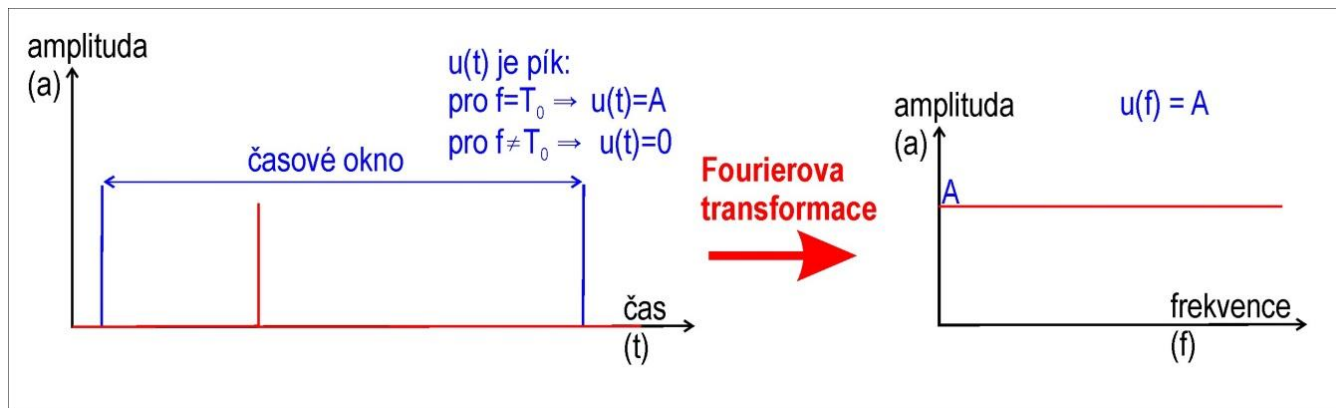
Seismický signál je ovlivněn průchodem horninovým prostředím, charakteristikou měřicího přístroje (seismometru) a dalšími vlivy. Každý vliv si můžeme vyjádřit nějakou funkcí, závislou na čase či na frekvenci, kterou nazýváme **odezva**:

$$u_I(t) = u_a(t) * g(t) * I(t)$$

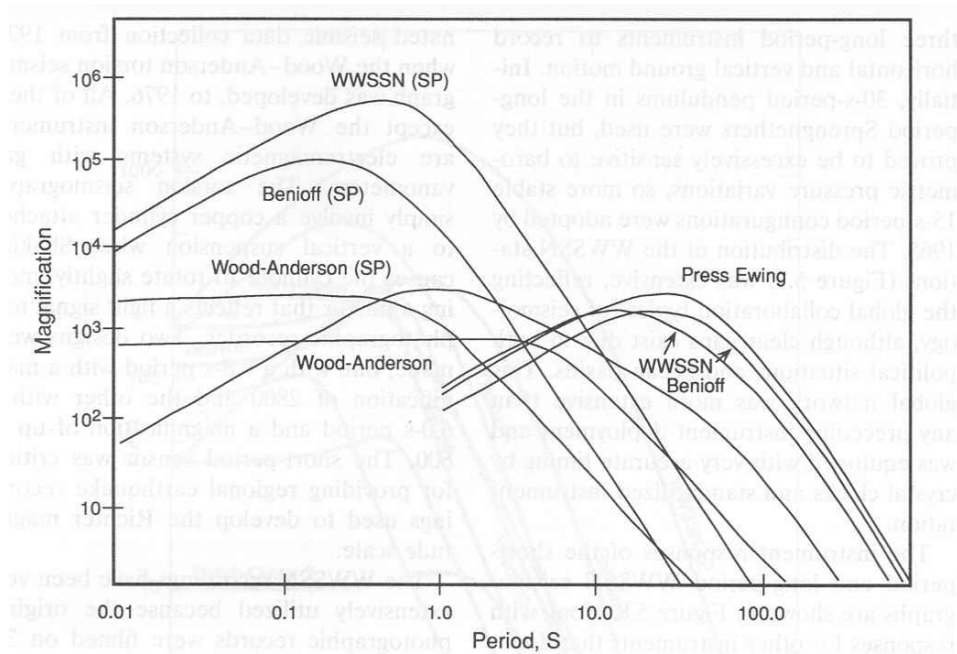
$u_I(t)$... výsledný signál; $g(t)$... vliv horninového prostředí;
 $I(t)$... vliv seismometru; $u_a(t)$... původní signál



Představme si, že seismometr registruje pík o jednotkové amplitudě. Ve frekvenční závislosti je takový signál popsán funkcí, která všem frekvencím přiřazuje hodnotu 1. Součin $Y(f)=(Rf).X(f)$ se tedy mění na $Y(f)=(Rf).1=R(f)$, tj. záznam bude totožný s funkcí popisující odezvu.

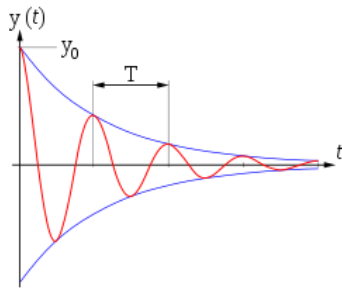


$Y(f)=(Rf).X(f)$... Křivka popisující odezvu udává, kolikrát je určitá frekvenční část původního signálu ve výsledném záznamu zesílena (respektive zeslabena) – nazývá se proto **křivka zvětšení**. Seismometr registruje různé frekvence s různým zesílením.



c) Útlum

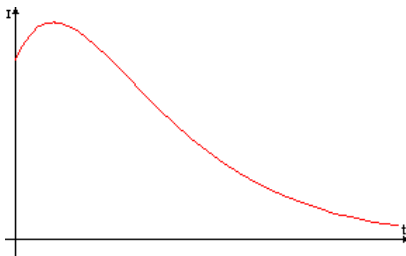
Horninové prostředí se chová elasticky a impuls vede k tlumeným kmitům částic kontinua (δ – součinitel tlumení).



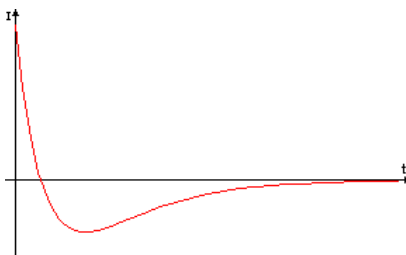
$$u(t) = A_0 e^{-\delta t} \sin(\omega_t \cdot t + \varphi_0)$$

$$A = A_0 e^{-\delta t}$$

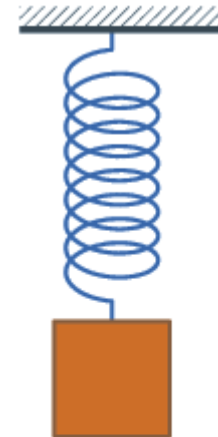
podkritický útlum



kritický útlum



nadkritický útlum



Pro charakteristiku útlumu je široce používána veličina Q (quality factor):

$$Q = \frac{\pi}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

$$A(t) = A_0 e^{-\frac{\pi f t}{Q}}$$

$$A(x) = A_0 e^{-\frac{\pi f}{Q_v} \cdot x}$$

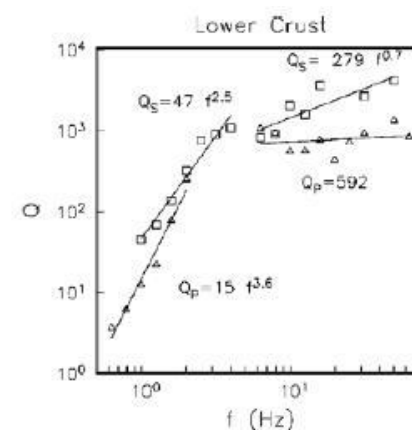
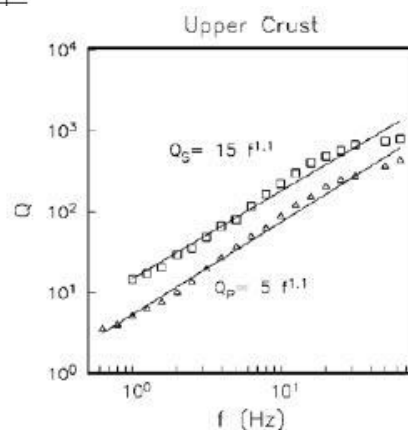
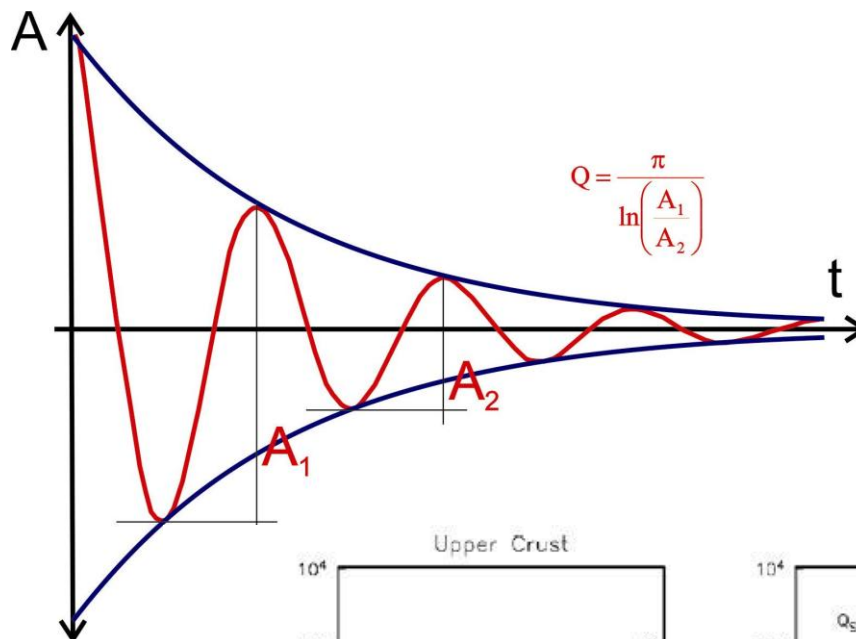
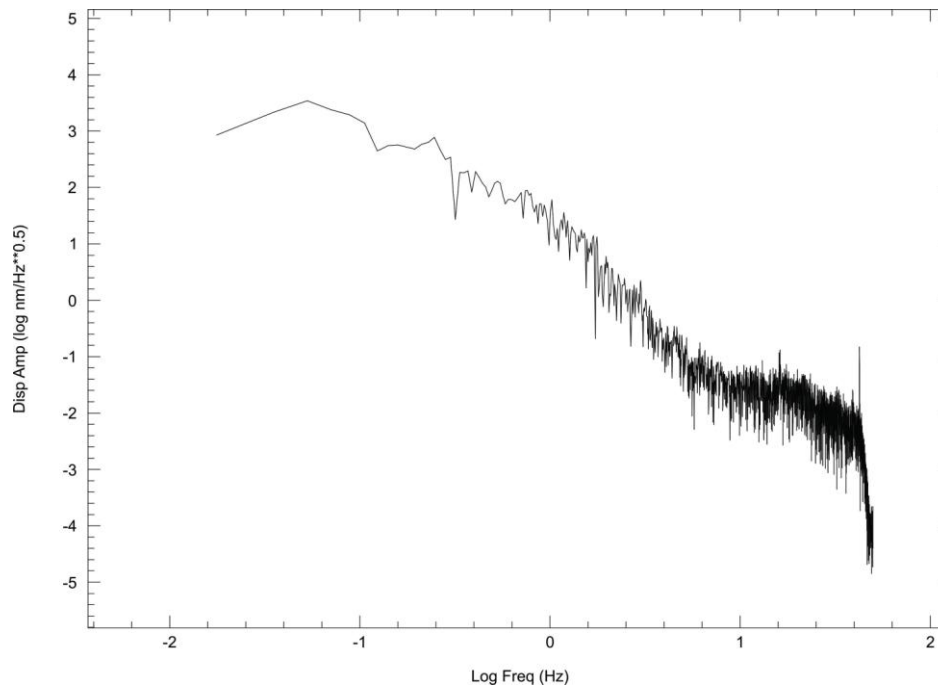


Fig. 4. Total Q estimated using a 2-layer model. Left frame correspond to the first 23-25 km of the crust and the right frame to the next 25 km. Triangles correspond to P waves (Q_p) and squares to S waves (Q_s). The lines are the least-squares fit obtained with the estimates of Q shown.

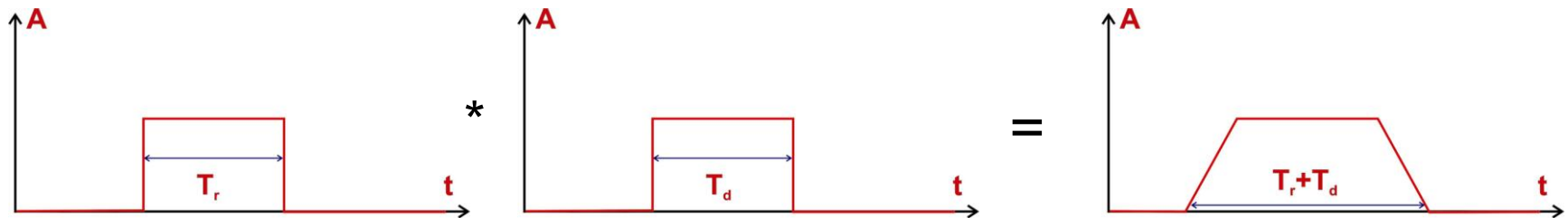
d) Spektrum přirozeného zemětřesení

Spektrum zemětřesení ukazuje, že různé frekvence se na seismickém signálu vzdáleného zemětřesení podílejí různou mírou. Typický je pokles amplitudy ve spektru s rostoucí frekvencí.



Spektrum signálu závisí na zdrojové funkci. Ta je přitom v případě přirozených zemětřesení spojených s prokluzy na zlomové ploše dána parametry charakterizujícími časový průběh ruptury.

Uvažujeme-li pulzní charakter pohybu na zdroji a obdélníkový tvar zdrojových funkcí popisujících šíření ruptury (T_r je doba potřebná pro vytvoření ruptury) a pohyb podél zlomu (T_d je doba potřebná k posunutí na zlomu v jednom bodě ruptury), pak je celková zdrojová funkce charakterizována lichoběžníkem.

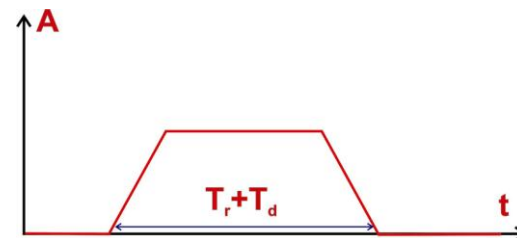


S využitím Fourierovy transformace si pak zdrojovou funkci můžeme vyjádřit jako funkci frekvence:

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



kde M_0 je seismický moment, T_r je doba potřebná pro vytvoření ruptury, T_d je doba potřebná k posunutí na zlomu v jednom bodě ruptury

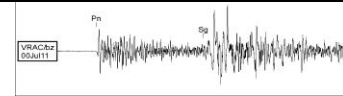


Na daném vztahu je důležité, že pro frekvence nižší než $2/T_r$, respektive nižší než $2/T_d$, nabývají výrazy $|\sin(f.T/2)/(f.T/2)|$ hodnoty blízké hodnotě 1.

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

pro f menší než $2/T_r$ lze výraz položit roven jedné

pro f menší než $2/T_d$ lze výraz položit roven jedné



Ve spektru zdrojové funkce pak lze rozlišit tři oblasti:

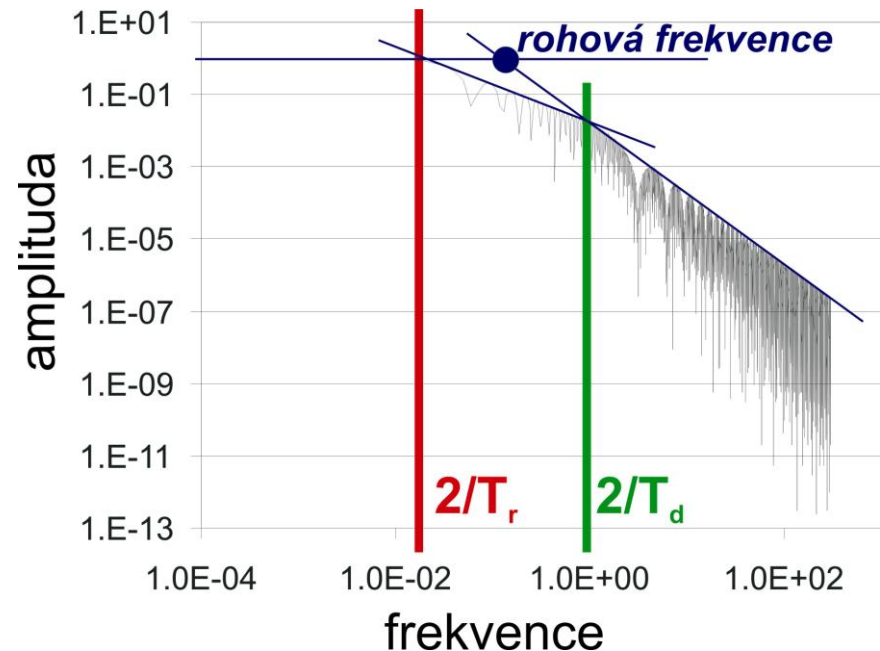
$f < 2/T_r$... spektrum je ploché a jeho amplituda odpovídá hodnotě seismického momentu M_0

$2/T_r < f < 2/T_d$... spektrum má s rostoucí frekvencí klesající tendenci úměrnou hodnotě $1/f$

$f < 2/T_d$... spektrum má s rostoucí frekvencí klesající tendenci úměrnou hodnotě $1/f^2$

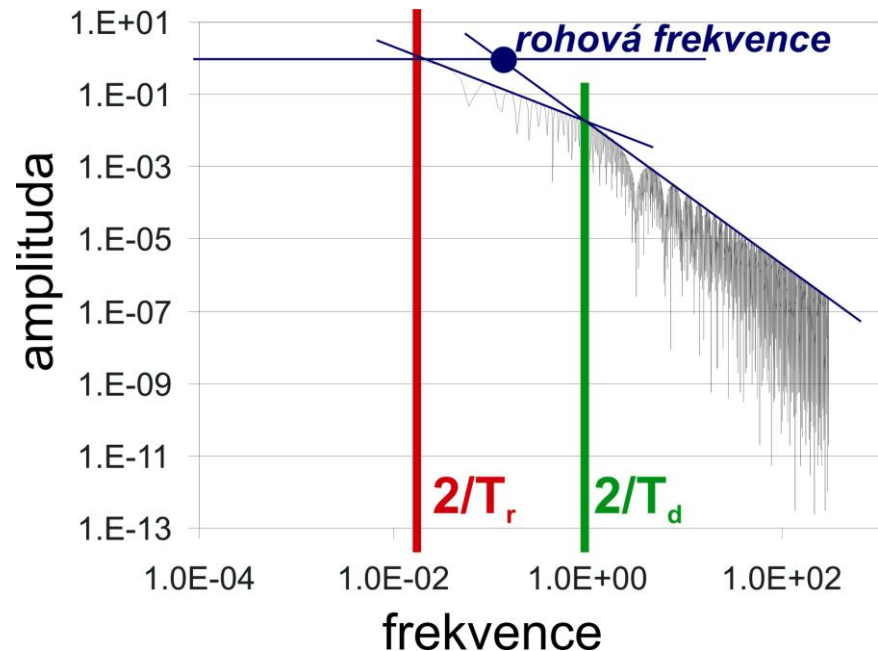
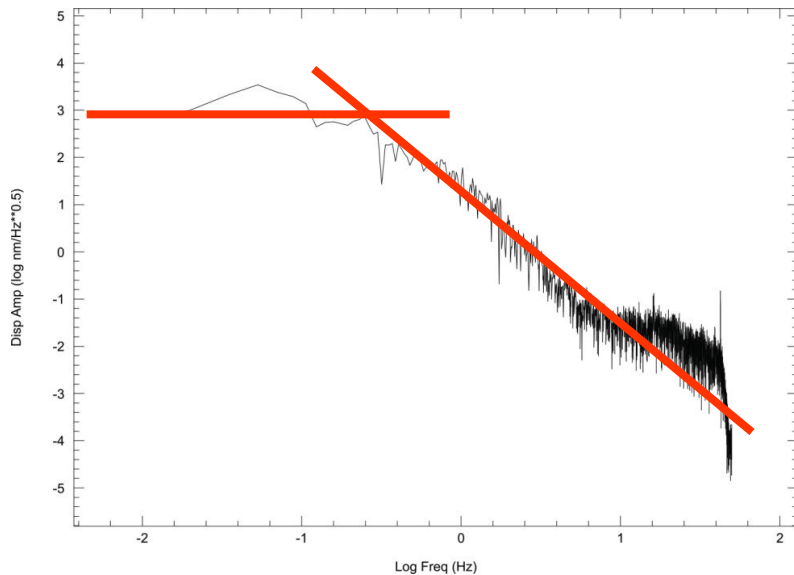


$$A(f) = M_0 \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{f \cdot T_r}{2}\right)}{\frac{f \cdot T_r}{2}} \right| \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{f \cdot T_d}{2}\right)}{\frac{f \cdot T_d}{2}} \right|$$



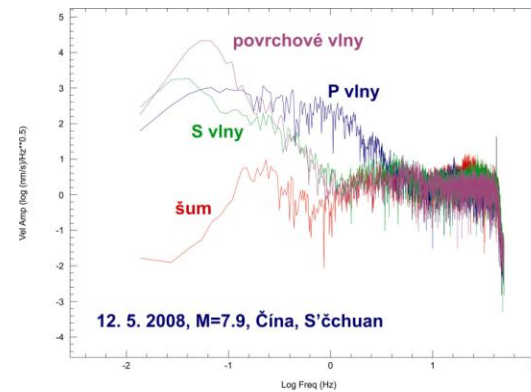
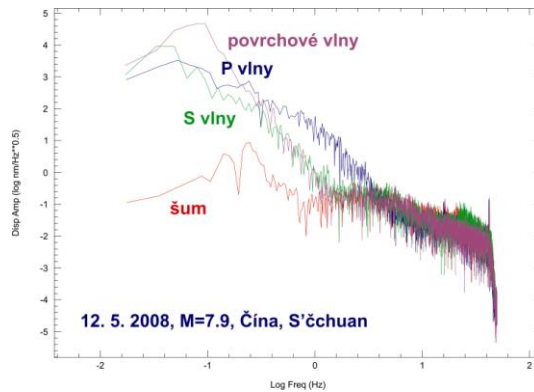
Ve spektru signálu spojeného se zemětřesením tak můžeme rozlišit plochou část pro nižší frekvence a ukloněnou část vyšších frekvencí. Frekvenci, při které se mění charakter spektra z plochého na ukloněný, nazýváme **rohovou frekvencí**.

Hodnota rohové frekvence závisí na době šíření ruptury a je tedy závislá také na velikosti porušené zóny či velikosti uvolněné energie.



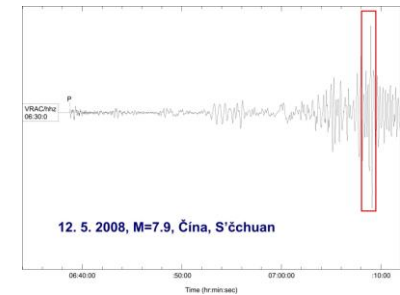
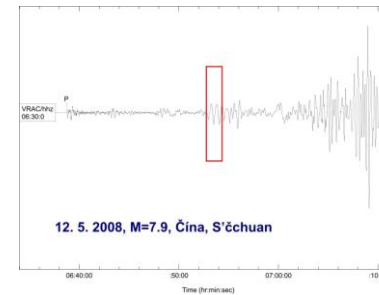
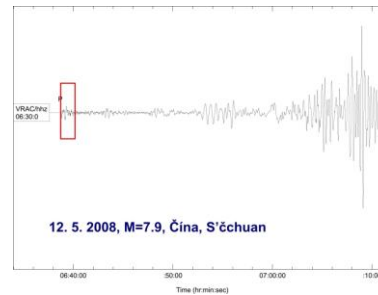
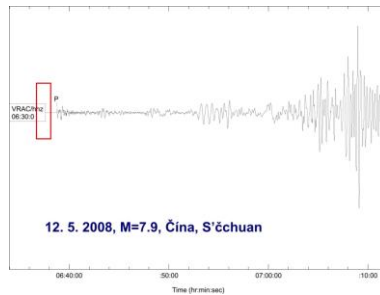
Spektrum signálu se tedy liší také pro různé seismické fáze.

U vzdálených jevů lze například pozorovat převládající frekvence kolem 1 Hz pro podélné vlny, a převládající frekvence řádově desítek Hz pro vlny povrchové.



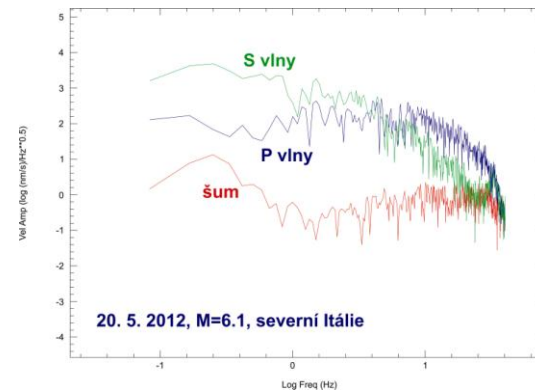
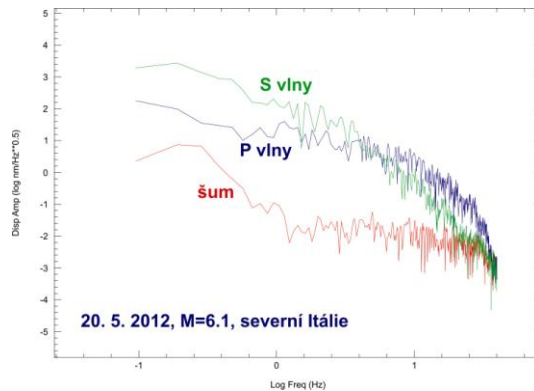
posunutí

rychlost



Spektrum signálu se tedy liší také pro různé seismické fáze.

U regionálních jevů lze pozorovat, že v případě objemových vln převládají frekvence o velikosti řádově jednotek až prvních desítek Hz.



posunutí

rychlost

