

Zpracování seismických dat

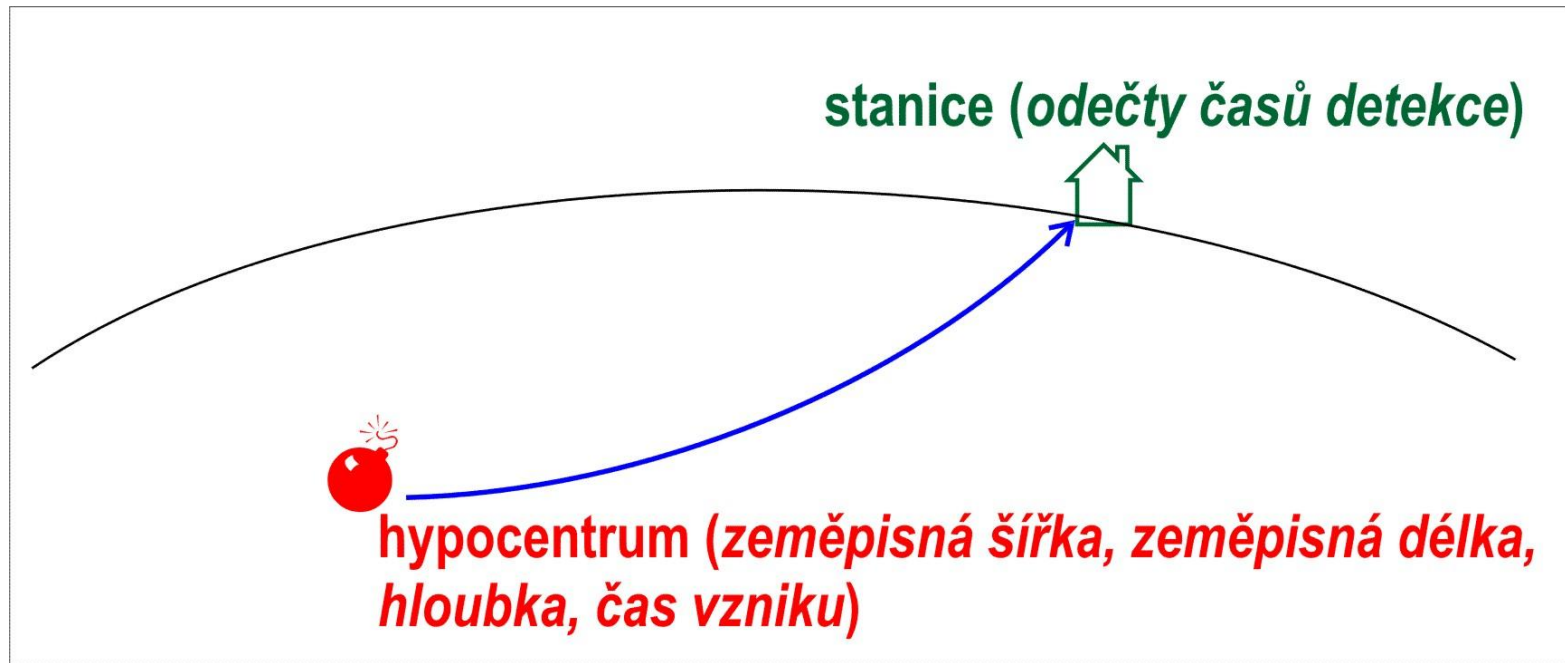
část C: Parametry zdroje

VII. Lokace seismického jevu

Josef Havíř
havir@ipe.muni.cz

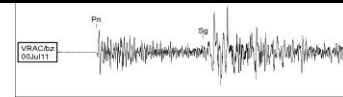
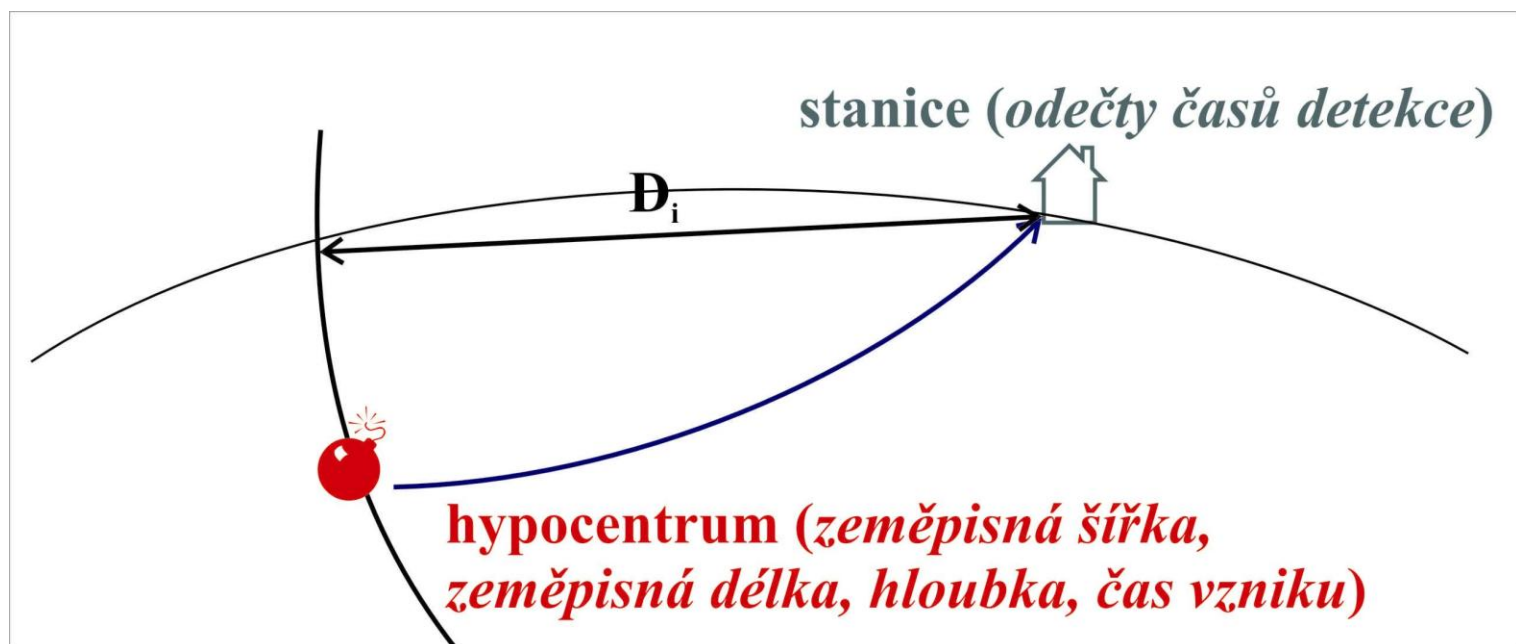


Lokalizací seismického jevu se rozumí určení alespoň tří parametrů, které definují souřadnice hypocentra, a případně určení také čtvrtého parametru definujícího čas vzniku daného jevu.

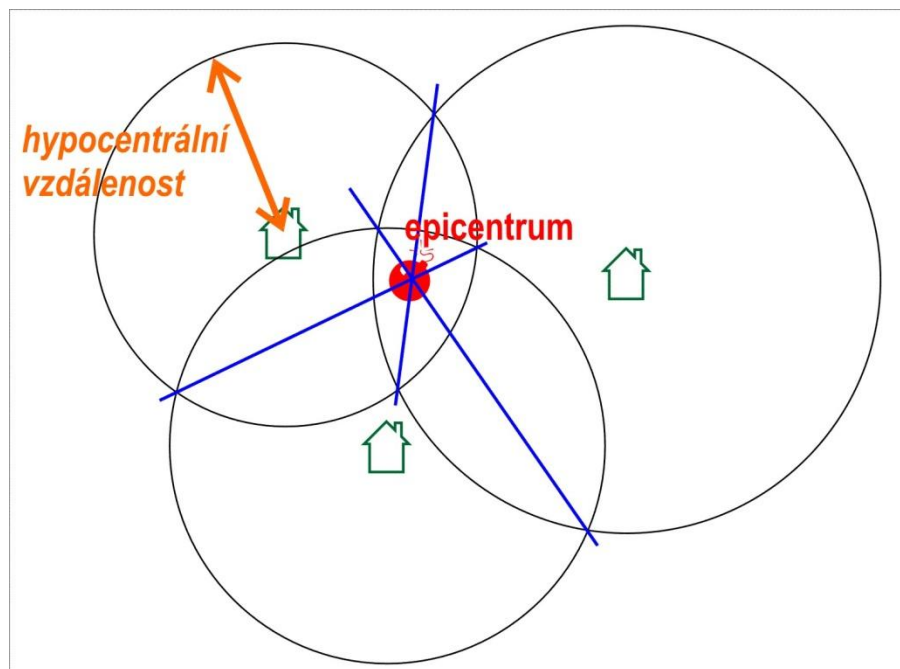


a) Metoda kružnic

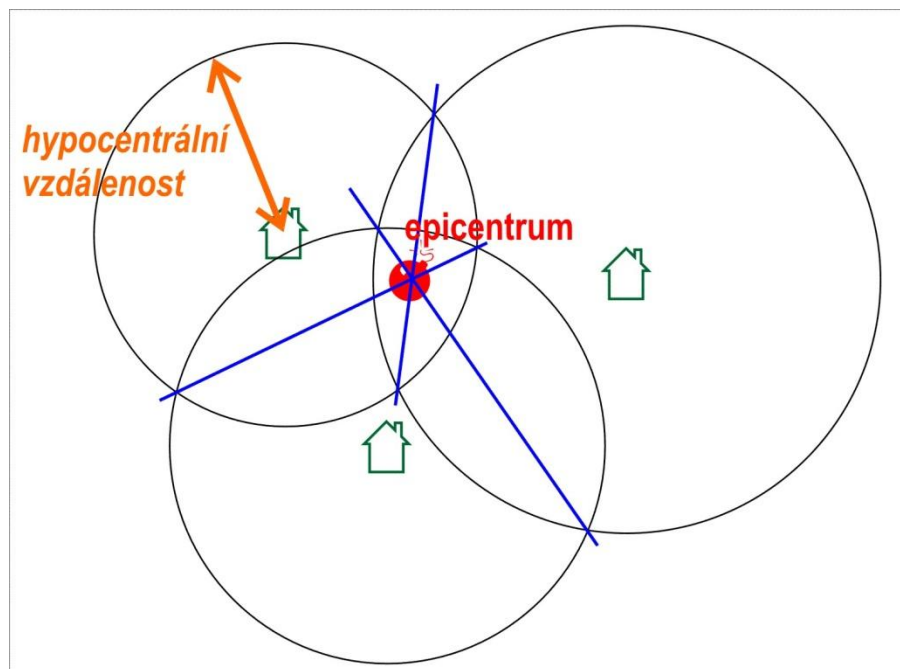
Hypocentrum by mělo ležet na polokouli, jejíž střed je dán stanicí a poloměr D_i je roven vzdálenosti mezi stanicí a hypocentrem. Vzdálenost D_i lze přitom pro každou ze stanic určit z rozdílu časů detekce P a S vln.



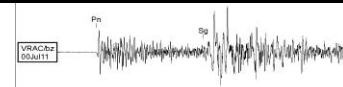
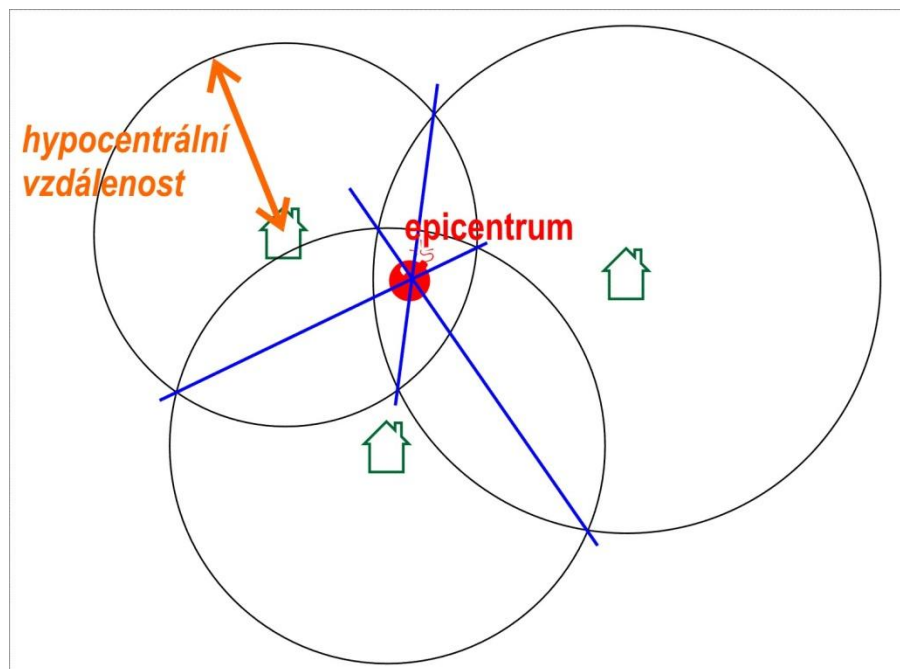
Je-li k dispozici více stanic, mělo by hypocentrum ležet na průsečíku příslušných polokoulí sestrojených kolem všech stanic.



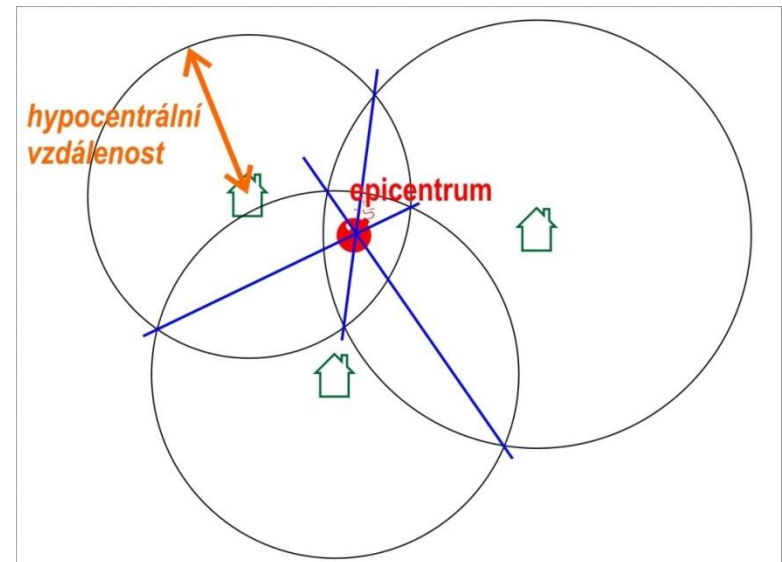
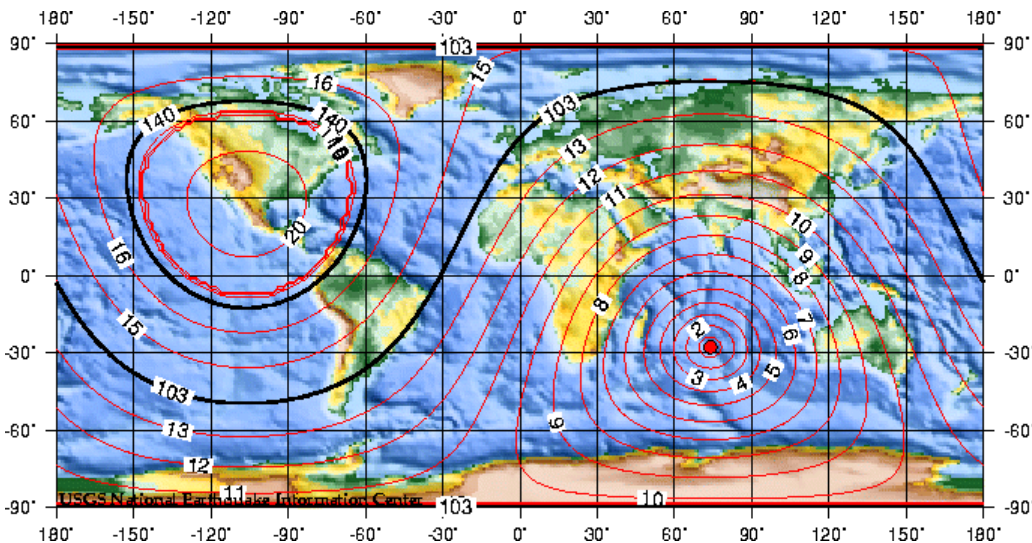
V ideálním případě se při minimálním počtu tří koulí (tři různých stanic) protínají povrchy koulí v jediném bodě – v hypocentru. Na tomto předpokladu je založená jednoduchá grafická metoda lokalizace, tzv. **metoda kružnic**.



Kolem stanic sestrojíme kružnice o poloměrech odpovídajících hypocentrální vzdálenosti. Každé dvě kružnice by se měly protínat ve dvou bodech. Spojíme-li vždy tyto dva průsečíky kružnic úsečkou, pak se všechny takto sestrojené úsečky protnou v jediném bodě – epicentru.

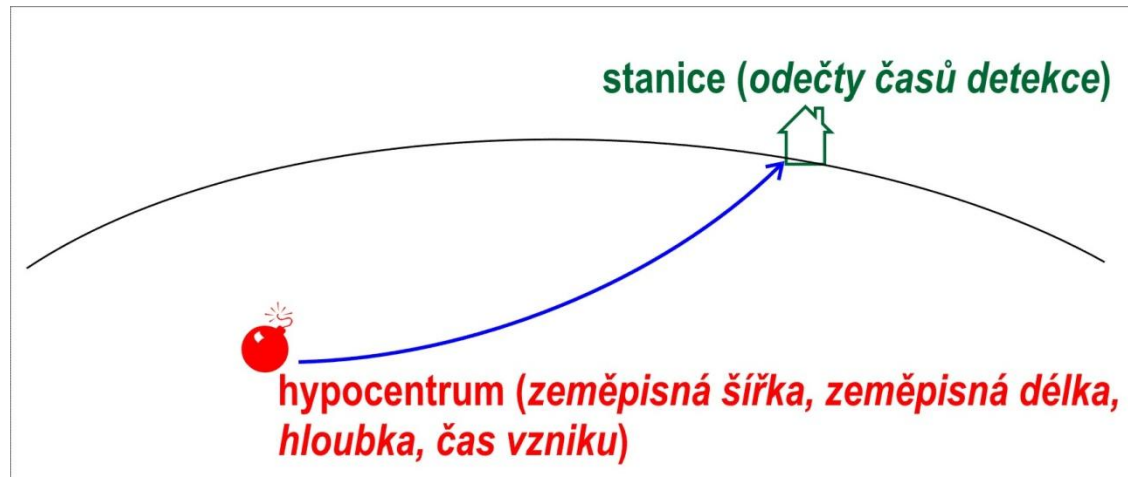


U vzdálených zemětřesení hraje významnou roli také zakřivení zemského povrchu – zjednodušená představa stanic umístěných v rovné ploše pak vede ke značnému zkreslení výsledku lokalizace. Při aplikaci metody pro lokalizaci vzdálených otřesů je nutné zakřivení zemského povrchu zohlednit.

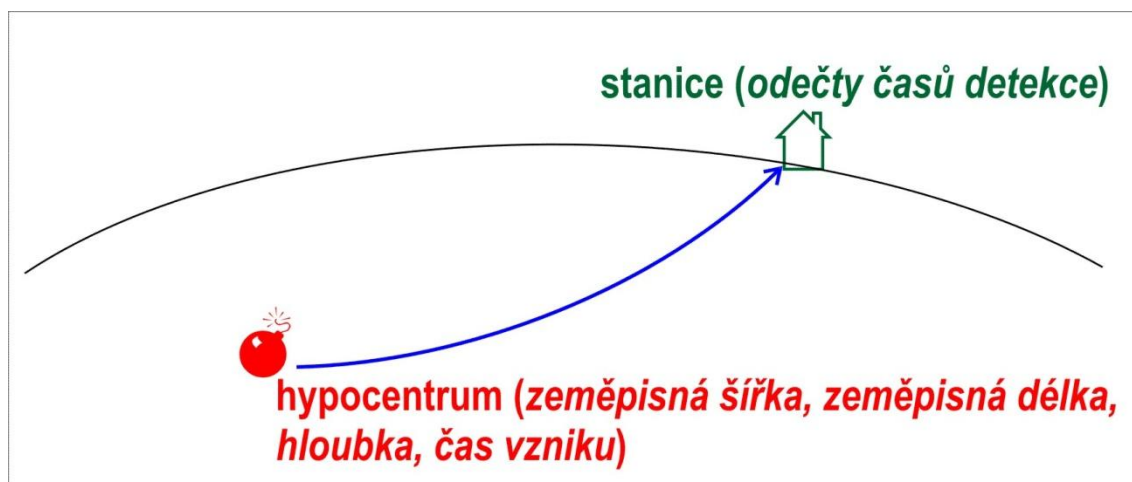


b) Geigerova metoda

Cílem výpočtů lokace hypocentra je zjistit čtyři parametry: zeměpisnou šířku, zeměpisnou délku a hloubku hypocentra a čas vzniku jevu.



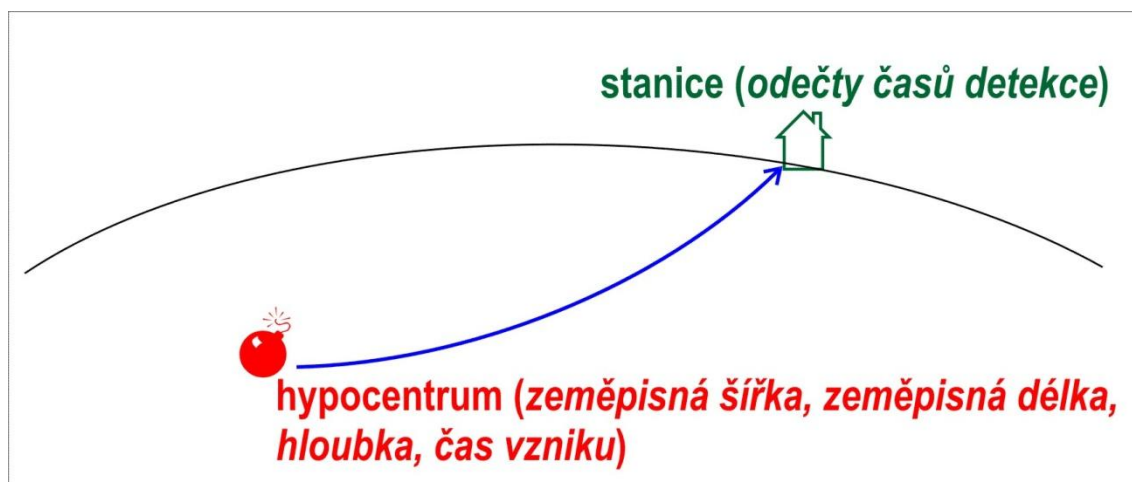
Pokud známe všechny čtyři parametry lokalizace a pokud známe model prostředí, kterým se šíří seismické vlny, můžeme i pro složité modely zkonstruovat dráhy paprsků od hypocentra ke stanicím a vypočítat ideální časy, v nichž by měly být na jednotlivých stanicích zaznamenány příchody jednotlivých seismických fází (přímá úloha).



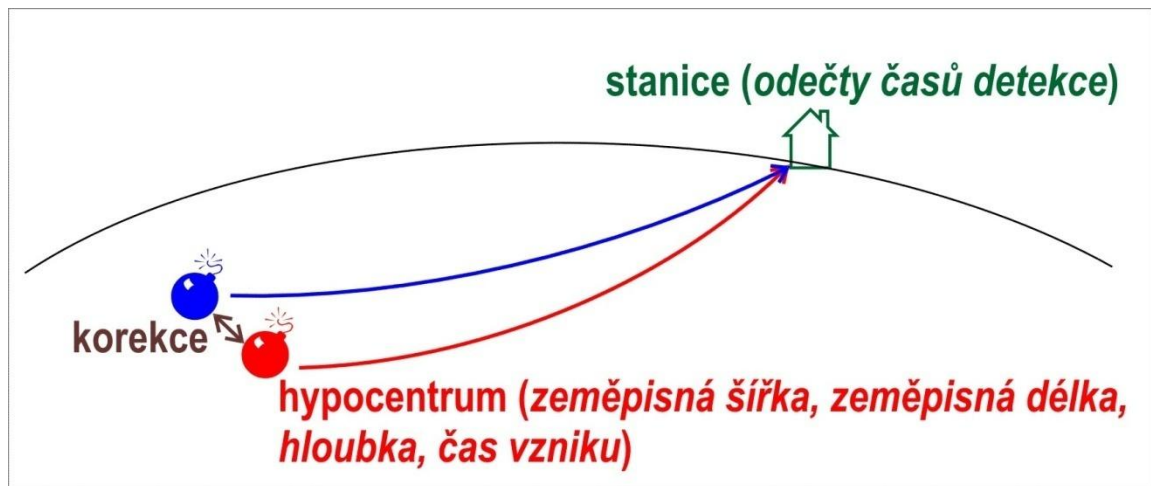
Vztah mezi parametry lokalizace a odečty časů seismických vln na stanicích je nelineární a lze jej popsat následující rovnicí:

$$t_i = t + \frac{\sqrt{(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2}}{v}$$

Proto nelze jednoduše přímo spočítat parametrů lokalizace z měřených časů detekce (obrácená úloha).

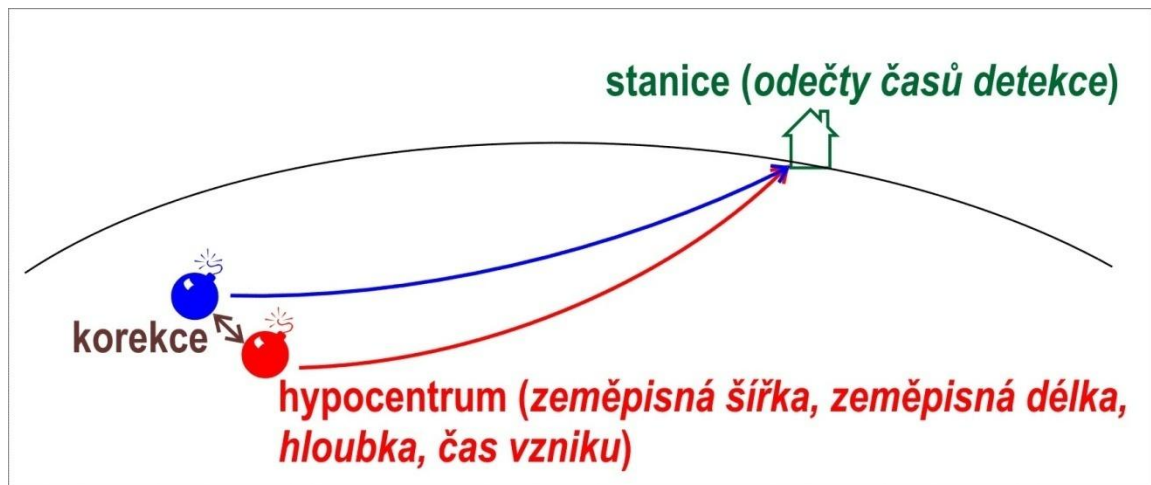


Snadno lze ale spočítat rozdíly mezi měřenými časy a časy vypočtenými pro konkrétní parametry lokalizace. Lokalizovat pak znamená hledat takové parametry lokalizace, aby zmíněné rozdíly byly co nejmenší. Výpočetní technika umožňuje použít i složitější matematické postupy, které vedou co nejrychleji k co nejsprávnějšímu řešení.

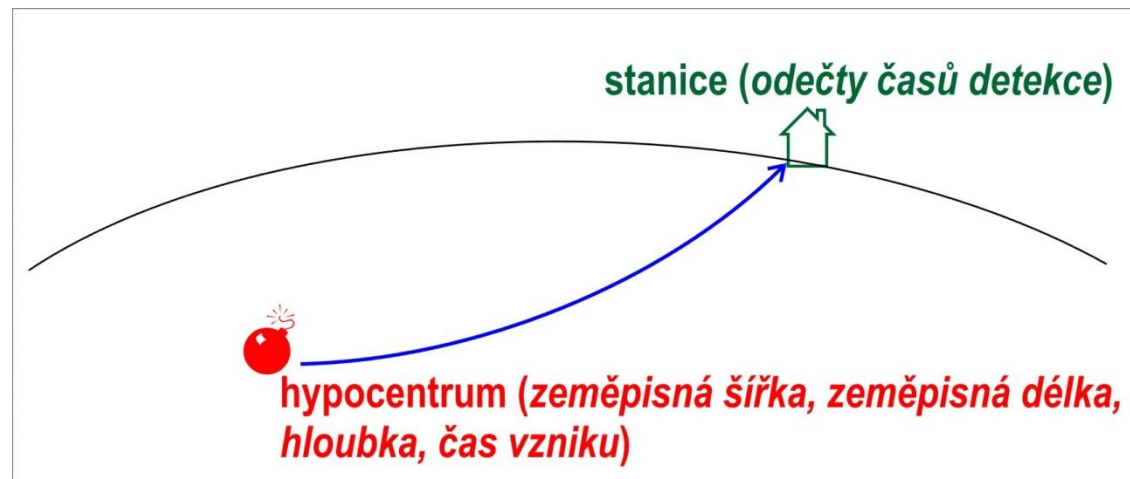


Relativně snadno lze pomocí aplikace metody nejmenších čtverců spočítat korekce všech čtyř parametrů lokalizace, které udávají, jak posunout předpokládané hypocentrum, aby lépe odpovídalo měřeným datům. Z nově získané předpokládané lokalizace lze opět spočítat korekce a opět zpřesnit lokalizaci hypocentra.

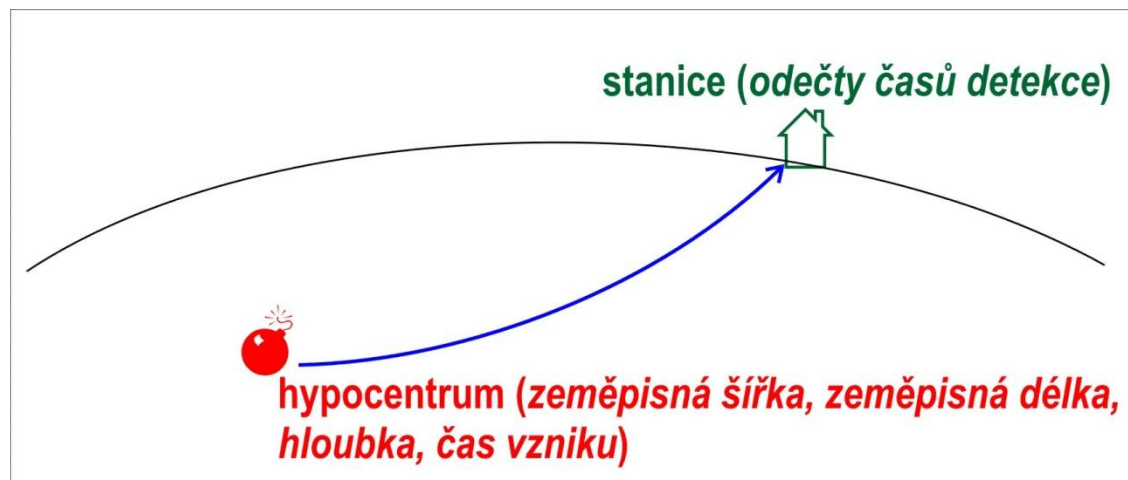
Stanovíme-li nějaké vstupní parametry řešení, můžeme aplikovat následující kroky:



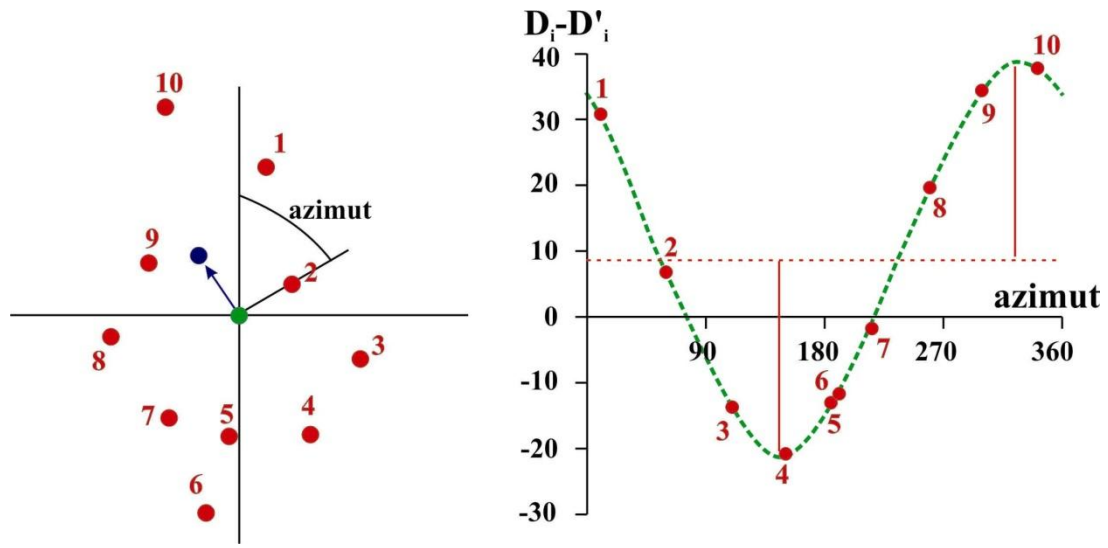
1. Spočítat předpokládané časy detekcí seismických vln t_i na jednotlivých stanicích a určit vzdálenosti D_i mezi stanicemi a předpokládaným epicentrem.



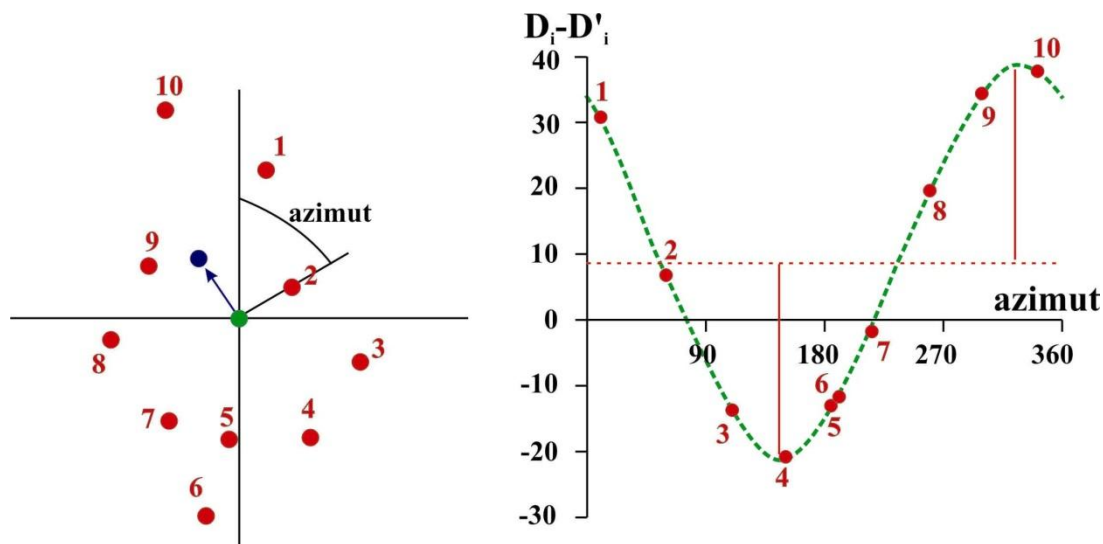
2. Spočítat na základě skutečně pozorovaných časů detekcí seismických vln t_i na jednotlivých stanicích ideální vzdálenosti D_i mezi stanicemi a předpokládaným epicentrem.



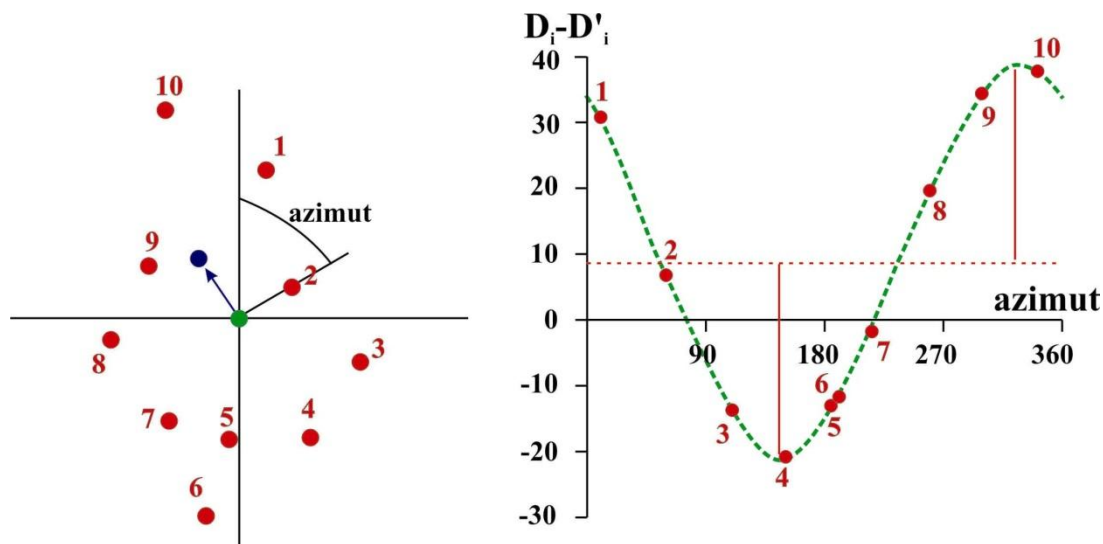
3. Sestrojit graf rozdílů $D_i - D'_i$ v závislosti na azimutu spojnice mezi epicentrem a stanicí. Je-li epicentrum určeno přesně, jsou tyto rozdíly ideálně rovny nule. V opačném případě tvoří spojnice vynesných bodů v tomto sestaveném grafu sinusoidu, jejíž maximum a minimum ukazuje na azimut, kterým je nutné posunout epicentrum, aby řešení vykazovalo menší chyby.



4. Opravit čas vzniku jevu podle průměrné odchylky mezi předpokládanými a skutečně pozorovanými časy detekce seismických vln; opravit polohu epicentra ve směru daném sinusoidou grafu $D_i - D'_i$ versus azimut, a to o vzdálenost danou amplitudou sinusoidy.



5. Nově odvozené řešení použít jako startovací model a opakovat znovu celou proceduru, dokud odchylky mezi předpokladem a pozorováním nebudou dostatečně malé.

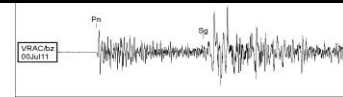
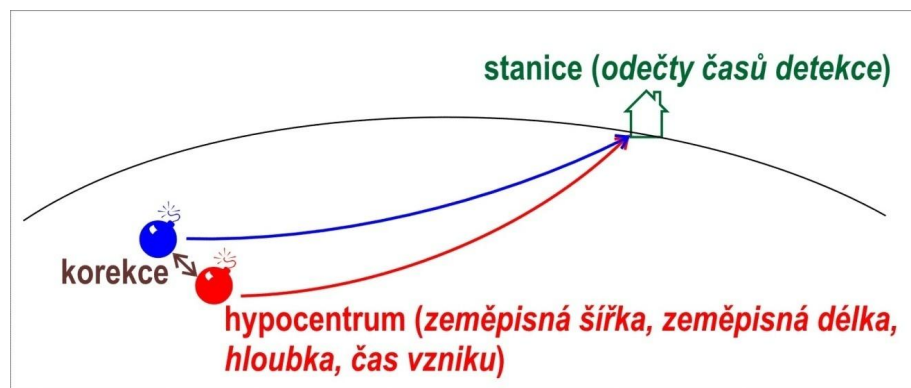


Celý proces se neustále opakuje. Je-li řešení stabilní velikost korekce se zmenšuje a po konečném (nepříliš velkém) počtu kroků (iterací) klesnou hodnoty korekcí pod určitou předem stanovenou mez.

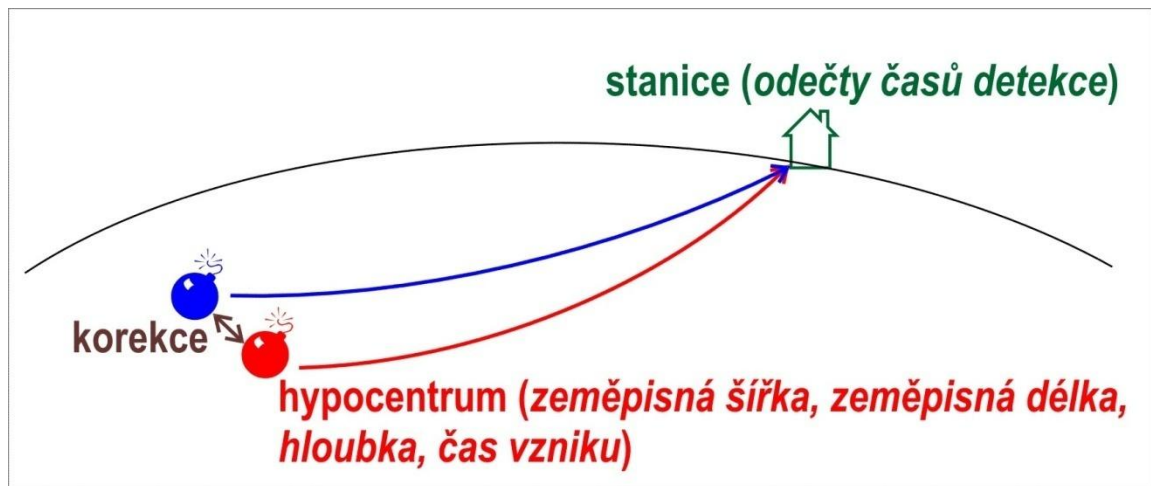
Každou iteraci lze chápat také jako hledání minimalizace chyby e :

$$e = \sum (T_i - T'_i)^2$$

kde T_i jsou skutečně pozorované a T'_i vypočítané časy příchodů seismické fáze na i -tou stanici.



Popsaná numerická metoda lokalizace byla poprvé navržena v roce 1910 Geigerem (prakticky byla ale využívána až s nástupem výpočetní techniky po roce 1960) a označuje se proto jako **Geigerova metoda**.

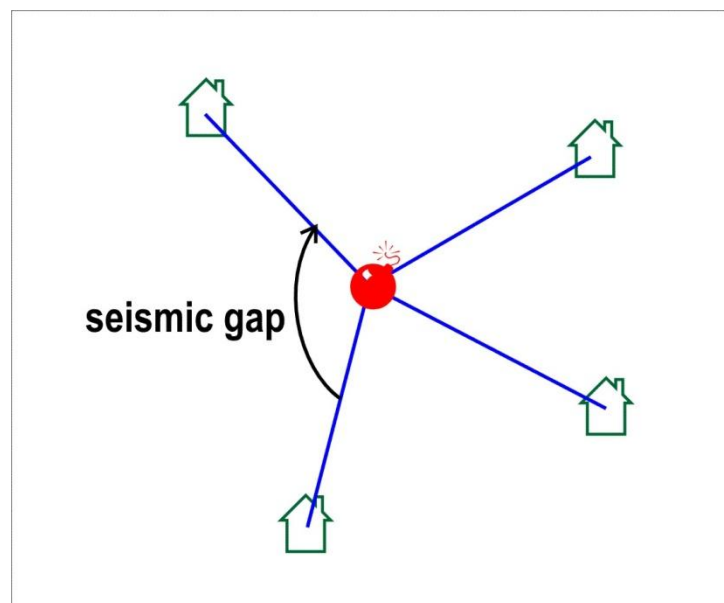
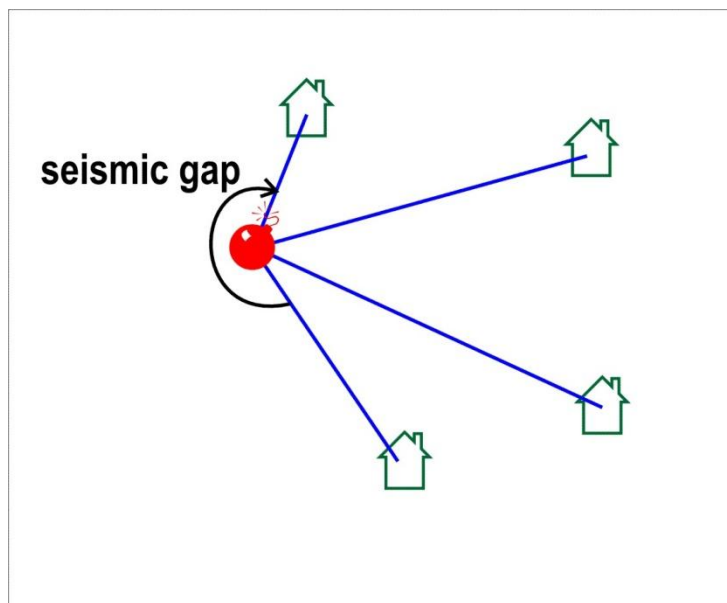


Ludwig Carl Geiger
(1882-1966)

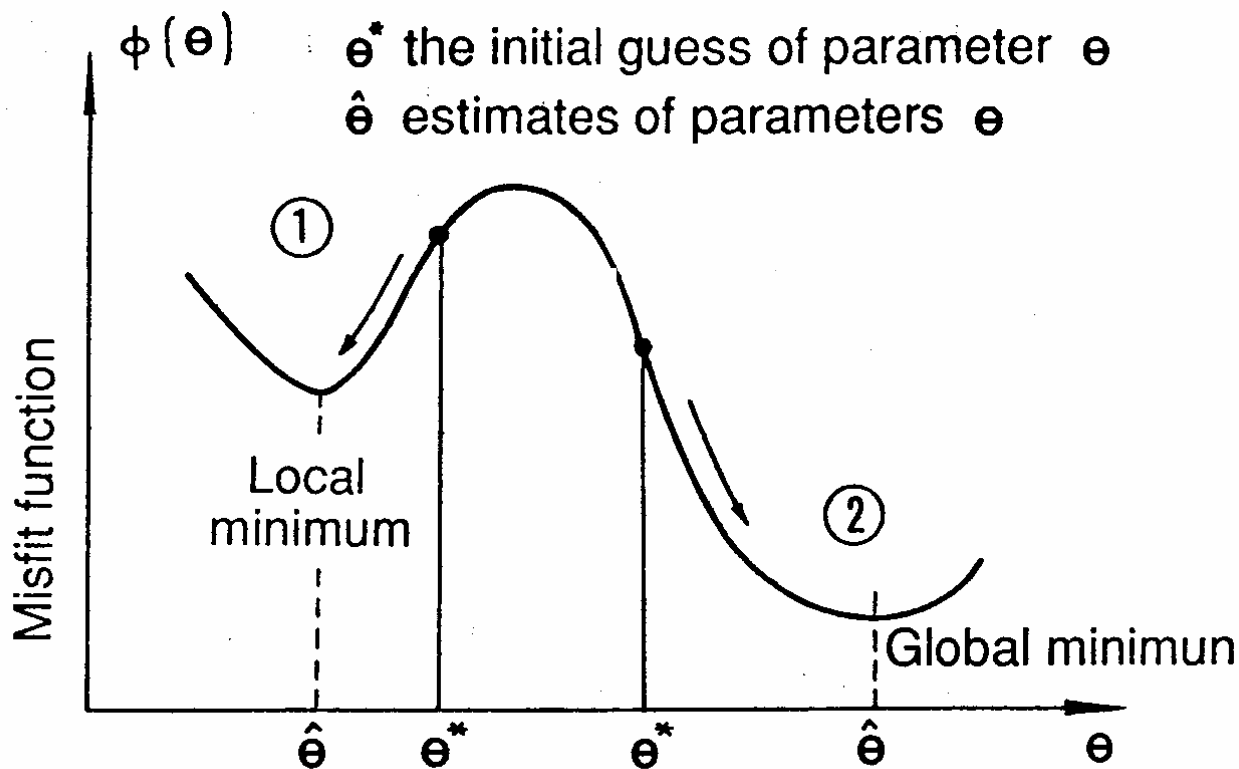


Geigerova metoda je citlivá na velikosti tzv. „**seismic gap**“ – největšího úhlu svíraného spojnicemi stanic a epicentra. Metoda je dostatečně přesná, pokud hodnota seismic-gap nepřesáhne 200° (pokud epicentrum leží uvnitř sítě stanic).

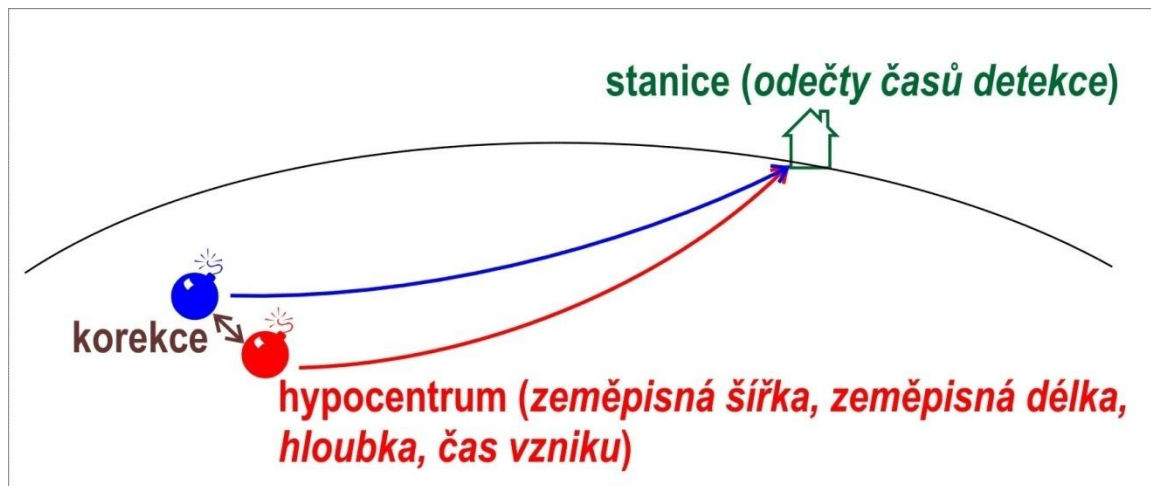
Pokud hodnota seismic-gap přesáhne 200° (pokud epicentrum leží zřetelně mimo síť stanic), je proces lokalizace Geigerovou metodou velmi nestabilní.



V závislosti na vstupních parametrech zdroje a na geometrie sítě (ve vztahu ke skutečné lokaci hypocentra) může minimalizace geigerovou metodou směřovat k lokálnímu minimu (a tím k chybné lokaci).

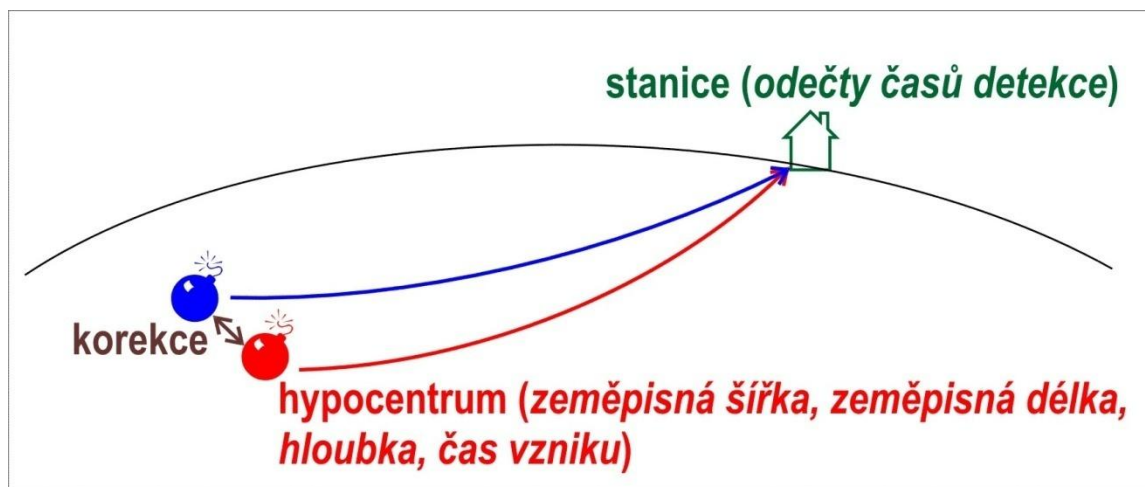


Lokalizace – tj. nalezení čtyř parametrů – vyžaduje teoreticky alespoň čtyři vstupní údaje. Na jedné stanici jsou ale obvykle odečteny alespoň dva časy – detekce podélné a detekce příčné vlny. Lokalizace je tedy teoreticky možná, pokud máme údaje alespoň ze dvou stanic.



Lokalizace ze dvou stanic je ale značně nepřesná a nejednoznačná, proces lokalizace bývá často ukončen v lokálním minimu funkce, které je zásadně rozdílné od skutečné pozice epicentra.

Pro odstranění nejednoznačností je zapotřebí údajů z alespoň tří stanic.



c) Relativní lokalizace jevu (metoda „master event“)

V klastru jevů s epicentry v jednom regionu je výhodnější využít některou z metod tzv. relativní lokace seismického jevu. Příkladem je metoda „master event“

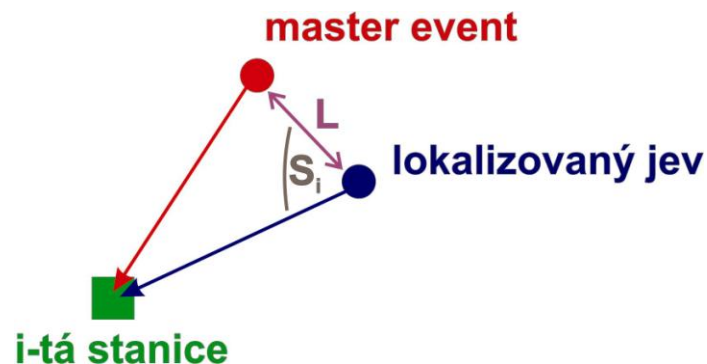
Poloha hypocentra je v tomto případě hledána „relativně“ vůči poloze nějakého předem daného jevu („master event“). Absolutní přesnost lokace závisí na správnosti určení polohy hypocentra a času vzniku „master“ eventu. Metoda však umožňuje dosáhnout výrazně menších chyb v určení relativních poloh mezi jednotlivými lokalizovanými jevy.

Podmínkou je, že poloha hypocenter lokalizovaných jevů musí být blízká poloze hypocentra „master“ eventu.



Metoda „master event“ vychází ze základního vztahu:

$$T_i - T_{iM} = T_0 - \left(\frac{L \cdot \cos(S_i)}{v} \right)$$

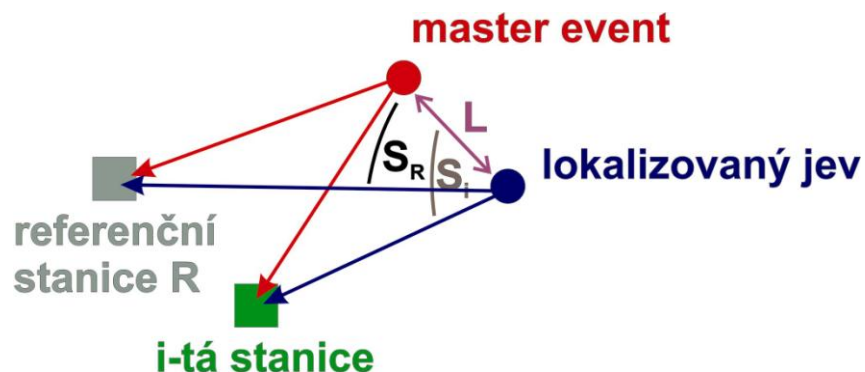


kde T_i je pozorovaný čas příchodu seismické fáze lokalizovaného jevu na i -tou stanici, T_{iM} je čas příchodu seismické fáze „master“ eventu na i -tou stanici, T_0 je rozdíl mezi časy vzniku „master“ eventu a lokalizovaného jevu, L je vzdálenost mezi „master“ eventem a lokalizovaným jevem, S_i je úhel svíraný spojnicí zdrojů „master“ eventu a lokalizovaného jevu s paprskem vedoucím od lokalizovaného jevu k i -té stanici a v je rychlost příslušné seismické fáze.

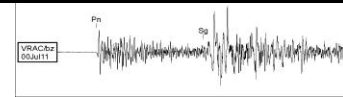


Zavedeme-li referenční stanici R, můžeme pro tuto stanici vztah přepsat do formy:

$$T_R - T_{RM} = T_0 - \left(\frac{L \cdot \cos(S_R)}{v} \right)$$



kde T_R je pozorovaný čas příchodu seismické fáze lokalizovaného jevu na referenční stanici, T_{RM} je čas příchodu seismické fáze „master“ eventu na referenční stanici a S_R je úhel svíraný spojnicí zdrojů „master“ eventu a lokalizovaného jevu s paprskem vedoucím od lokalizovaného jevu k referenční stanici.



Když pak odečteme od levé i pravé strany rovnice pro i-tou stanici příslušné strany rovnice pro referenční stanici, dostaneme vztah:

$$(T_i - T_R) - (T_{iM} - T_{RM}) = \left(\frac{L \cdot \cos(S_R)}{v} \right) - \left(\frac{L \cdot \cos(S_i)}{v} \right)$$

Opravujeme pak polohu lokalizovaného jevu vůči master eventu tak, abychom dosáhly co největší shody pro všechny stanice.

