

SEISMOLOGIE A SEISMOTEKTONIKA

část 4.: Seismický paprsek

4.1: Geometrie seismického paprsku

Můžeme si představit, že se signál od zdroje šíří ve formě **paprsků**. Pro paprsky seismických vln platí stejné zákonitosti, jako pro jakékoli jiné paprsky (např. světlo), tj. seismický signál se podle obecných fyzikálních zákonů:

- **odráží**
- **láme**
- **rozptyluje se (difrakce)**
- **interferuje**

Huygens-Fresnelův princip

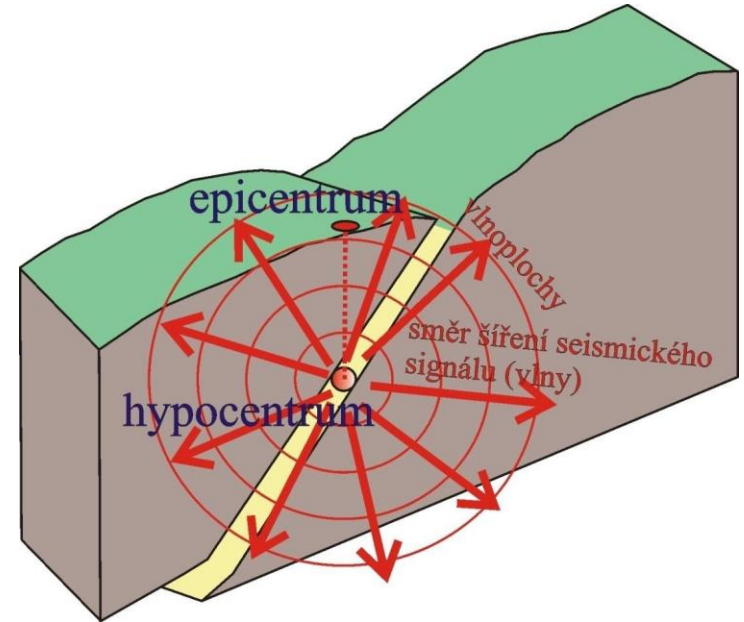
každý bod vlnoplochy můžeme pokládat za zdroj elementárního vlnění.
Huygens svou myšlenku představil v roce 1678, v roce 1818 ji Fresnel doplnil (vysvětlení interference a difrakce).



Augustin-Jean Fresnel
(1788-1827)



Christiaan Huygens
(1629-1695)



Z **Huygens-Fresnelova principu** pak lze geometricky odvodit vztahy pro lom či odraz seismického paprsku.

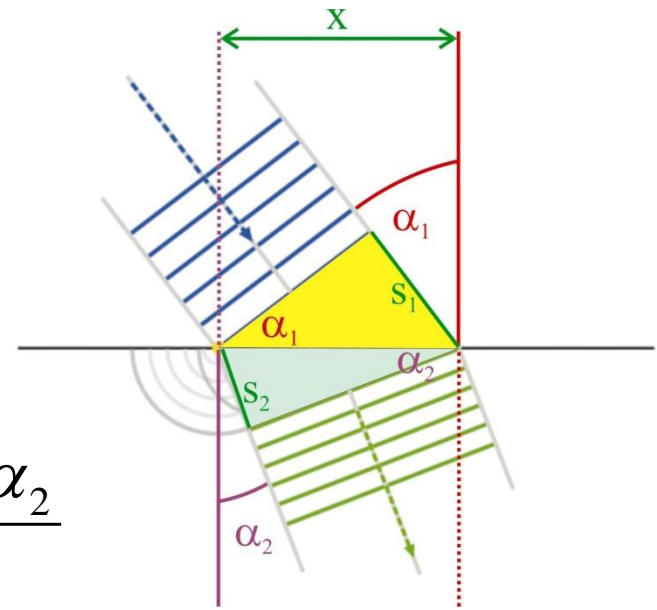
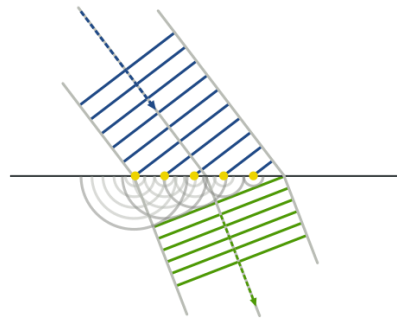
$$\sin \alpha_1 = \frac{s_1}{x} \Rightarrow \frac{\sin \alpha_1}{s_1} = \frac{\sin \alpha_2}{s_2} \Leftrightarrow \frac{\sin \alpha_1}{\frac{s_1}{t}} = \frac{\sin \alpha_2}{\frac{s_2}{t}}$$

$$\sin \alpha_2 = \frac{s_2}{x}$$

$$v_1 = \frac{s_1}{t}$$

$$v_2 = \frac{s_2}{t}$$

$$\Rightarrow \frac{\sin \alpha_1}{s_1} = \frac{\sin \alpha_2}{s_2} \Leftrightarrow \frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2}$$



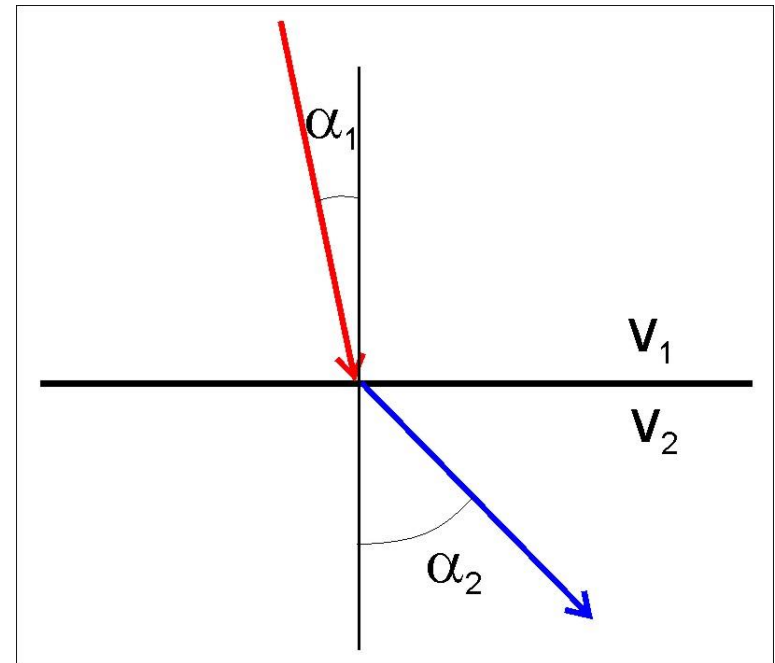
Lom seismického paprsku:

Na rozhraní dvou vrstev o různých rychlostech šíření seismických vln dochází k lomu seismického paprsku podle tzv. **Snellova zákona**:



$$\frac{\sin \alpha_1}{V_1} = \frac{\sin \alpha_2}{V_2}$$

Willebrord van Roijen Snell (1580-1626)



Podíl sinu úhlu svíraného paprskem a přímkou kolmou k rozhraní vůči rychlosti šíření paprsku je konstantní.

Podíl sinu úhlu svíraného paprskem a přímkou kolmou k rozhraní vůči rychlosti šíření paprsku je **konstantní**. Konstanta p je označována různými názvy:

paprskový parametr, seismický parametr, horizontální pomalost

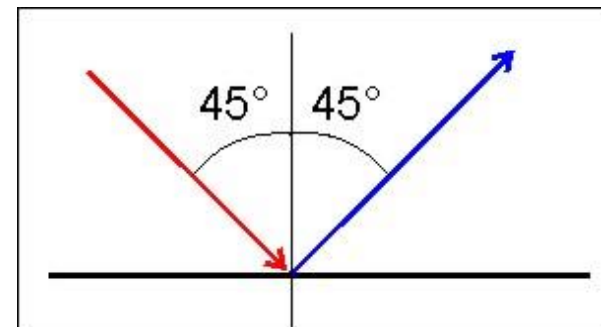
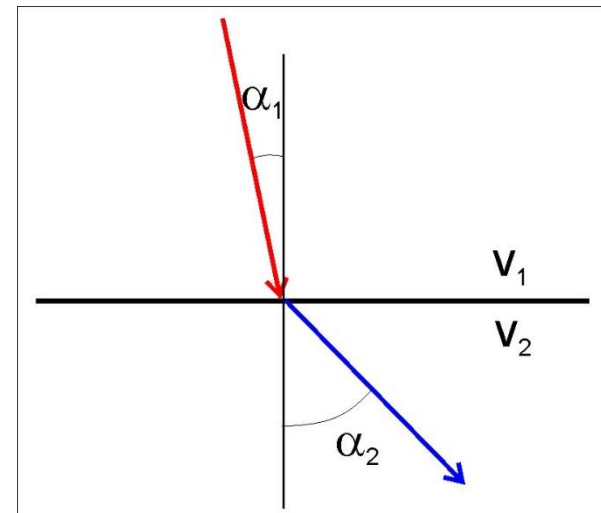
$$\frac{\sin \alpha}{v} = \text{konstanta} = p$$

Rovněž odraz seismického paprsku lze vysvětlit na základě Snellova pravidla:

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2}$$

$$v_1 = v_2 \Rightarrow \alpha_1 = \alpha_2$$

Úhel dopadu je roven úhlu odrazu.



Huygens-Fresnelův princip – další důsledek:

Na seismickém rozhraní jsou generovány také další typy vln, které vznikají ve zdroji.

Tj. podélná vlna se může lámat a dále šířit nejen jako vlna podélná, ale část energie se projeví jako vlna příčná.

Příčná vlna se může lámat a dále šířit nejen jako vlna příčná, ale část energie se projeví jako vlna podélná.

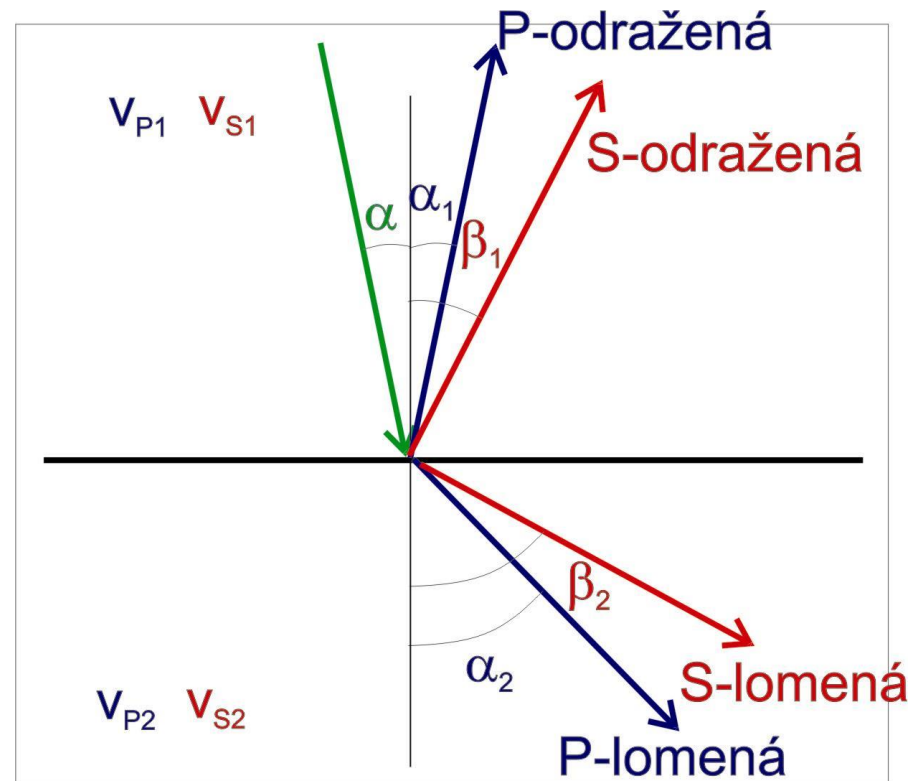
Snellovo pravidlo při generování jiného typu vln.

Na seismickém rozhraní jsou generovány jak podélné tak i příčné odražené a lomené vlny.

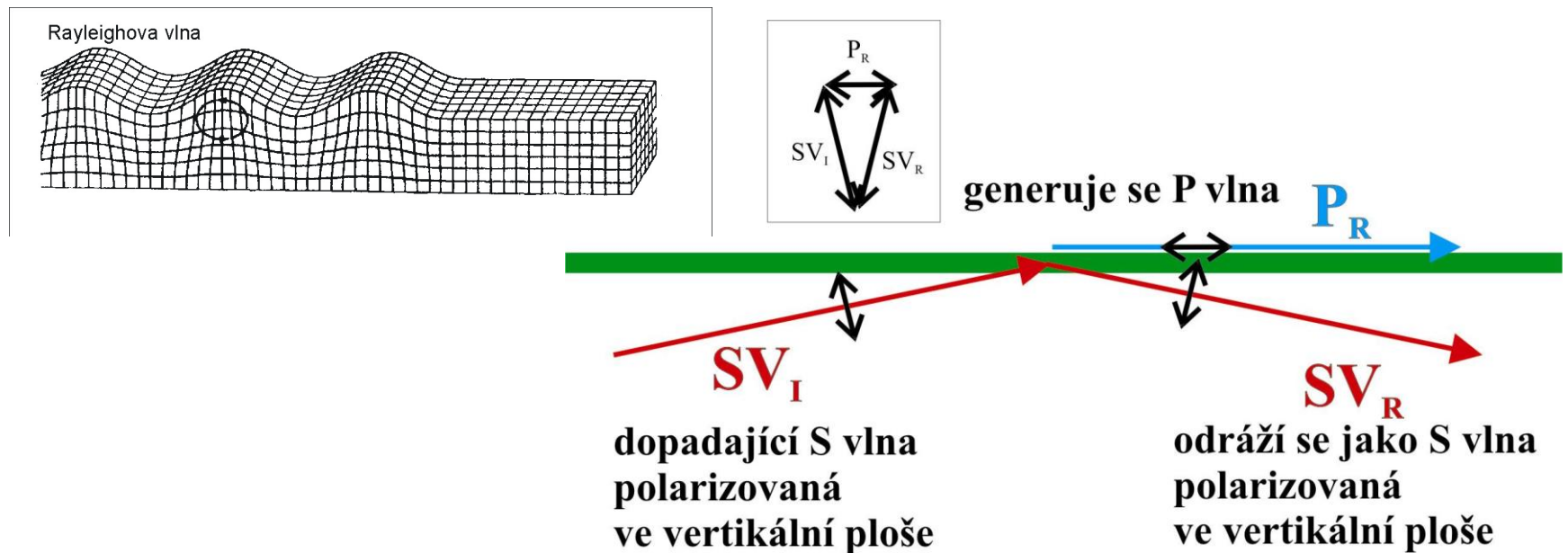
Stále musí platit Snellovo pravidlo:

$$\frac{\sin \alpha}{v} = p$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_{P1}} = \frac{\sin \beta_1}{v_{S1}} = \frac{\sin \alpha_2}{v_{P2}} = \frac{\sin \beta_2}{v_{S2}} = p$$

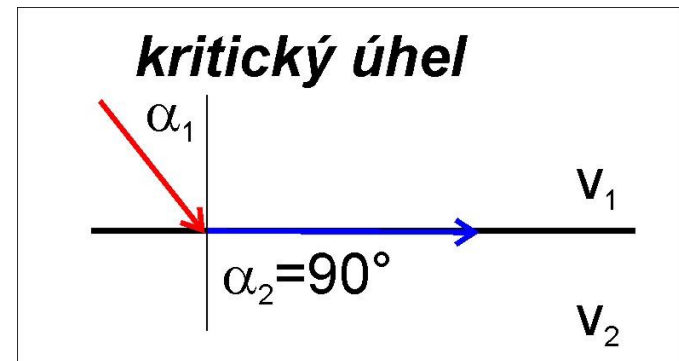


Složení části odražené příčné vlny (respektive vlny S polarizované v ploše kolmé na rozhraní) a lomené podélné vlny lze vysvětlit např. vznik povrchové vlny Rayleighova typu.



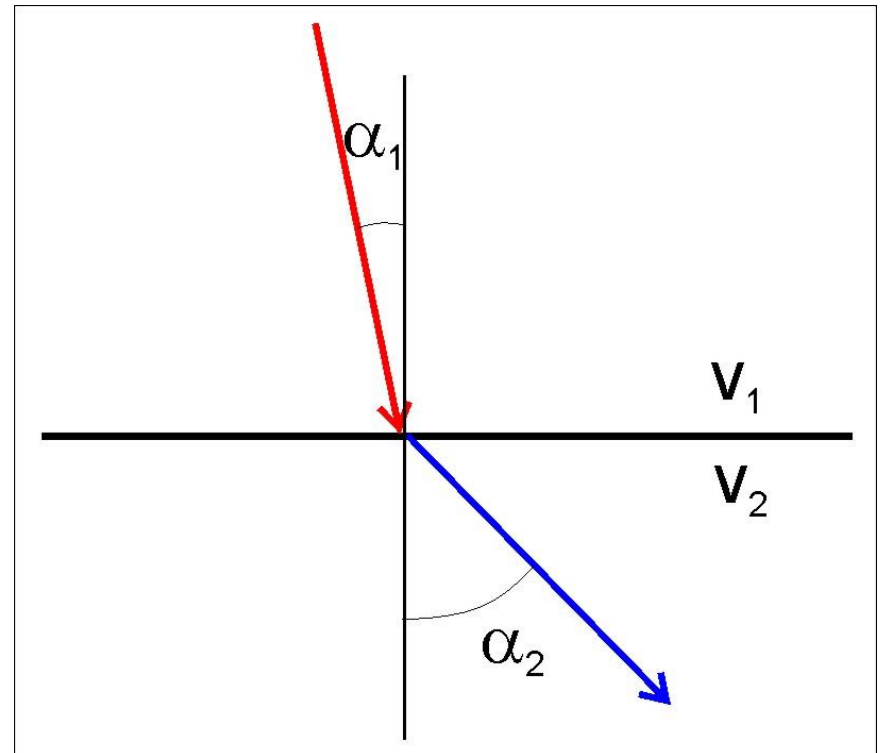
- Pokud paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem menším, než je tzv. kritický úhel, láme se podle Snellova zákona do následující vrstvy.
- Pokud paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem větším, než je tzv. kritický úhel, nedojde k lomu, ale dojde k totálnímu odrazu paprsku od rozhraní.
- Pokud paprsek dopadá na rozhraní pod tzv. kritickým úhlem, láme se podél rozhraní.

$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2} = \frac{1}{v_2}$$



Všimněme si, že pokud do hloubky rychlost vrstev roste, úhel a se v případě paprsku šířícího se do hloubky zvětšuje a dochází k lomu „od kolmice“.

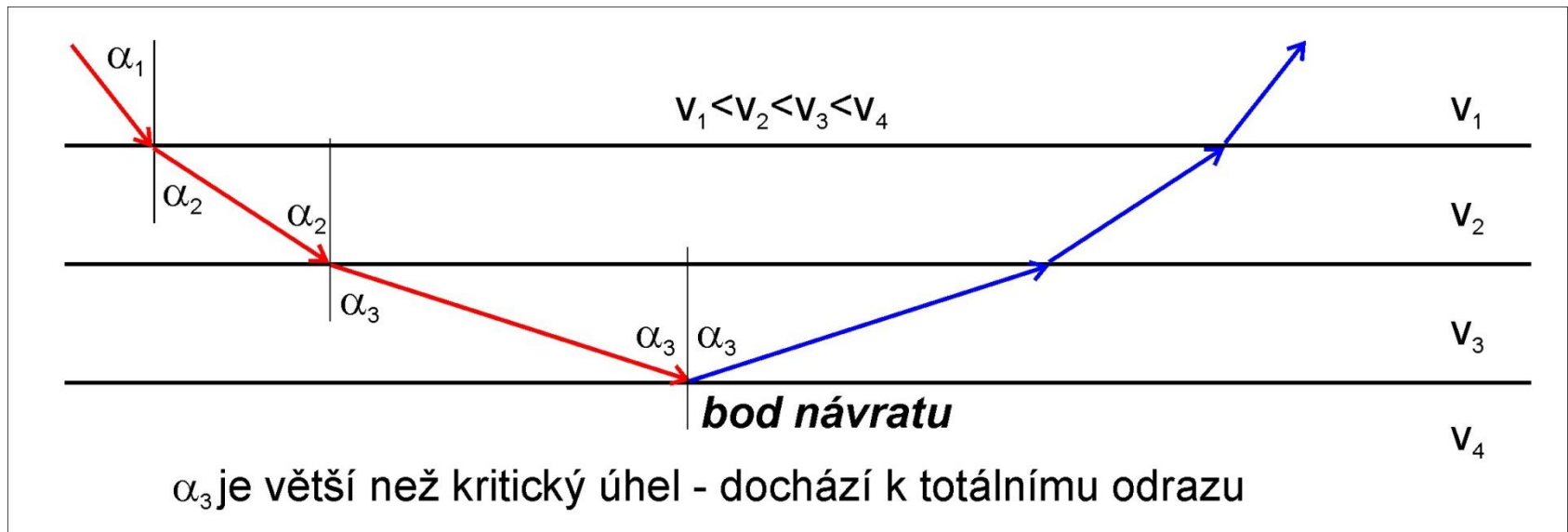
$$\frac{\sin \alpha_1}{v_1} = \frac{\sin \alpha_2}{v_2} = \frac{1}{v_2}$$



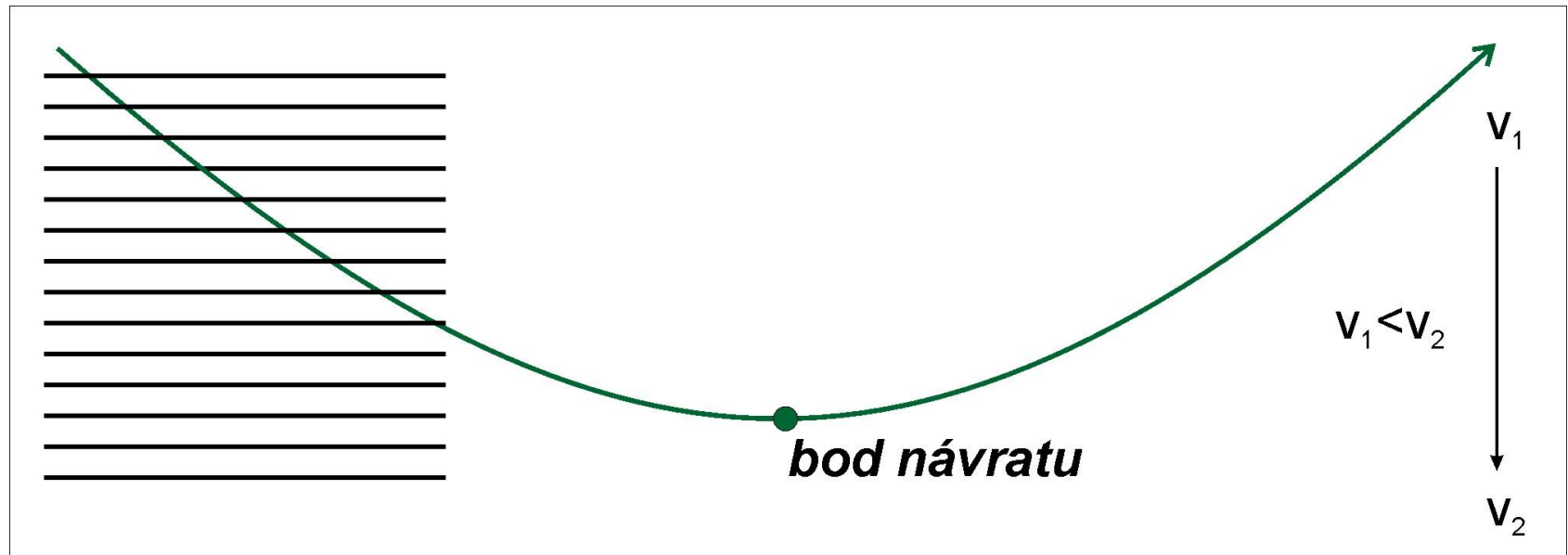
4.2: Seismický paprsek ve vrstevnatém prostředí

Lom seismického paprsku ve vrstevním prostředí:

Ve vrstevním prostředí, v němž rychlost šíření vln do hloubky roste, tedy dochází postupně k lámání paprsků „od kolmice“ tak dlouho, až dojde k překonání velikosti kritického úhlu a paprsek je totálně odražen zpět k povrchu.

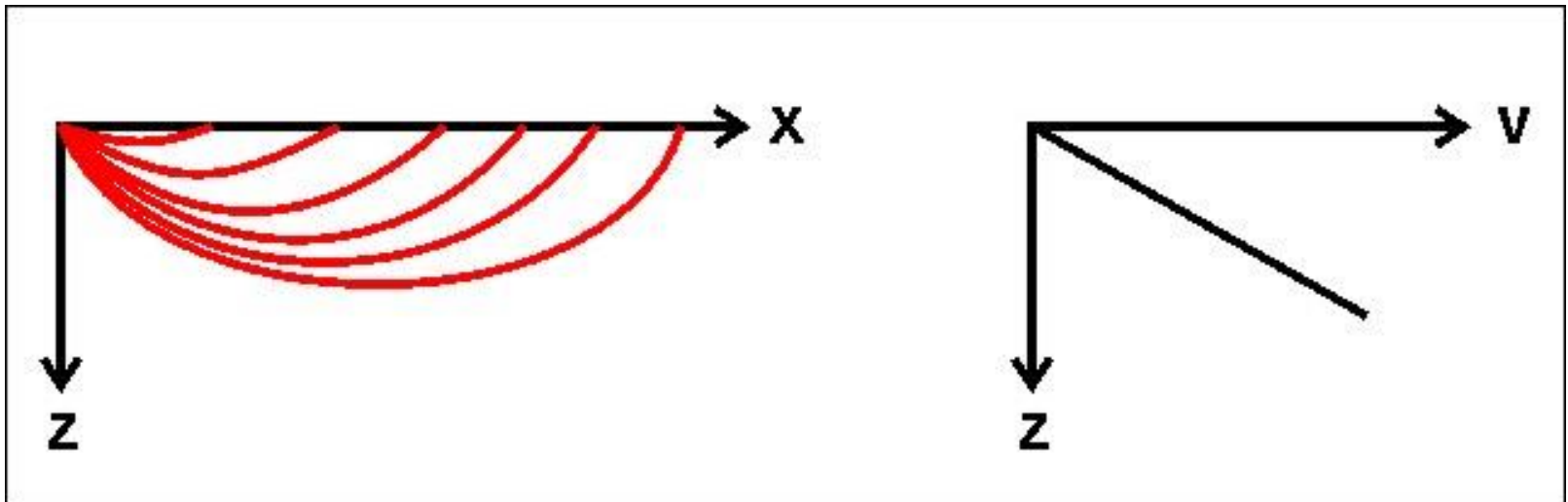


V případě plynulého zvětšování rychlosti do hloubky si lze situaci představit jako průchod paprsku vrstevním prostředím s „velmi tenkými“ vrstvami a malými změnami rychlostí.



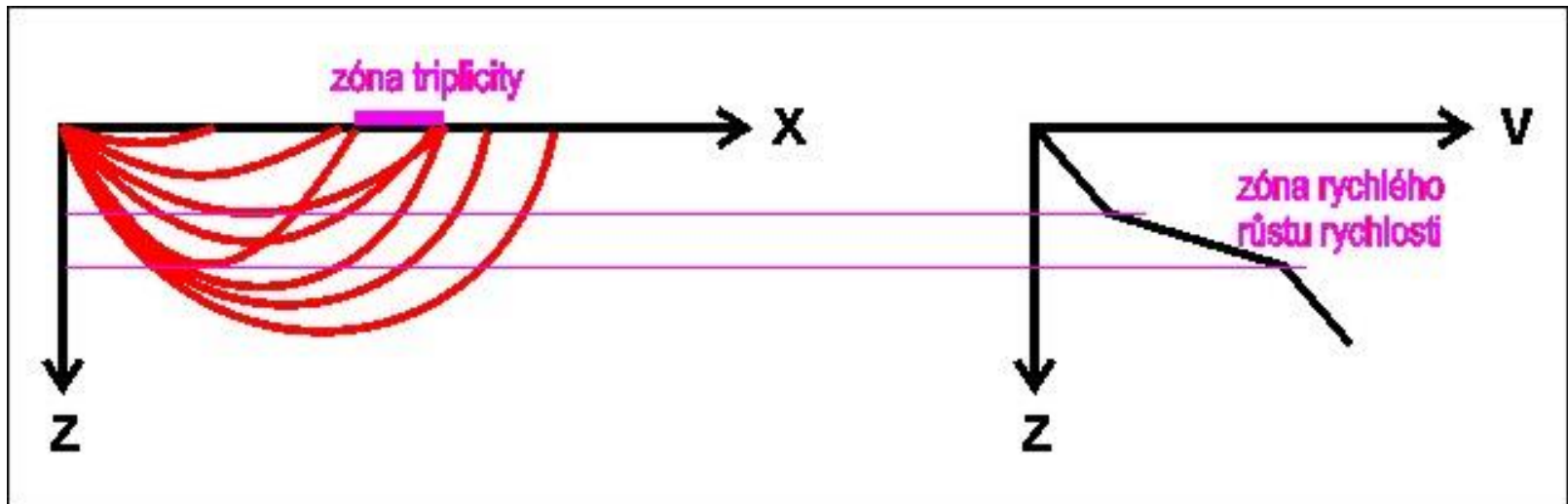
V prostředí s plynule rostoucí rychlostí do hloubky tak dochází k zakřivení seismického paprsku přímé, který se tak „vrací“ k povrchu, kde je detekován.

V prostředí s lineárně rostoucí rychlostí seismických vln do hloubky se do každého místa na povrchu šíří signál pouze podél jedné dráhy (do každého místa míří jen jeden paprsek).

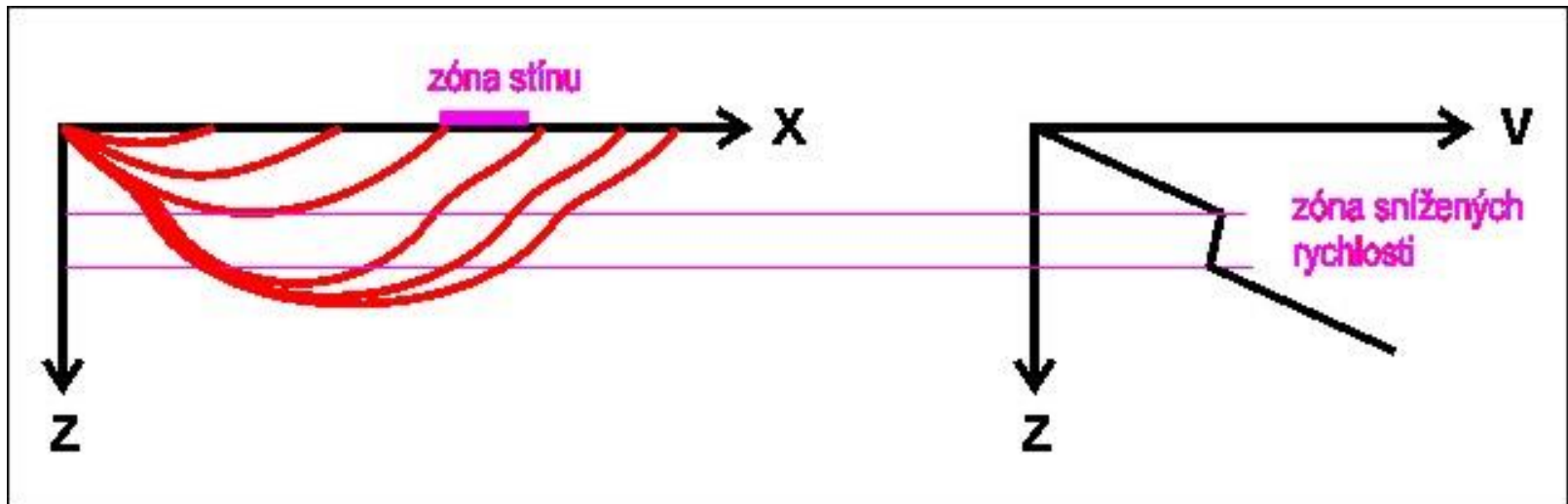


Zóny, v nichž rychlost do hloubky roste mnohem intenzivněji, způsobují zakřivení paprsků tak, že se na povrchu vytváří zóna, v níž může být detekován signál šířící se podél tří různých drah (tzv. **zóna triplicity**).

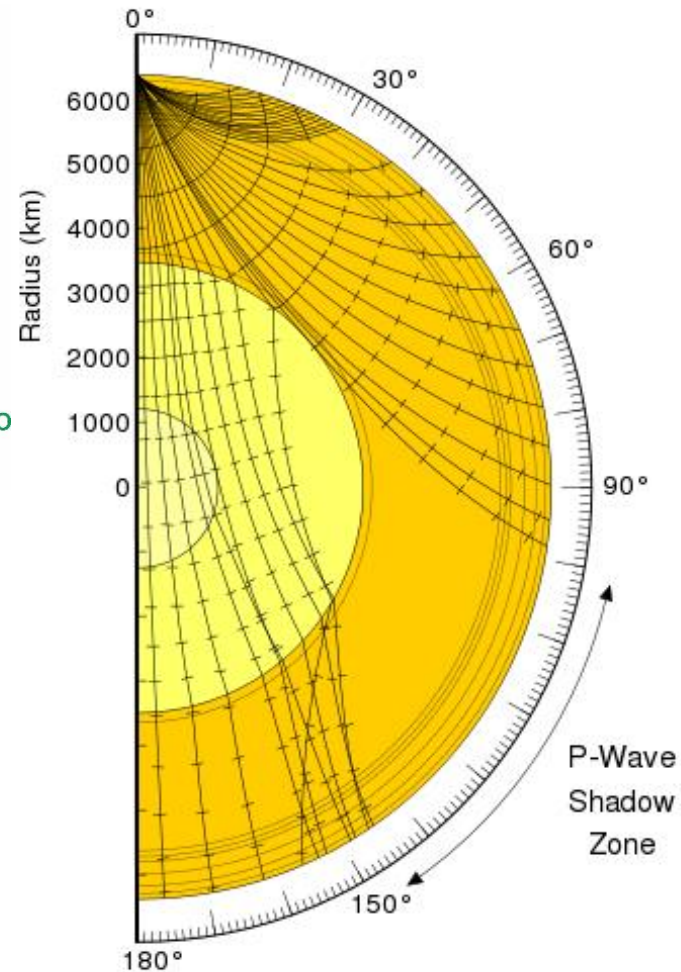
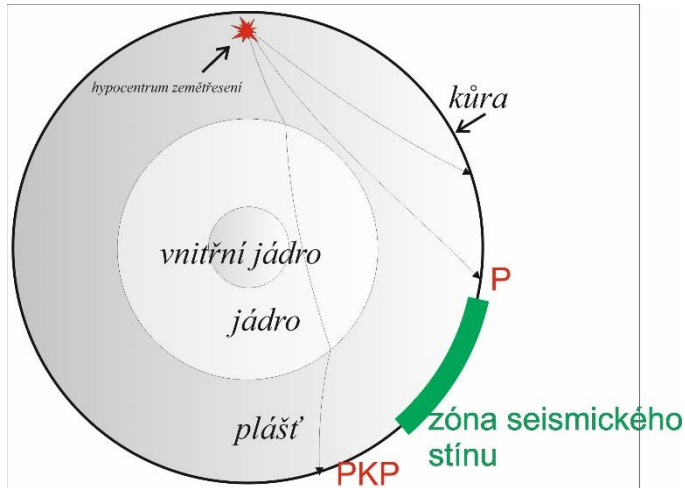
V zóně triplicity jsou detekovány obecně tři různé fáze přímé vlny, které se liší hodnotou paprskového parametru a které jsou detekovány obecně ve třech různých časech (liší se délkou dráhy a průměrnou rychlostí).



Zóny, v nichž rychlost do hloubky klesá, způsobují zakřivení paprsků tak, že se na povrchu vytváří zóna, v níž není detekován žádný signál (nemíří do ní žádné paprsky, tzv. **zóna seismického stínu**). Tato skutečnost je dána tím, že v zóně snížených rychlostí se paprsky lámou **ke kolmici** – v této zóně tedy **nemůže být bod návratu**.



Příkladem je např. zóna seismického stínu odpovídající zóně snížených rychlostí ve vnějším jádře.



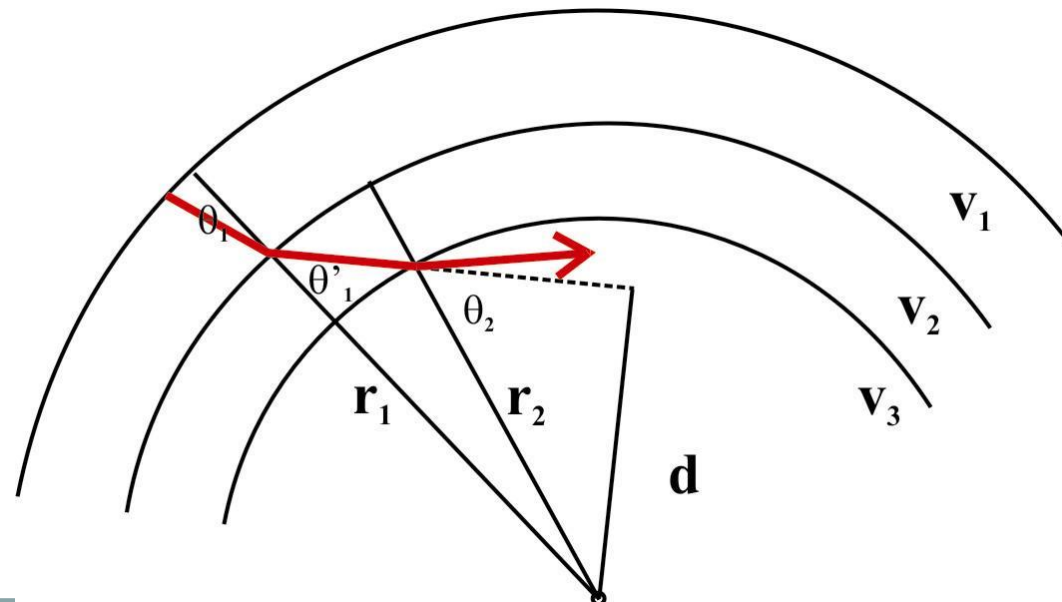
Problém zakřivení rychlostního rozhraní ve sférickém tělese Země

Ze Snellova zákona plyne: $\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta'_1}{v_2}$

Ale v modelu zakřivené Země platí obecně nerovnost: $\theta'_1 \neq \theta_2$

A proto:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} \neq \frac{\sin \theta_2}{v_2}$$



V modelu zakřivené Země ale vidíme dva pravoúhlé trojúhelníky se společnou stranou o délce d .

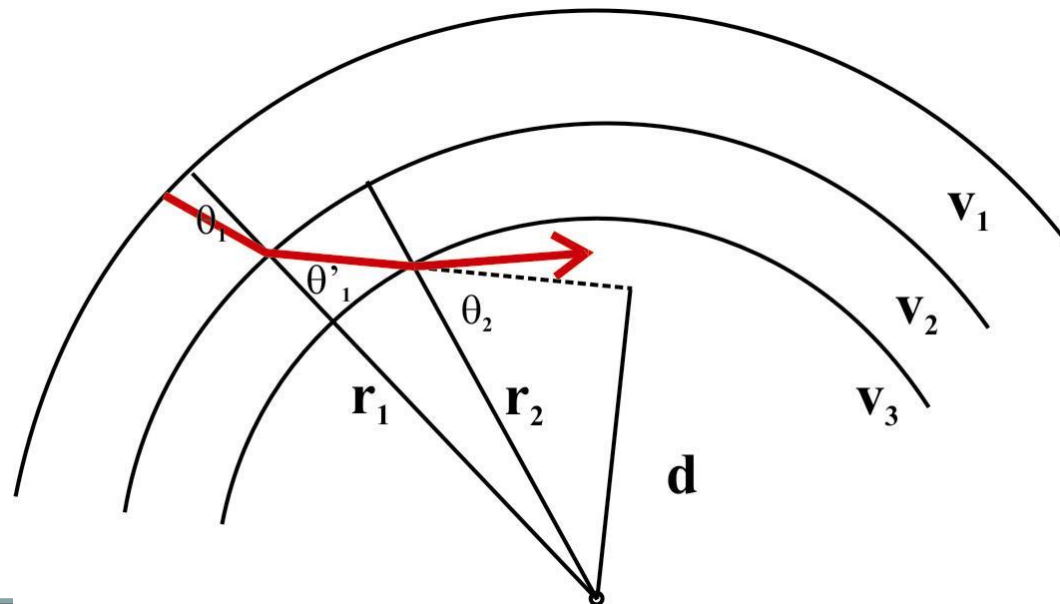
Z nich plyne: $d = r_1 \cdot \sin \theta'_1$
 $d = r_2 \cdot \sin \theta_2$

A tedy:

$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta'_1}{v_2} \Leftrightarrow$$

$$\frac{r_1 \cdot \sin \theta_1}{v_1} = \frac{r_1 \cdot \sin \theta'_1}{v_2} = \frac{r_2 \cdot \sin \theta_2}{v_2} \Leftrightarrow$$

$$\frac{r_1 \cdot \sin \theta_1}{v_1} = \frac{r_2 \cdot \sin \theta_2}{v_2}$$



Můžeme tak psát:

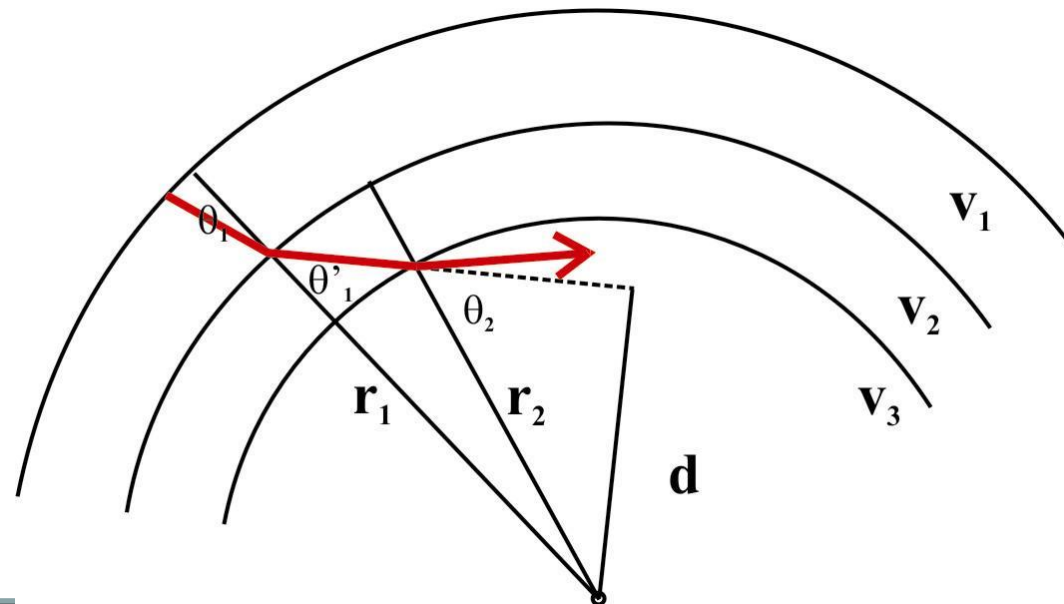
$$\frac{r_1 \cdot \sin \theta_1}{v_1} = \frac{r_2 \cdot \sin \theta_2}{v_2}$$

Tato rovnice je obecnou rovnicí definující paprskový parametr ve sférickém tělese Země:

$$p = \frac{r \cdot \sin(i)}{v}$$

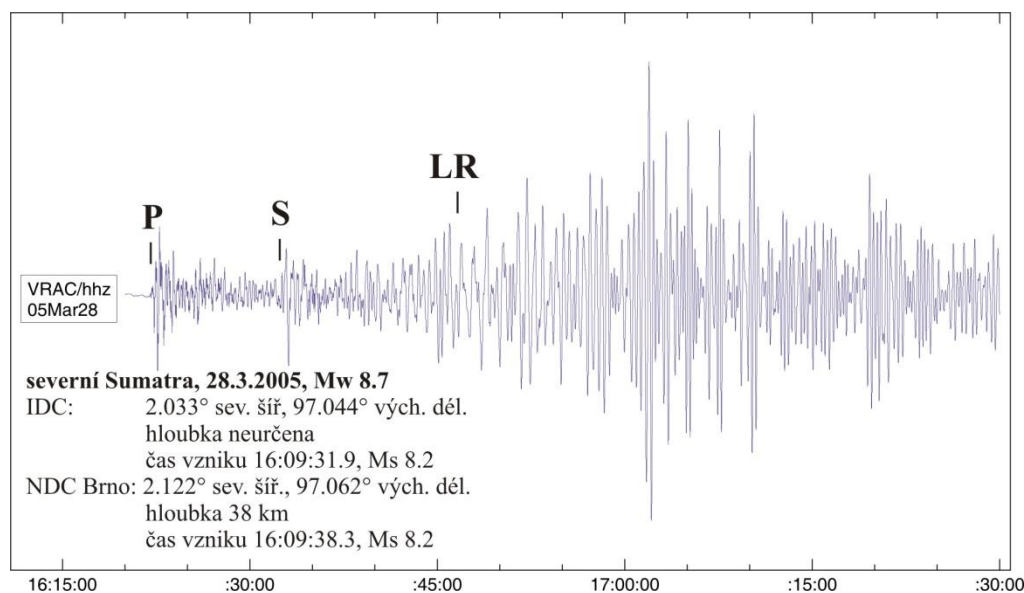
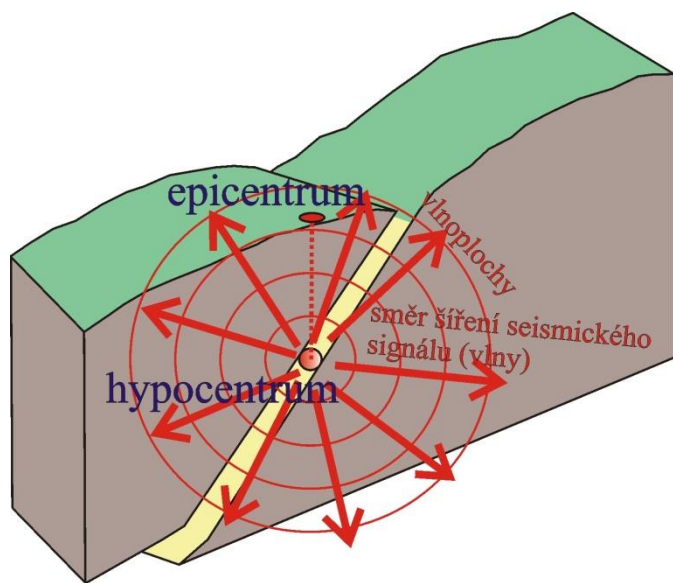
Má význam inverzní zdánlivé rychlosti podél povrchu Země ("pomalosti")

$$p = \frac{dT}{d\Delta}$$

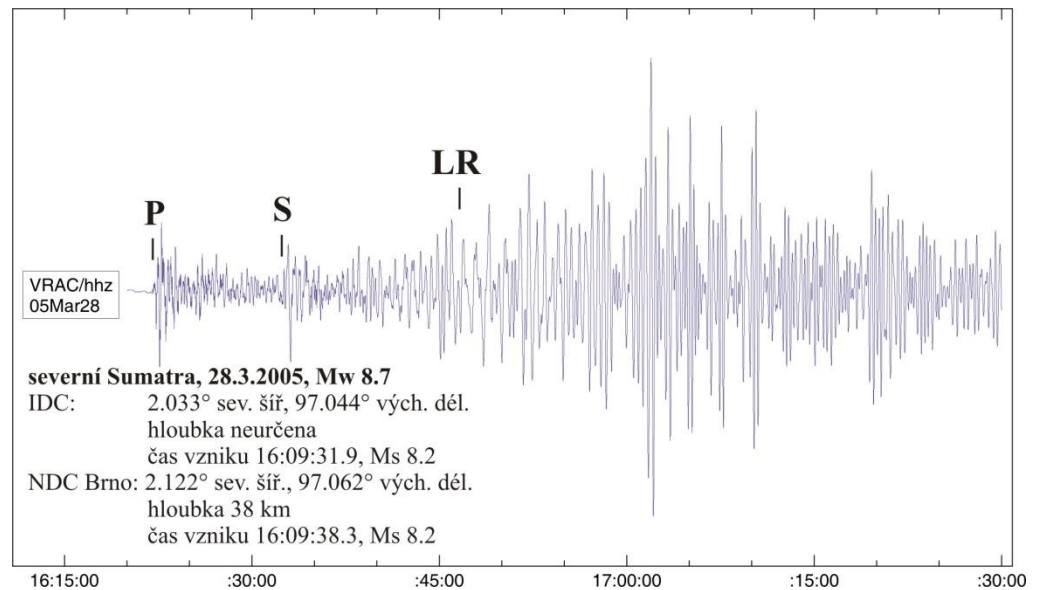
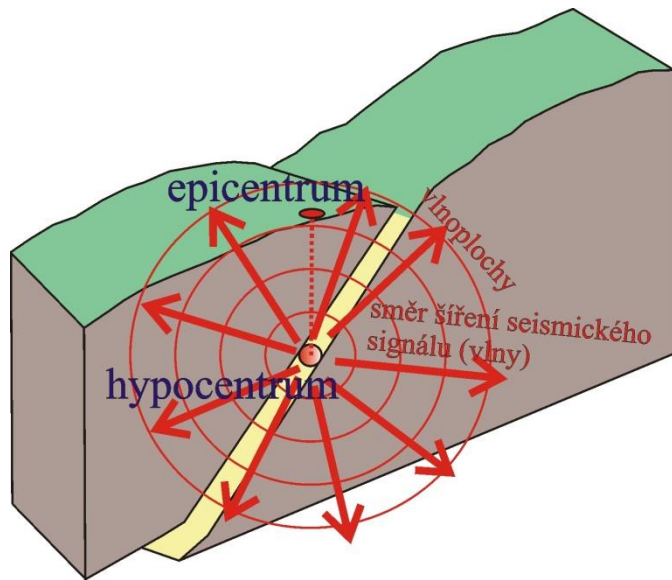


4.3: Nomenklatura objemových seismických fází a jejich hodochrony

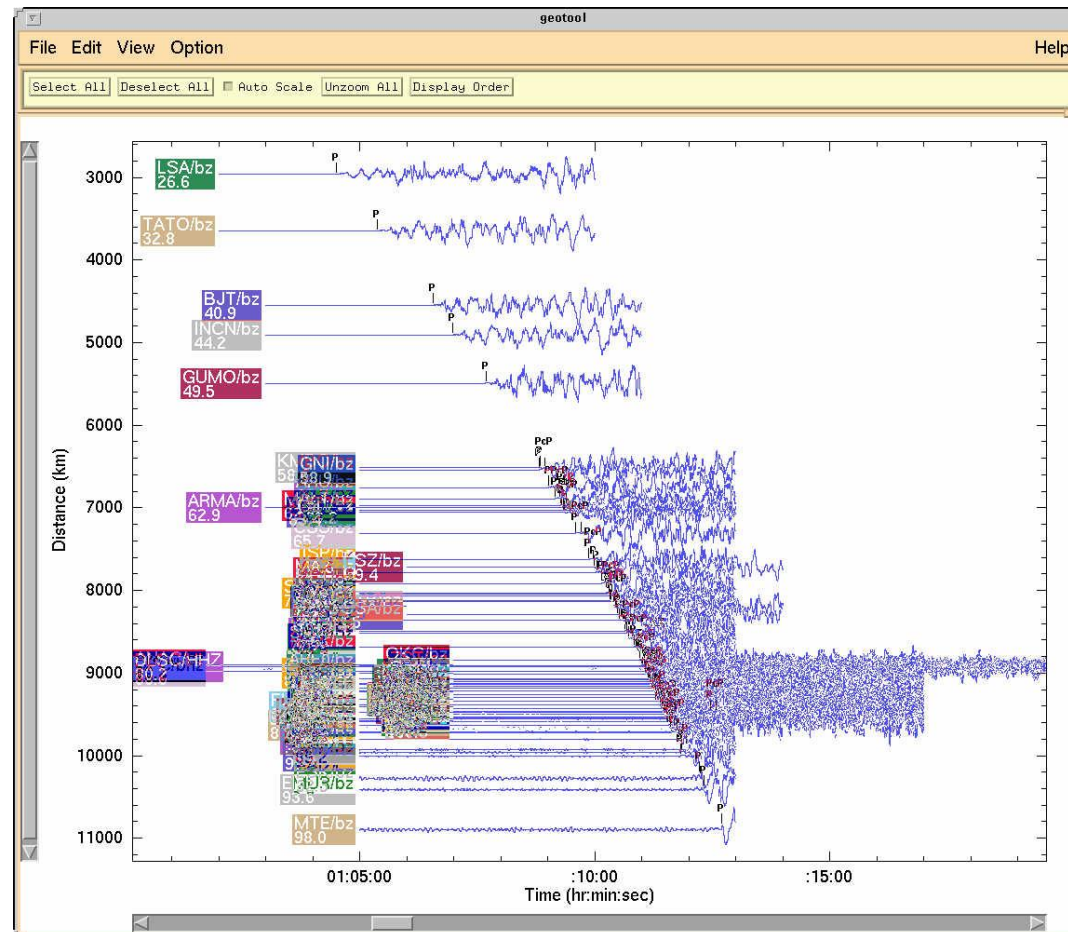
Na seismickém záznamu lze obvykle pozorovat tři základní skupiny seismických fází – **primární fáze** (tvořené podélnými vlnami), **sekundární fáze** (tvořené příčnými vlnami) a **povrchové vlny**.



Primární podélné (P) a sekundární příčné (S) vlny se šíří celým objemem zemského tělesa, nazývají se proto **vlny objemové**.

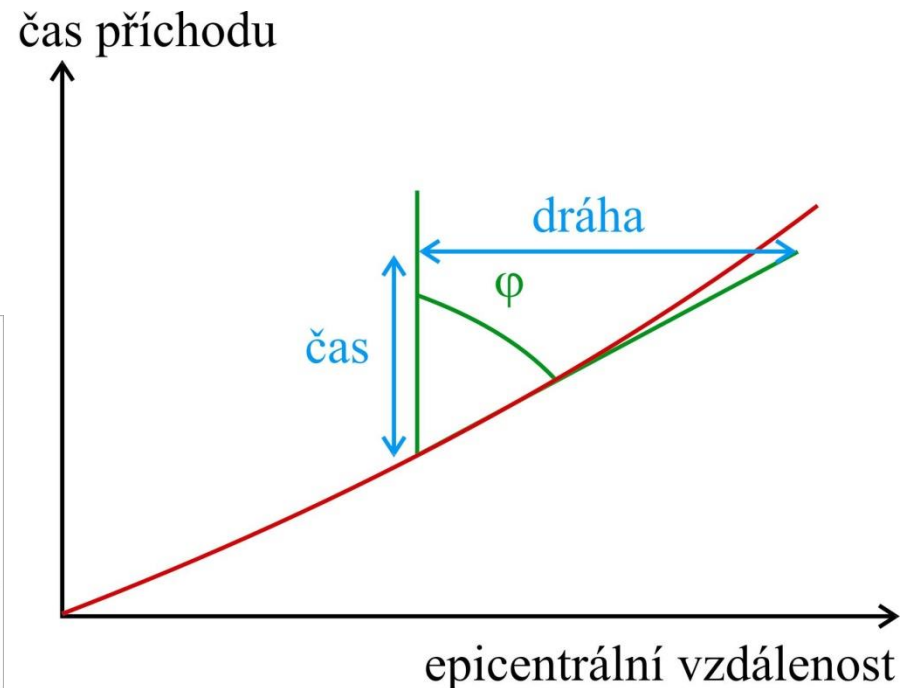
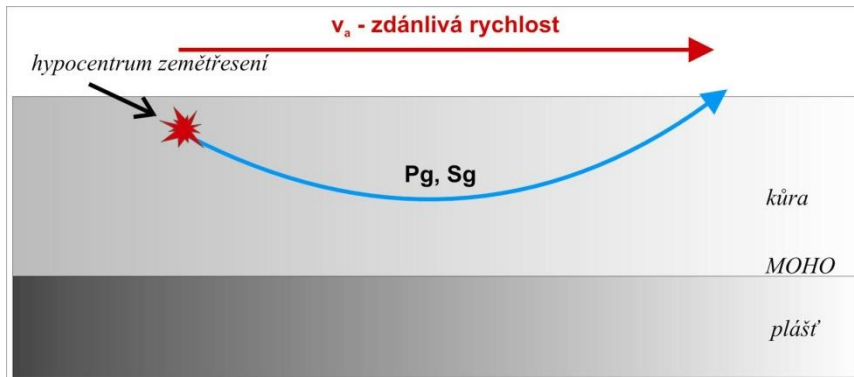


Hodochrona je křivka popisující závislost mezi epicentrální vzdáleností a dobou šíření seismického signálu ze zdroje do místa detekce.

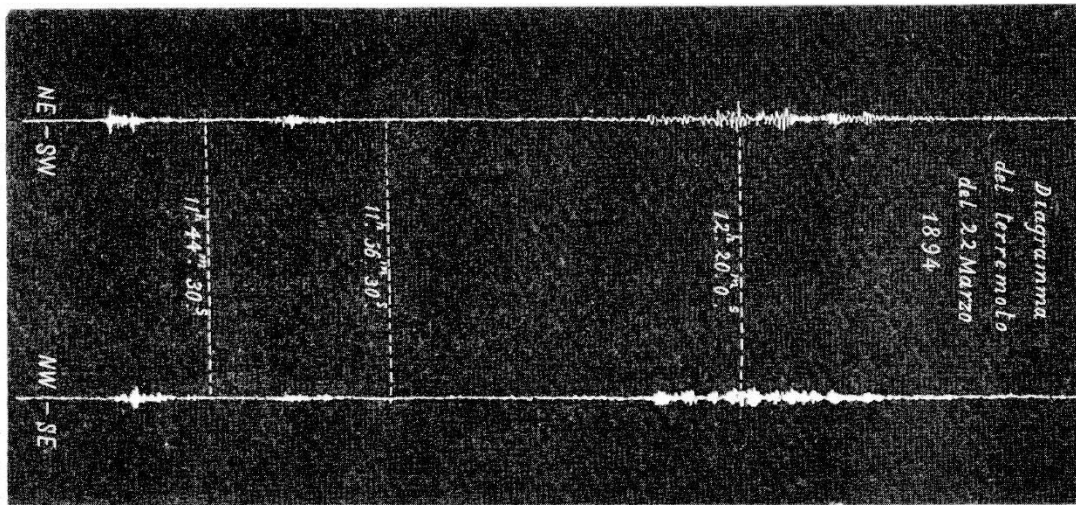


Sklon hodochrony má význam rychlosti seismické vlny (zdánlivé rychlosti v_a podél zemského povrchu)

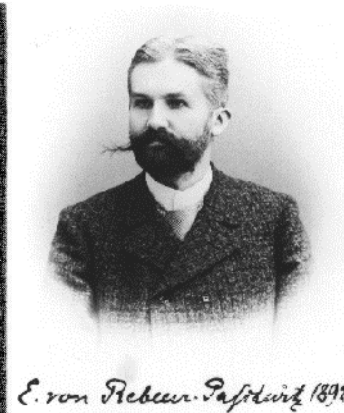
$$\tan \varphi = \frac{\text{dráha}}{\text{čas}} = v_a$$



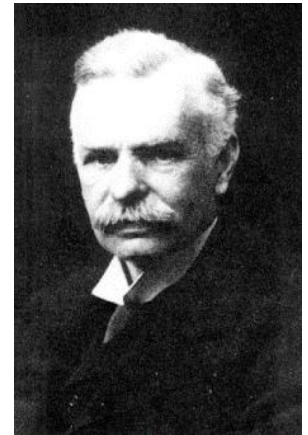
Do jednoho místa může směřovat větší množství různých seismických fází. Tři základní seismické fáze byly poprvé rozlišeny Rebeur-Paschwitzem na záznamu zemětřesení z 22. 3. 1894 z Japonska, správně identifikoval tyto fáze ale až v roce 1900 Oldham.



**Reuber-Paschwitzův záznam
japonského zemětřesení z 22. 3.
1894 (Rebeur-Paschwitz 1895)**



**Ernst von Rebeur-
Paschwitz (1861-1895)**



**Richard Dixon Oldham
(1858-1936)**

4.3.a: Nomenklatura seismických vln lokálnícha regionálných fází

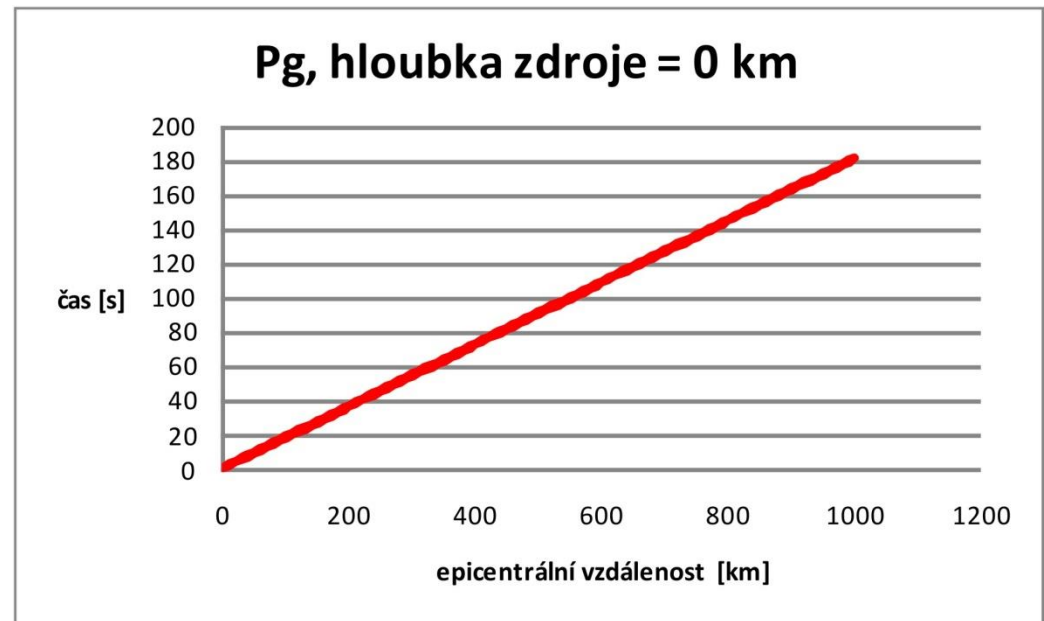
Lokální (regionální) seismické fáze:

fáze, jejichž paprsek prochází pouze zemskou kůrou a nejvyššími partiemi zemského pláště

Přímá vlna: Pg – podélná; Sg – příčná

V případě rychlostně homogenního prostředí a zdroje na povrchu má hodochrona tvar přímky a prochází počátkem souřadné soustavy.

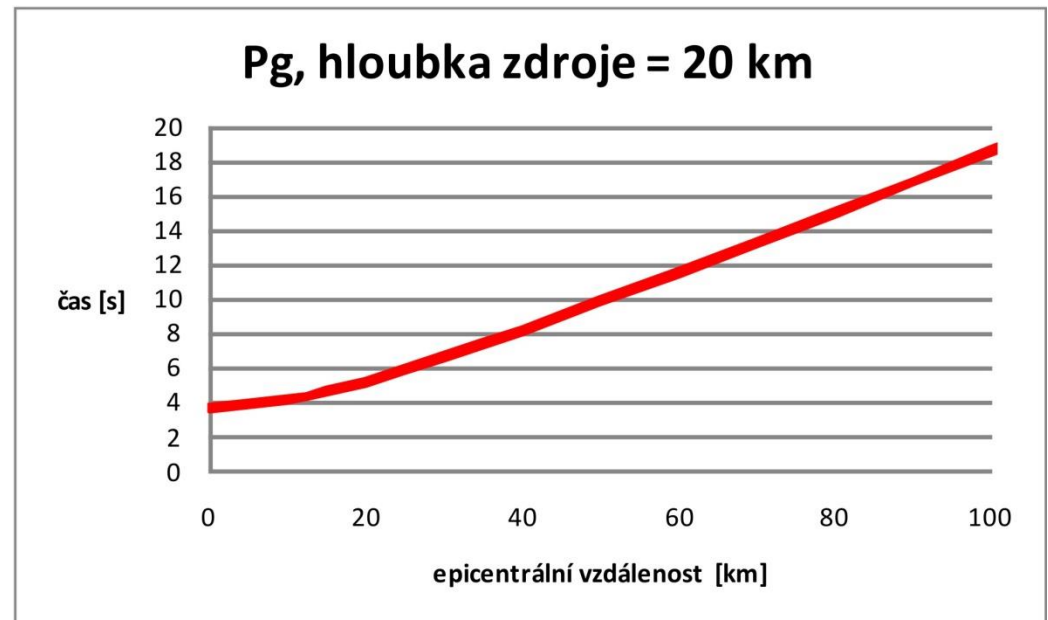
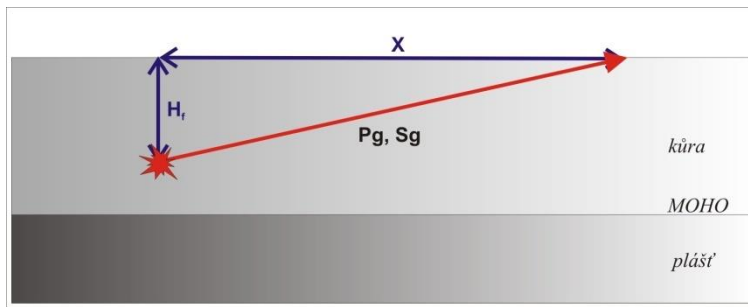
$$t = \frac{X}{v}$$



Přímá vlna: P_g – podélná; S_g – příčná

V případě rychlostně homogenního prostředí a zdroje v hloubce má hodochrona tvar hyperboly.

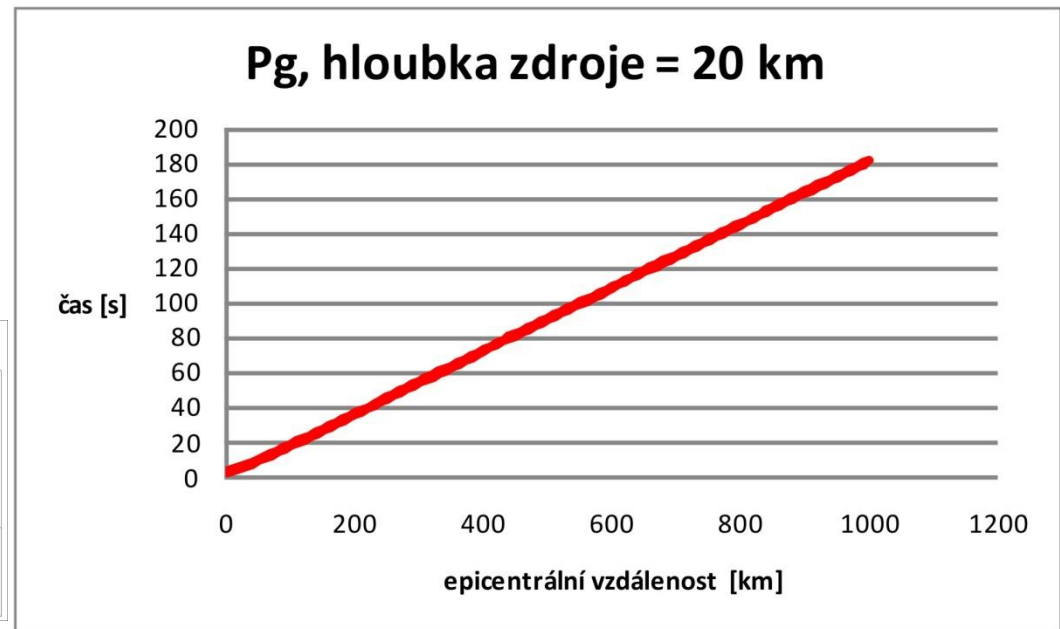
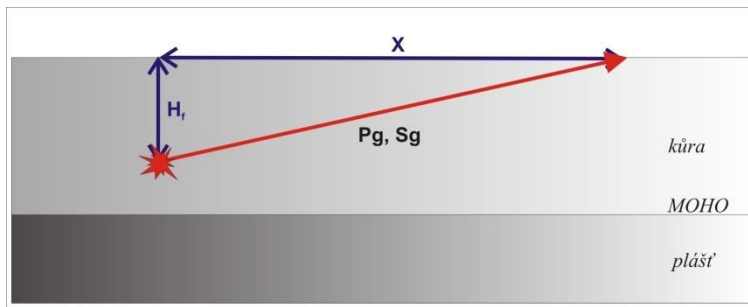
$$t = \frac{\sqrt{X^2 + H_f^2}}{v}$$



Přímá vlna: Pg – podélná; Sg – příčná

Ve větších epicentrálních vzdálenostech, kde vzdálenost výrazně převyšuje hloubku, je hodochrona velmi blízká přímce a lze ji přímkou nahradit.

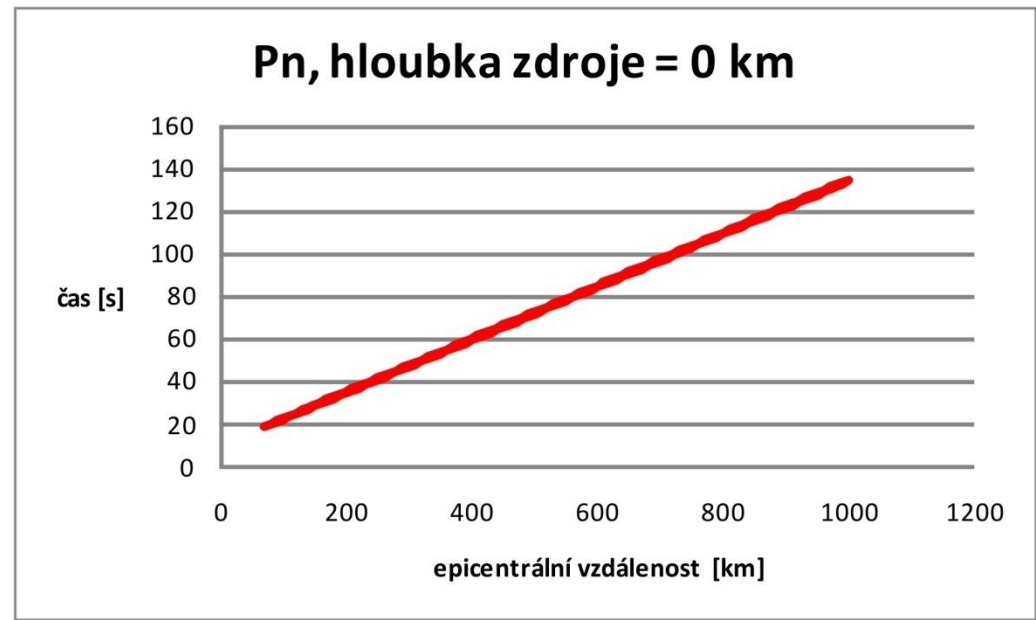
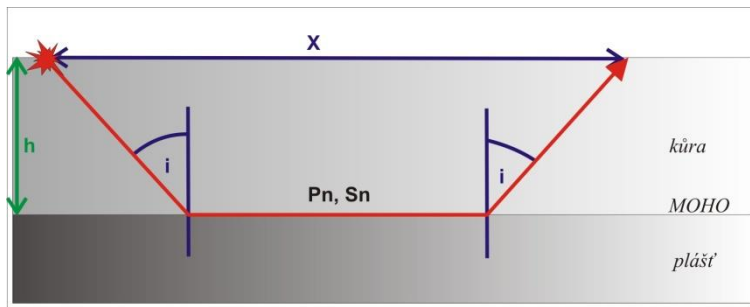
$$t = \frac{\sqrt{X^2 + H_f^2}}{v}$$



Lomená vlna podle MOHO: Pn – podélná; Sn – příčná

V případě rychlostně homogenního prostředí a zdroje na povrchu má hodochrona tvar přímky, neprochází počátkem souřadné soustavy.

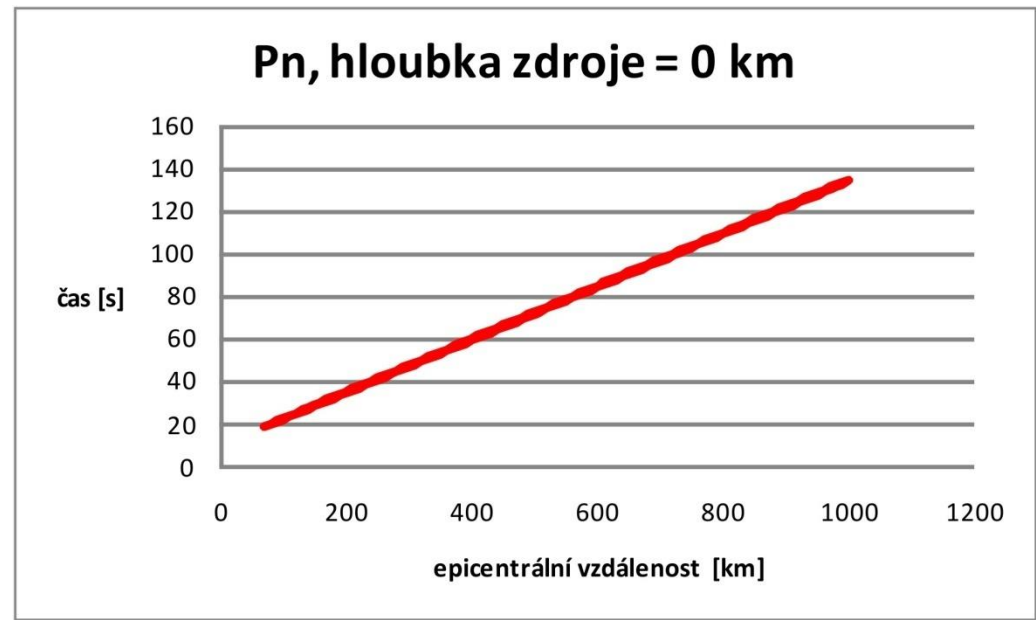
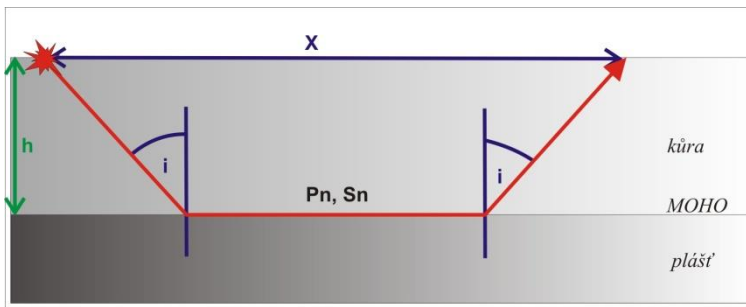
$$t = \frac{x}{v_2} + 2h \frac{\cos(i)}{v_1}$$



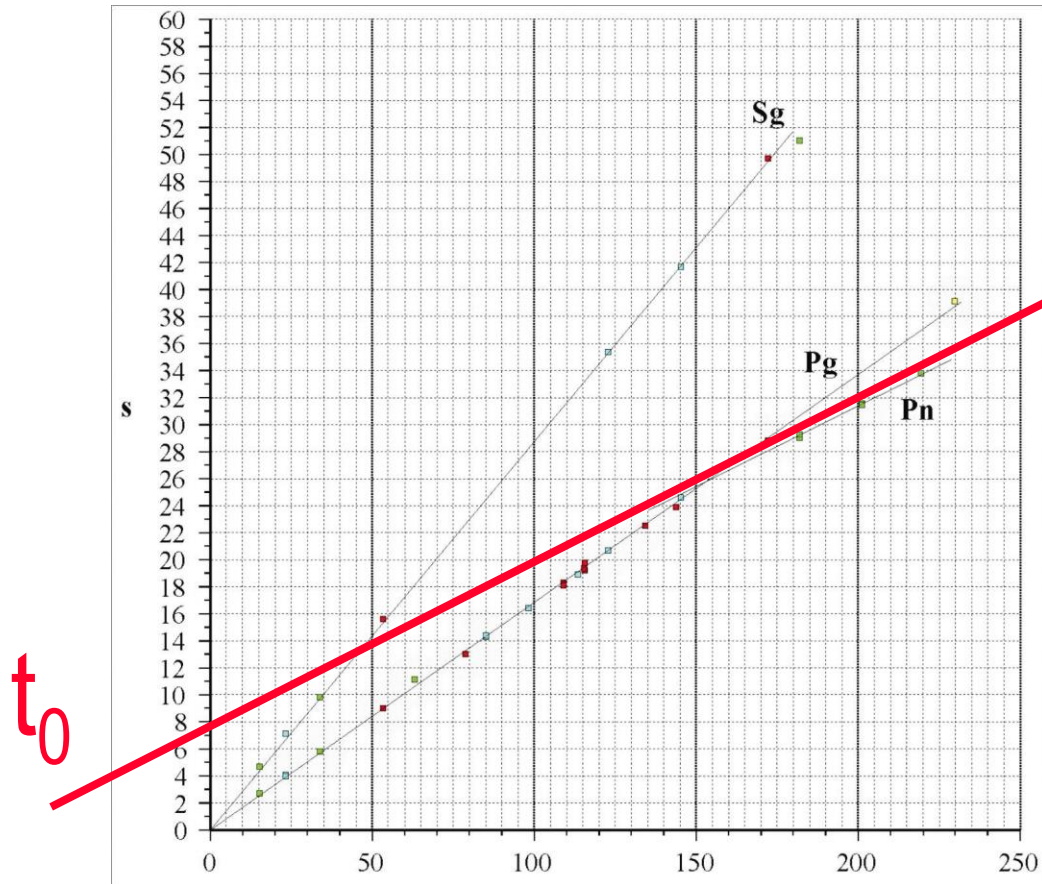
Všimněte si, že druhý člen t_0 je funkcí rychlostí a hloubky rozhraní - posunutí hodochrony lomené vlny Pn na vertikální ose je tedy přímo úměrné mocnosti zemské kůry.

$$t = \frac{x}{v_2} + 2h \frac{\cos(i)}{v_1}$$

$$t_0 = 2h \frac{\cos(i)}{v_1}$$



Experiment CELEBRATION2000 (data z permanentních stanic na Moravě).



$$v_1 = 5935 \text{ m.s}^{-1}$$

$$v_2 = 8403 \text{ m.s}^{-1}$$

$$t_0 = 7,5 \text{ s}$$

$$h = \frac{t_0 v_1}{2 \cos(i)} = \frac{7,5 \times 5935}{2 \cos(44,9^\circ)} \cong 31,4 \text{ km}$$

Lomená vlna podle MOHO: Pn – podélná; Sn – příčná

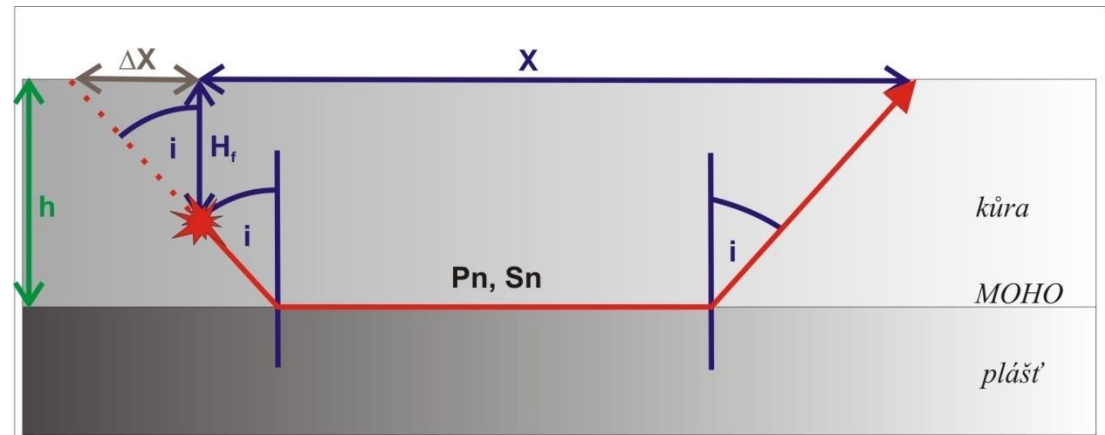
V případě zdroje v hloubce je epicentrální vzdálenost menší o hodnotu Δx a doba šíření vlny kratší o čas Δt .

$$\Delta x = H_f \cdot \tan(i)$$

Čas Δt odpovídá času, za který by vlna urazila dráhu Δs :

$$\Delta s = \frac{H_f}{\cos(i)}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v_1} = \frac{H_f}{v_1 \cdot \cos(i)}$$

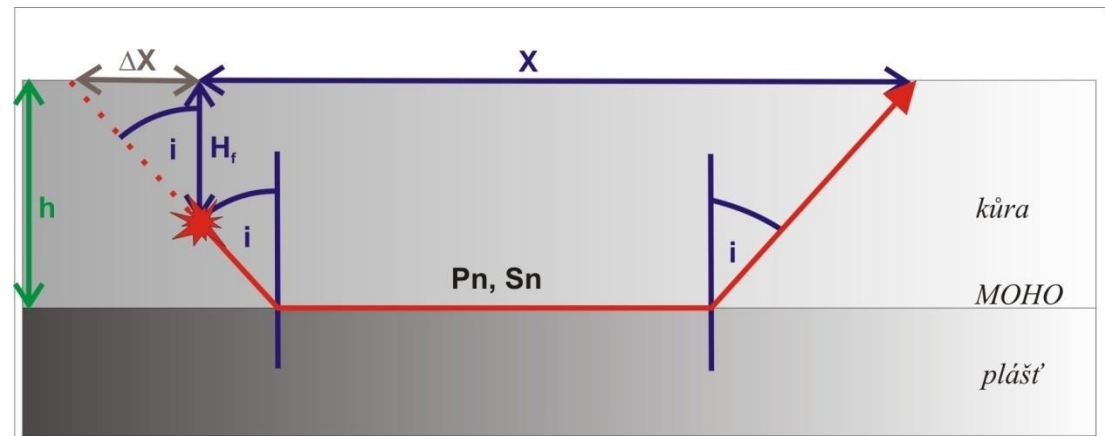


Lomená vlna podle MOHO: Pn – podélná; Sn – příčná

Obě hledané hodnoty, Δx i Δt , jsou nezávislé na epicentrální vzdálenosti.

$$\Delta x = H_f \cdot \tan(i)$$

$$\Delta t = \frac{H_f}{v_1 \cdot \cos(i)}$$

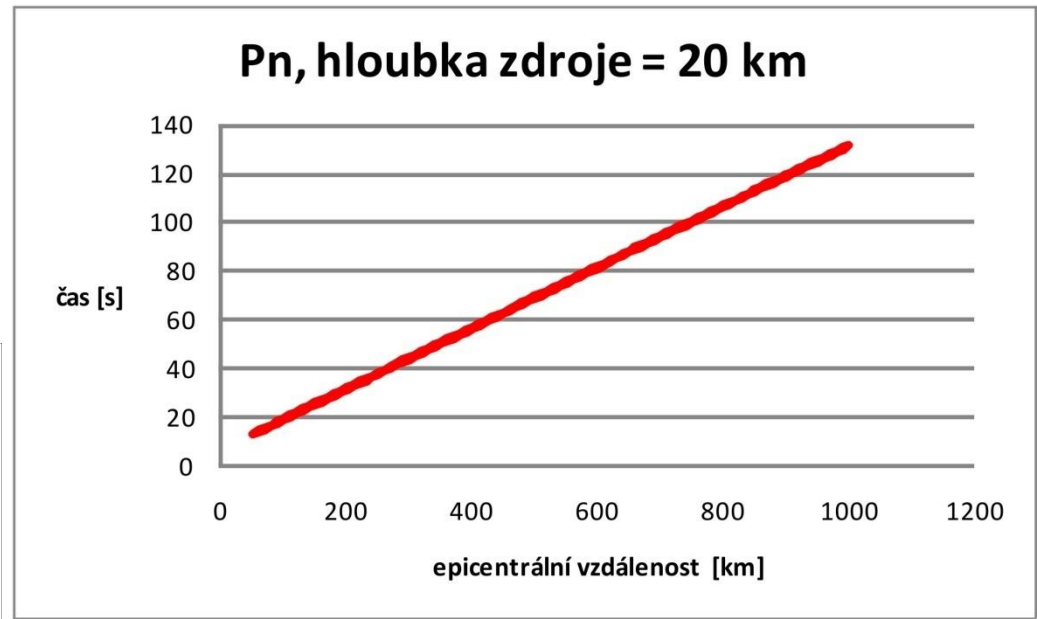
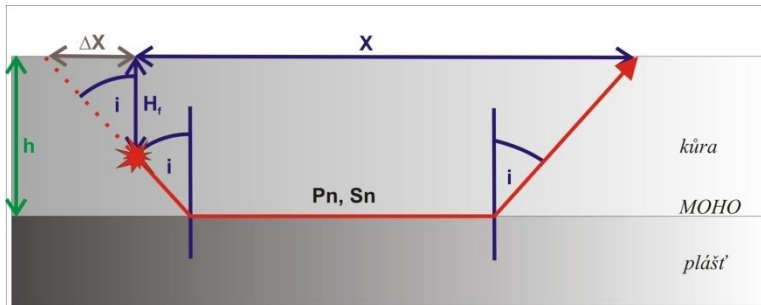


Lomená vlna podle MOHO: Pn – podélná; Sn – příčná

V případě rychlostně homogenního prostředí a zdroje v hloubce má hodochrona opět tvar přímky, neprochází počátkem souřadné soustavy.

$$t = \frac{x + \Delta x}{v_2} + 2h \frac{\cos(i)}{v_1} - \Delta t$$

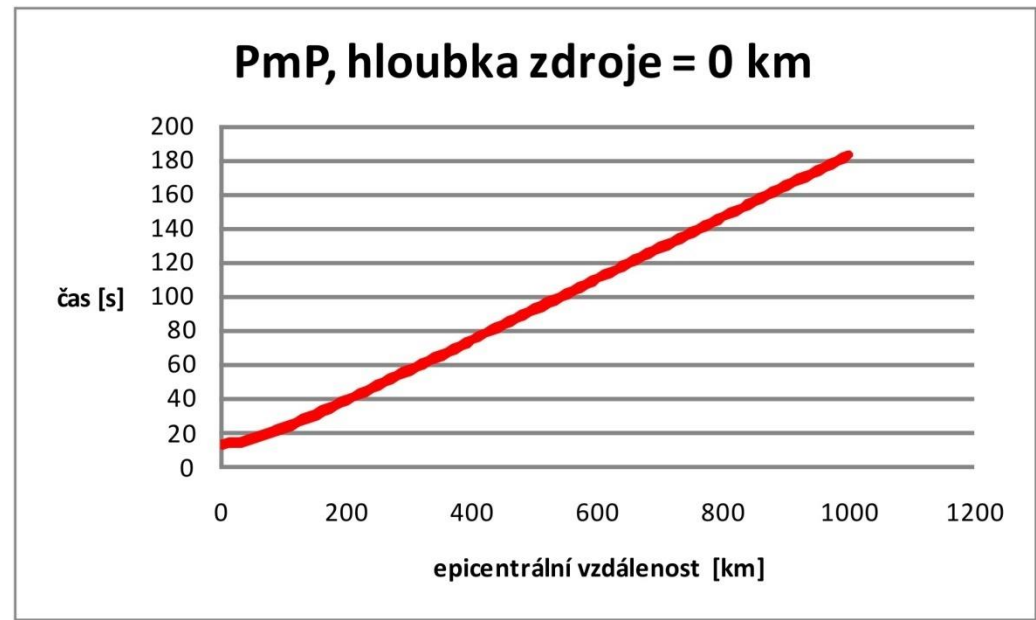
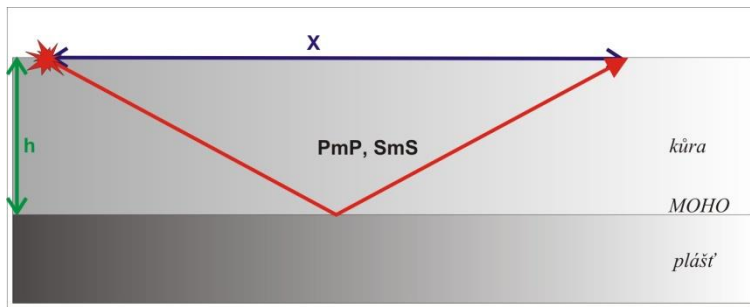
$$\Delta x = H_f \cdot \tan(i) \quad \Delta t = \frac{H_f}{v_1 \cdot \cos(i)}$$



Vlna odražená od MOHO: PmP – podélná; SmS – příčná

V případě rychlostně homogenního prostředí a zdroje na povrchu má hodochrona tvar hyperboly, protíná časovou osu v hodnotě, která závisí na rychlosti vlny a mocnosti kůry.

$$t = \frac{\sqrt{4h^2 + x^2}}{v}$$



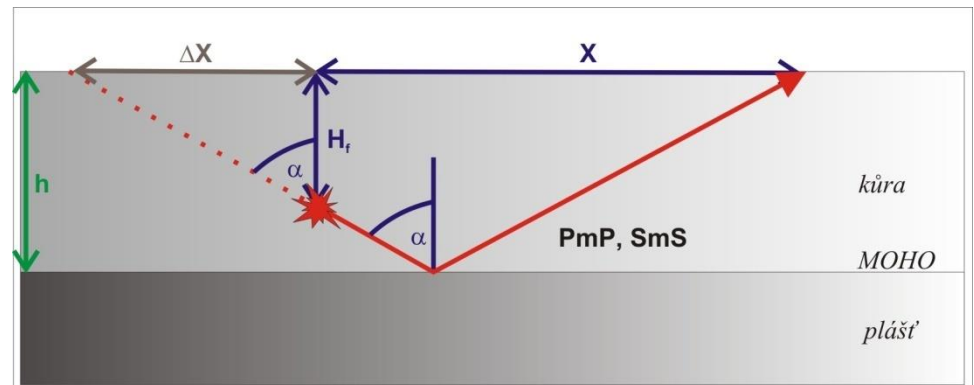
Vlna odražená od MOHO: PmP – podélná; SmS – příčná

V případě zdroje v hloubce je epicentrální vzdálenost menší o hodnotu Δx a doba šíření vlny kratší o čas Δt .

Čas Δt odpovídá času, za který by vlna urazila dráhu Δs :

$$\Delta s = \sqrt{\Delta x^2 + H_f^2}$$

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{v} = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + H_f^2}}{v}$$

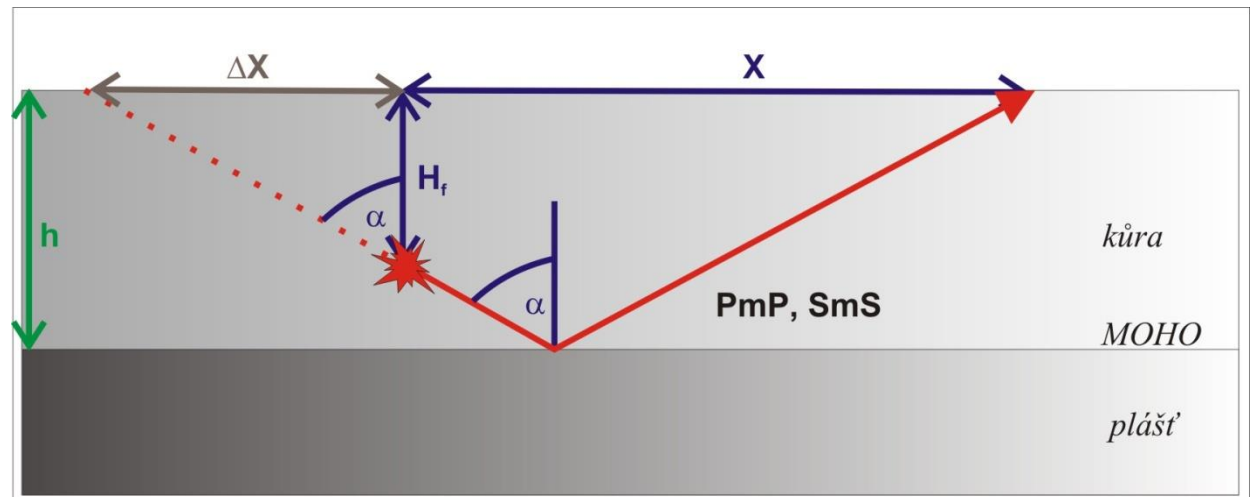


Z podobnosti pravoúhlých trojúhelníků vidíme, že:

$$\tan \alpha = \frac{x}{2h}$$

$$\tan \alpha = \frac{\Delta x}{H_f}$$

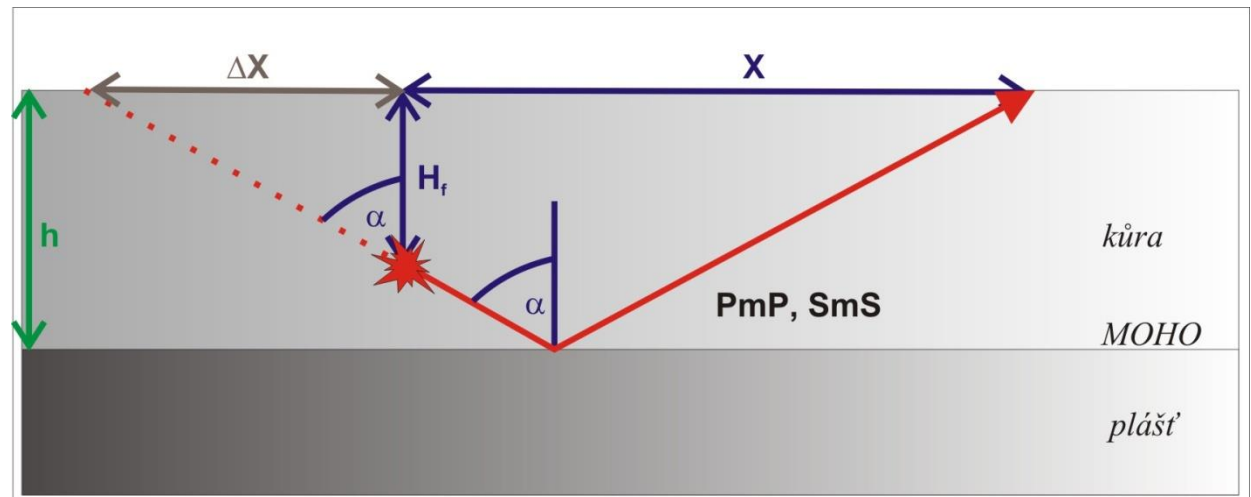
$$\Rightarrow \frac{x}{2h} = \frac{\Delta x}{H_f} \Leftrightarrow \Delta x = \frac{x \cdot H_f}{2h}$$



A tedy také pro čas Δt můžeme dosadit:

$$\Delta x = \frac{x \cdot H_f}{2h} \wedge \Delta t = \frac{\sqrt{\Delta x^2 + H_f^2}}{v} \Leftrightarrow$$

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\frac{x^2 \cdot H_f^2}{4h^2} + H_f^2}}{v}$$

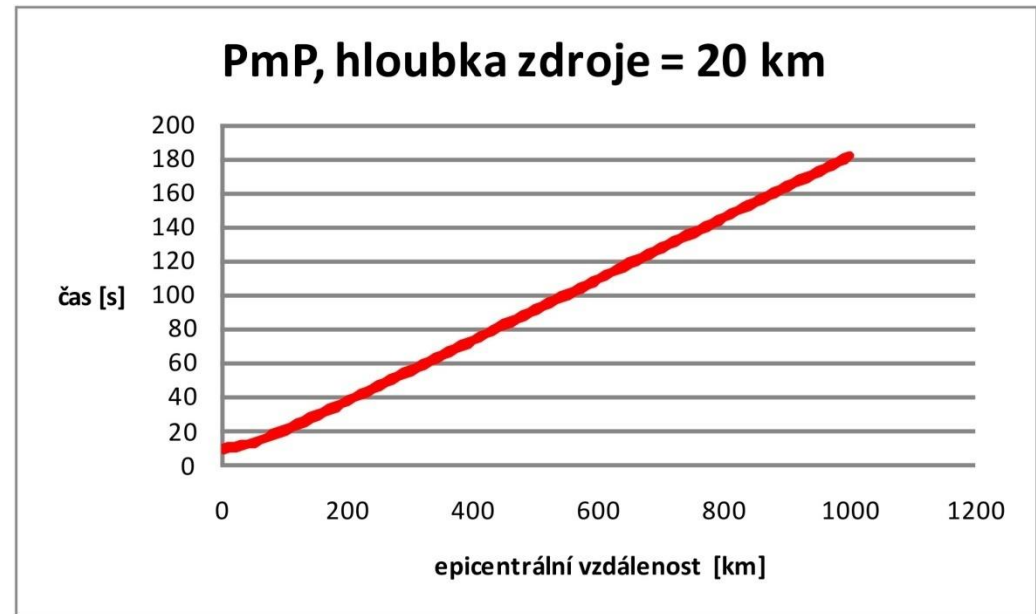
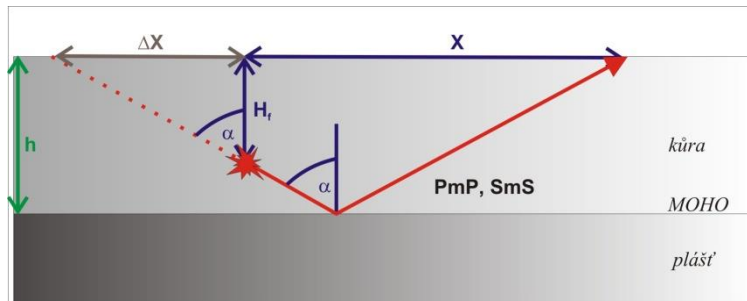


Vlna odražená od MOHO: PmP – podélná; SmS – příčná
 V případě zdroje v hloubce má hodochrona opět tvar hyperboly.

$$t = \frac{\sqrt{4h^2 + (x + \Delta x)^2}}{v} - \Delta t$$

$$\Delta x = \frac{x \cdot H_f}{2h}$$

$$\Delta t = \frac{\sqrt{\frac{x^2 \cdot H_f^2}{4h^2} + H_f^2}}{v}$$



4.3.b: Nomenklatura seismických vln vzdálených (teleseismických) fází

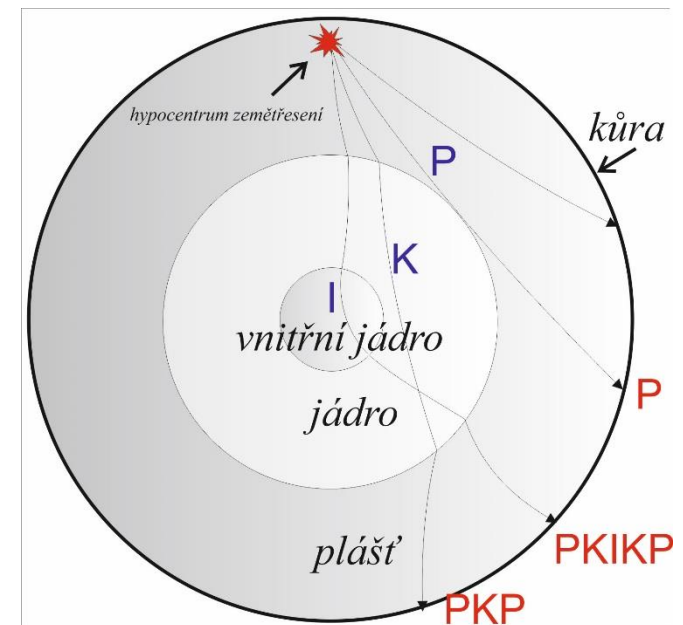
Vzdálené (teleseismické) seismické fáze:

fáze, jejichž paprsek prochází také hlubšími partiemi zemského pláště, popřípadě též zemským jádrem

Přímé vlny – nomenklatura

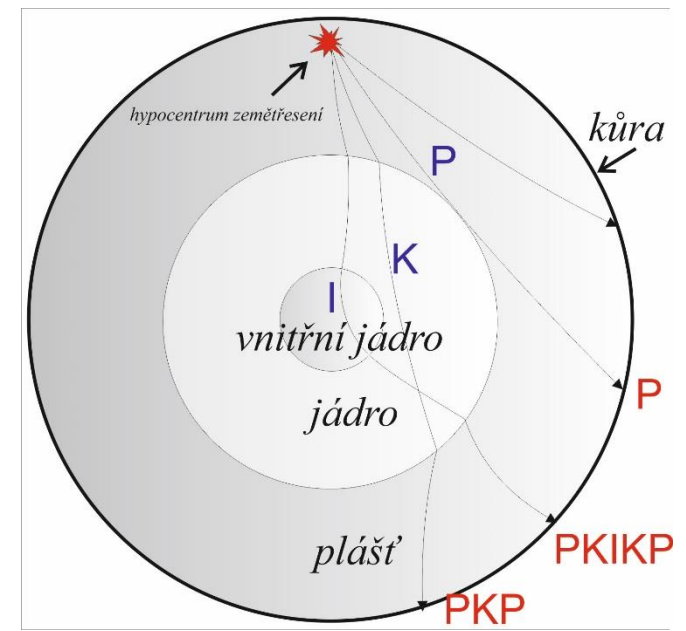
V případě vzdálených zemětřesení prochází seismický signál hlubšími partiemi Země – pláštěm, vnějším jádrem, vnitřním jádrem. Dráhu paprsku procházejícího zemským nitrem a charakter vlny (podélná, příčná) lze popsat pomocí velkých písmen:

| | podélná vlna | příčná vlna |
|---------------|--------------|-------------|
| plášť a kůra | P | S |
| vnější jádro | K | |
| vnitřní jádro | I | J |



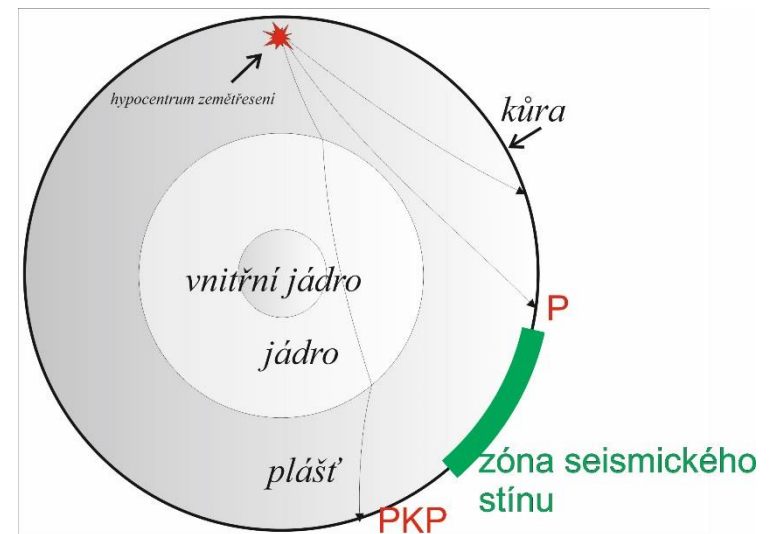
Název vlny procházející více vrstvami pak sestavíme ze znaků označujících průchod určitou vrstvou, seřazených za sebou tak, jak vlna různými vrstvami procházela. Na rozhraních se může podélná vlna měnit na příčnou a naopak. Mohou tak vznikat vlny, které v různých vrstvách měly různý charakter vlnění:

PKS, SKP, PKJKP, SKIKS,
PKIKS, PKJKS, SKIKP, SKJKP

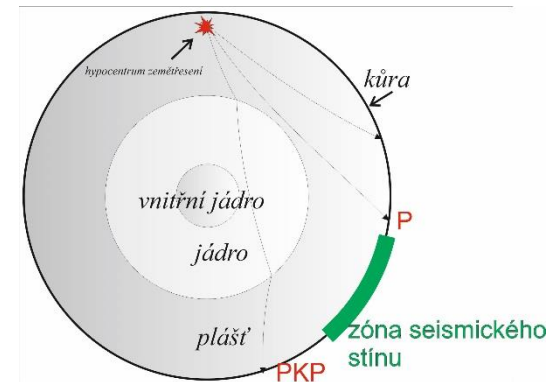
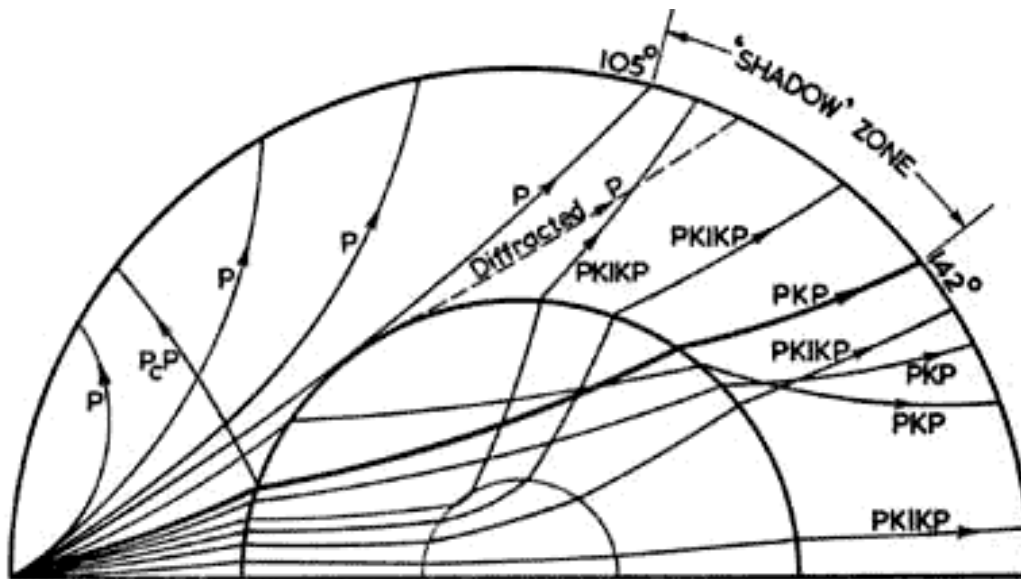


Vlny P procházející pouze pláštěm (bez kontaktu se zemským jádrem) dopadají na povrch nejdále ve vzdálenosti **103°** od epicentra (v případě hlubokých zemětřesení – hloubka kolem 600 km – je tato mezní vzdálenost jen 95°).

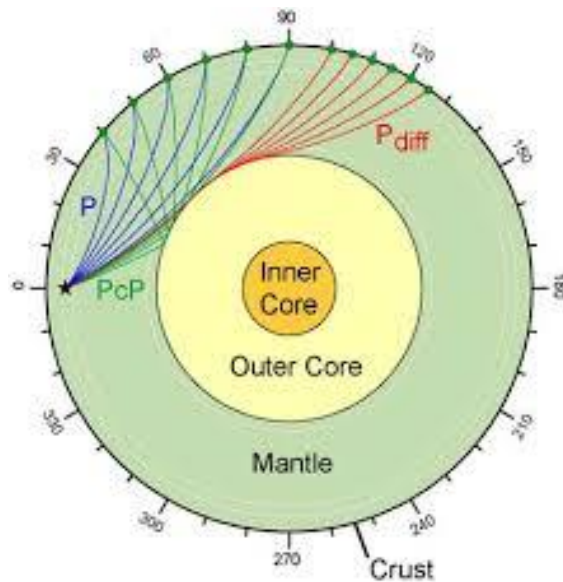
Lom paprsků na rozhraní pláště a jádra způsobuje jejich odklonění (vnější jádro je „zónou snížených rychlostí seismických vln“), takže vlny PKP dopadají na povrch až ve vzdálenosti od **140°** od epicentra.



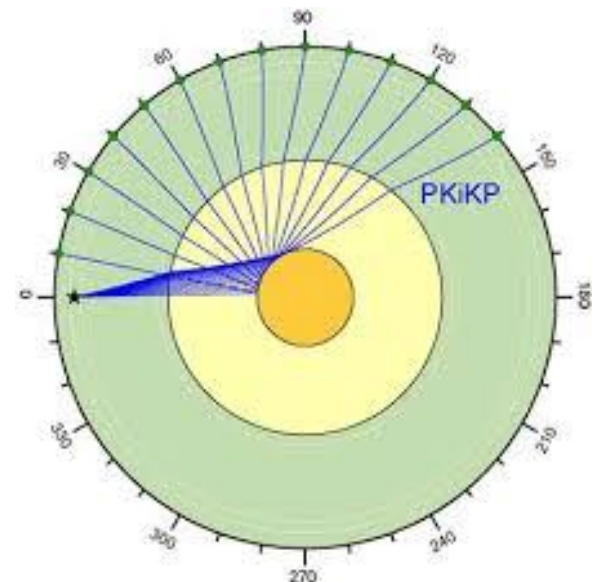
Mezi vzdálenostmi 103° a 140° (hodnoty se mohou v různých zdrojích mírně lišit – záleží také na hloubce hypocentra) nedopadá žádná přímá vlna P ani vlna procházející vnějším jádrem PKP. Vzdálenosti 103° - 140° se říká **zóna seismického stínu**.



V zóně seismického stínu mohou být detekovány vlny odražené a vlny vznikající difrakcí (rozptylem) na rozhraní pláště a jádra (tzv. vlny **Pdif**). Tyto vlny ale nesou menší energii, než vlny P či PKP, a mohou být detekovány jen v případě velmi silných zemětřesení.



Paprsky difrakovaných P-vln.



Paprsky P-vln odražených od rozhraní vnějšího a vnitřního jádra.

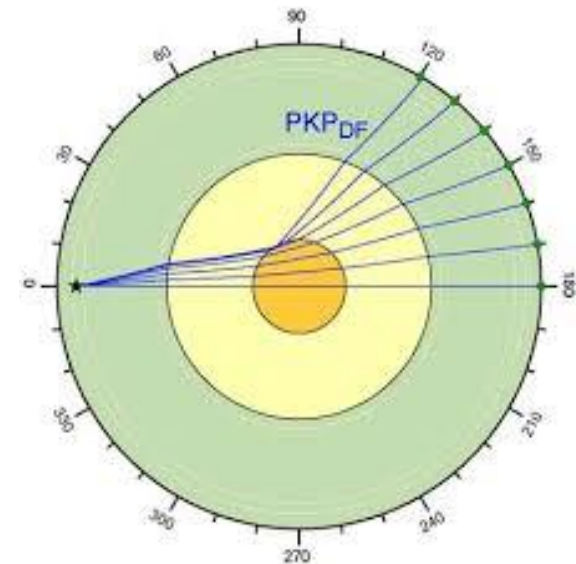
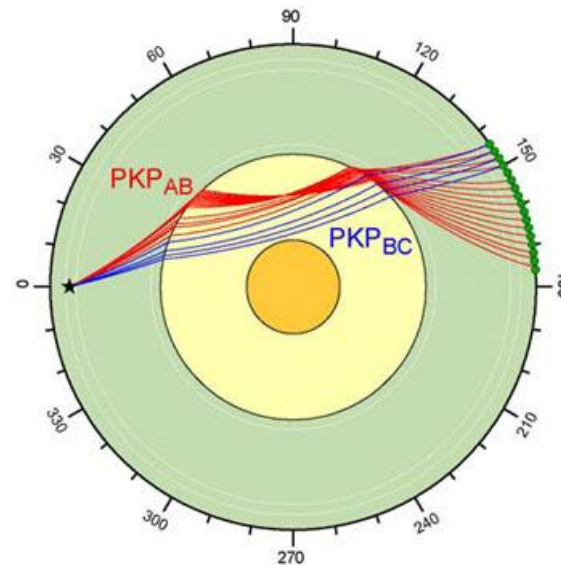
Vlivem vnitřní stavby země částečně směřují do zóny stínu také některé paprsky vln procházejících vnitřním jádrem.

Lze rozlišit více PKP fází:

PKP_{ab} – prochází mělkými partiemi vnějšího jádra

PKP_{bc} – prochází také hlubšími partiemi vnějšího jádra

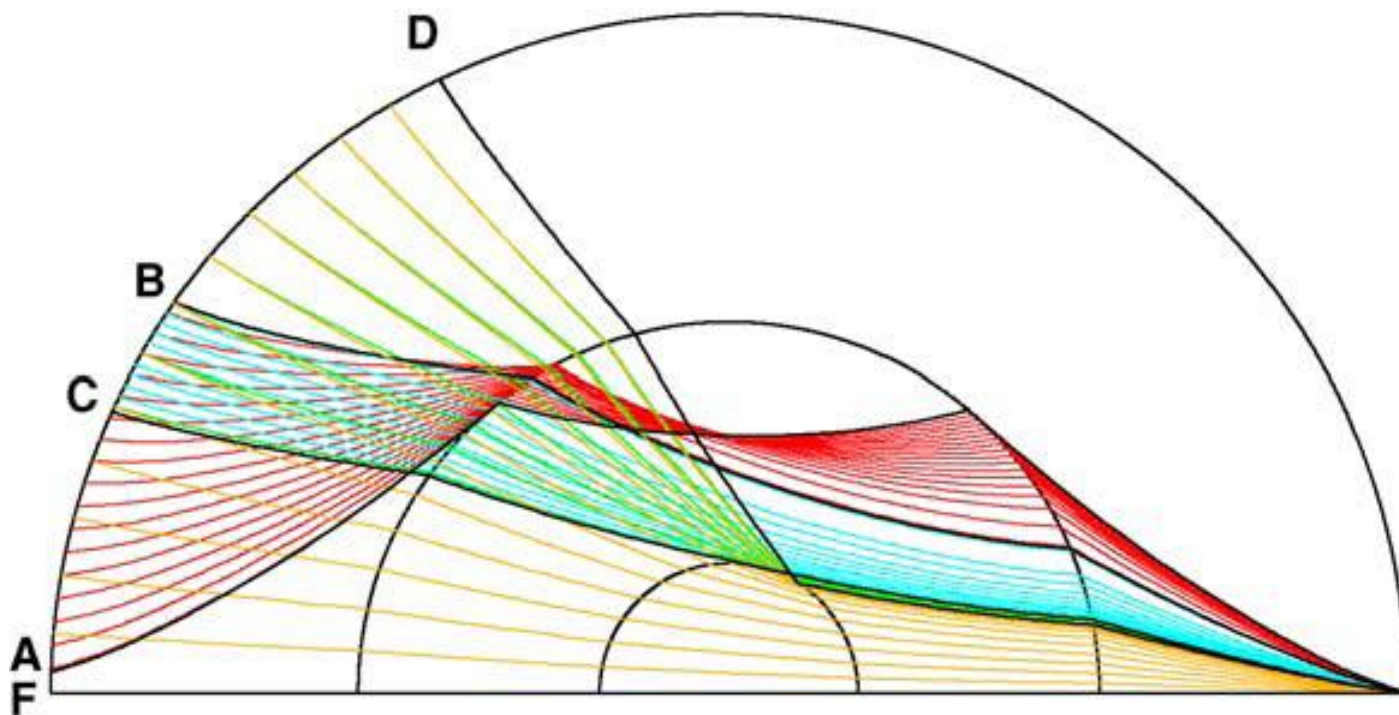
PKP_{df} – prochází také vnitřním jádrem



Paprsky P-vln procházejících vnějším a vnitřním jádrem.

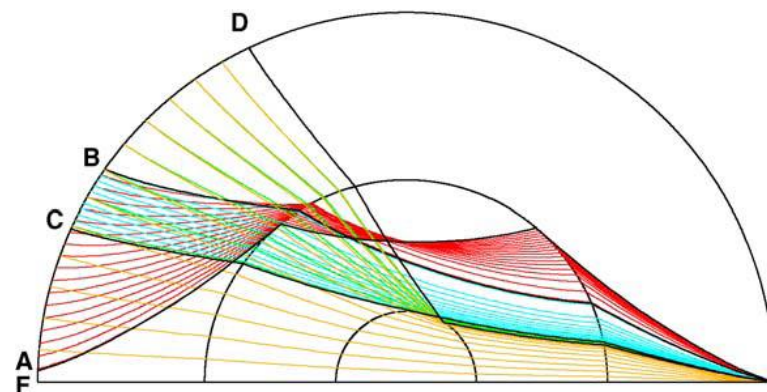
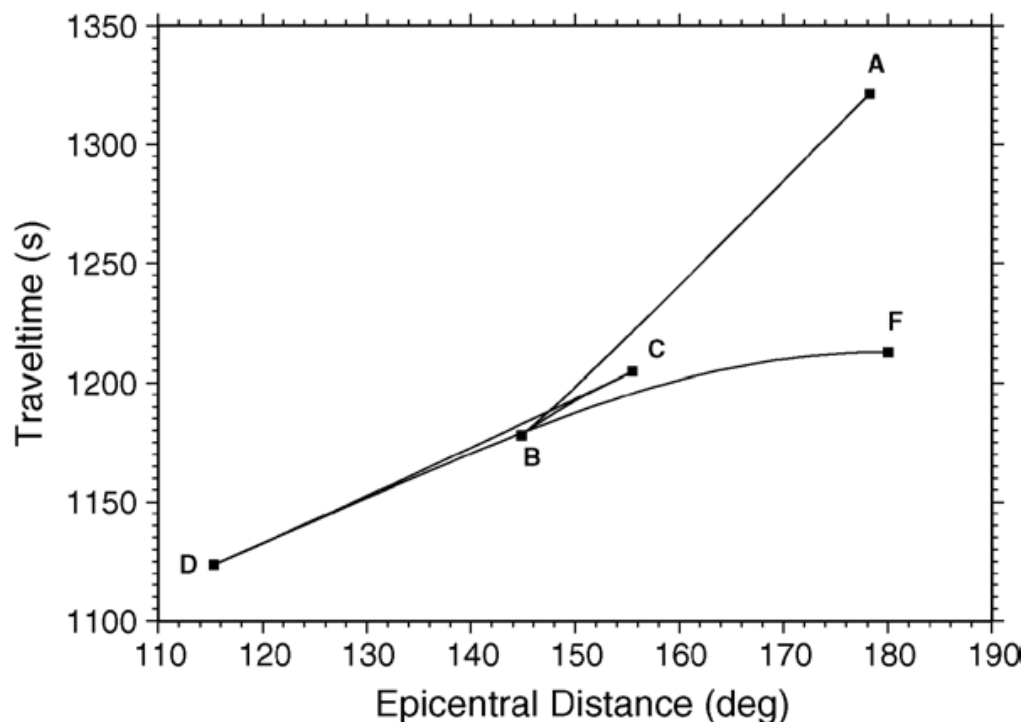
Vlny procházející zemským jádrem jsou označovány jako PKP vlny v širším slova smyslu. Vlivem zóny zvýšených rychlostí (vnitřní jádro) a zakřivení Země mohou přicházet do jednoho a téhož místa po více drahách.

paprsky PKP vln podle Calvet and Chevrot (2005)



V epicentrální vzdálenosti cca 144° dochází ke ztrojení hodochrony.

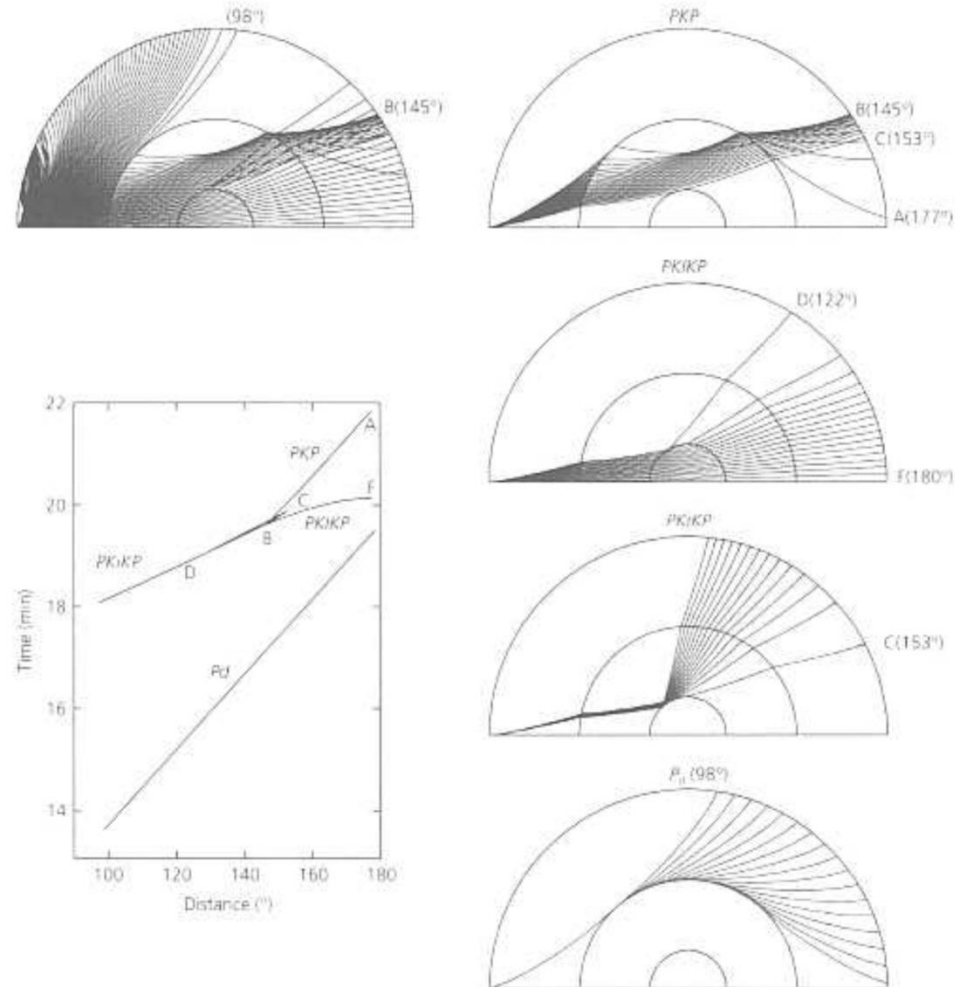
PKP vlny přichází do této vzdálenosti po různých paprscích v přibližně stejném čase ... vlivem interference roste amplituda = zóna kaustiky



*hodochrony PKP vln podle
Calvet and Chevrot (2005)*

Seismické vlny zemětřesení s velkou epicentrální vzdáleností (více než 103°) vytváří komplikovanou soustavu fází odpovídající komplikované vnitřní stavbě Země.

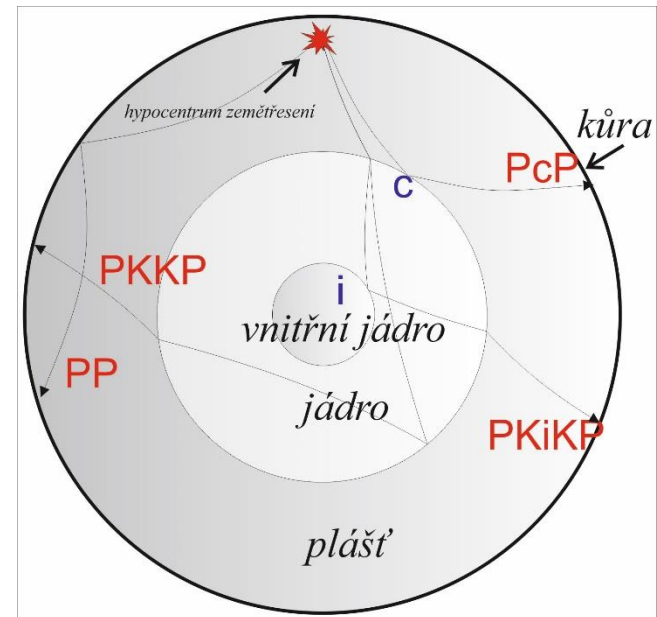
Paprsky a hodochrony vln Pdif, PKP, PKIKP a PKiKP (podle Stein, Wyssession 2003).



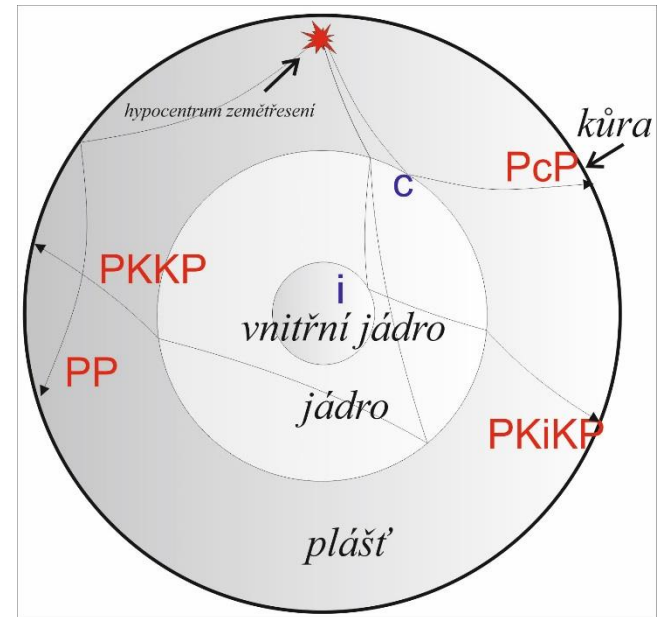
Odražené vlny – odraz z vnější strany

V případě odražené vlny se samostatně se označí velkým písmenem typ vlny před a po odrazu. Rozhraní, od něhož se vlna odrazila **z vnější strany**, se označuje malým písmenem nebo číslem representujícím hloubku rozhraní:

| Rozhraní | |
|----------------------|---|
| kůra/plášť | m |
| plášť/vnější jádro | c |
| vnější/vnitřní jádro | i |
| jádro | |

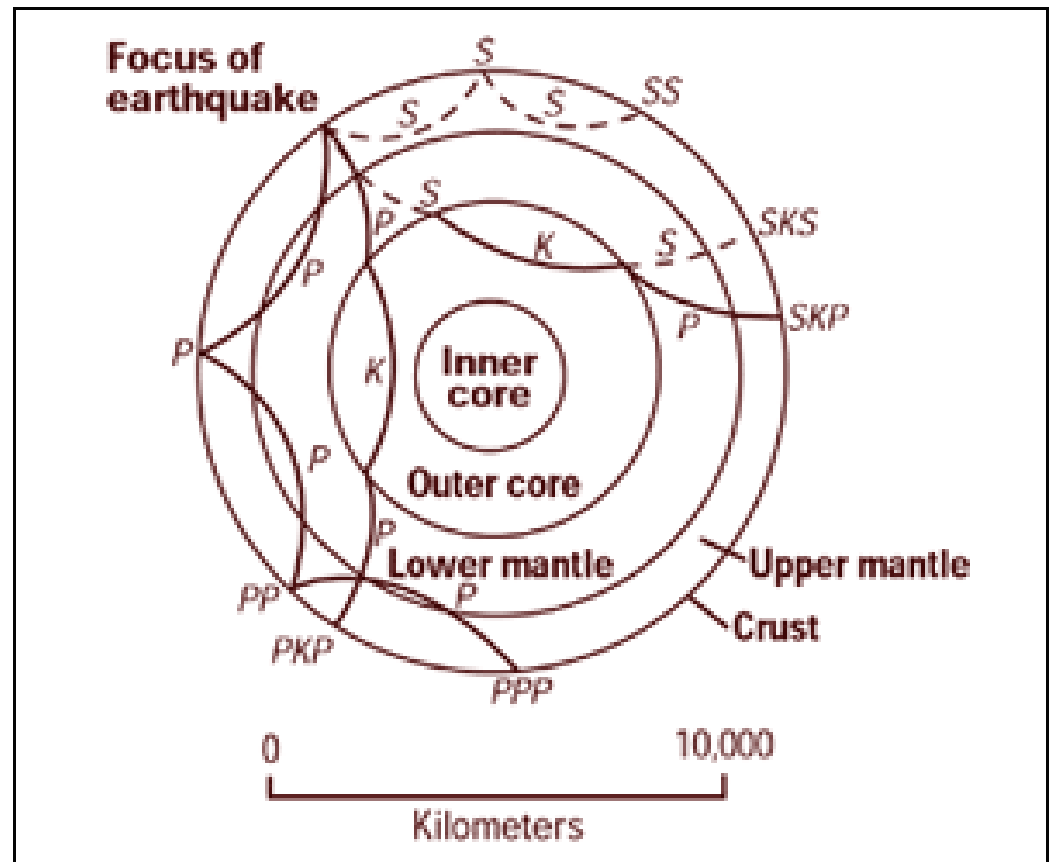


číslo ... odraz od rozhraní v hloubce dané číslem (v km) z vnější strany (např. P₄₀₀P znamená vlnu odraženou od rozhraní v hloubce 400km).



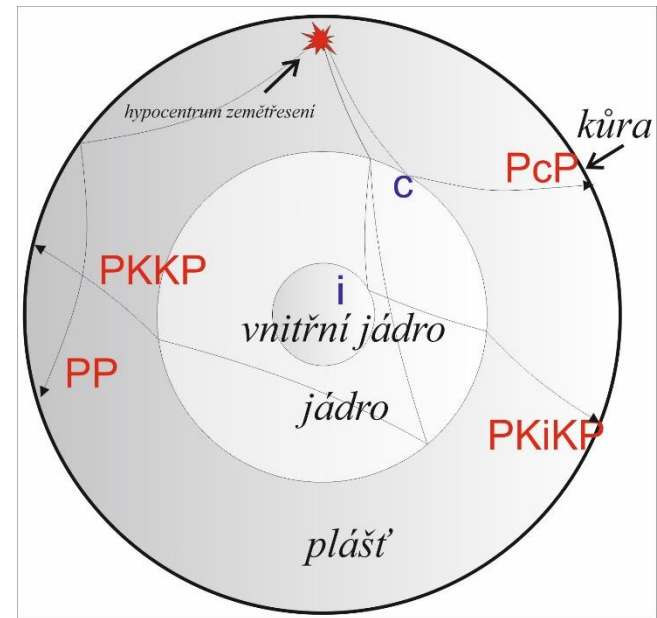
Odražené vlny – odraz z vnitřní strany

Odraz od povrchu Země a pro odraz od rozhraní vnějšího a vnitřního jádra **z vnitřní strany** se v názvu neuvádí.

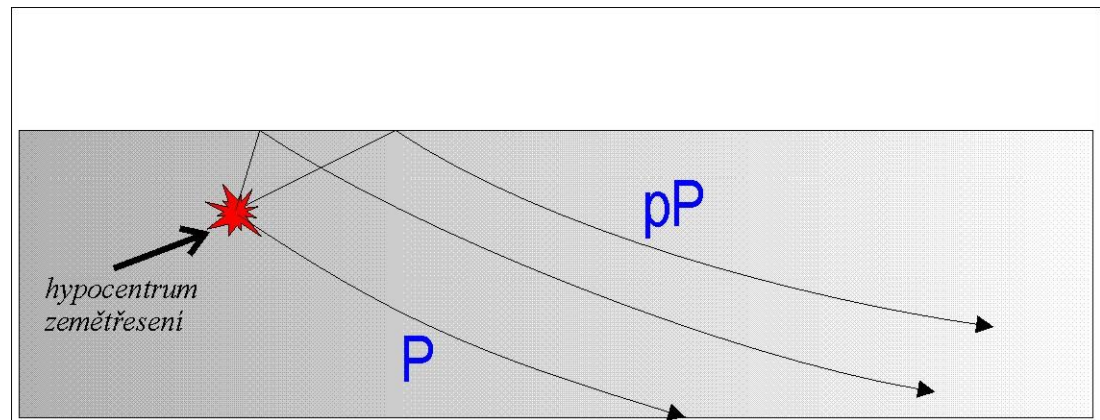


Při odrazu se může podélná vlna měnit na příčnou a naopak. Mohou tak vznikat vlny, které v různých vrstvách měly různý charakter vlnění:

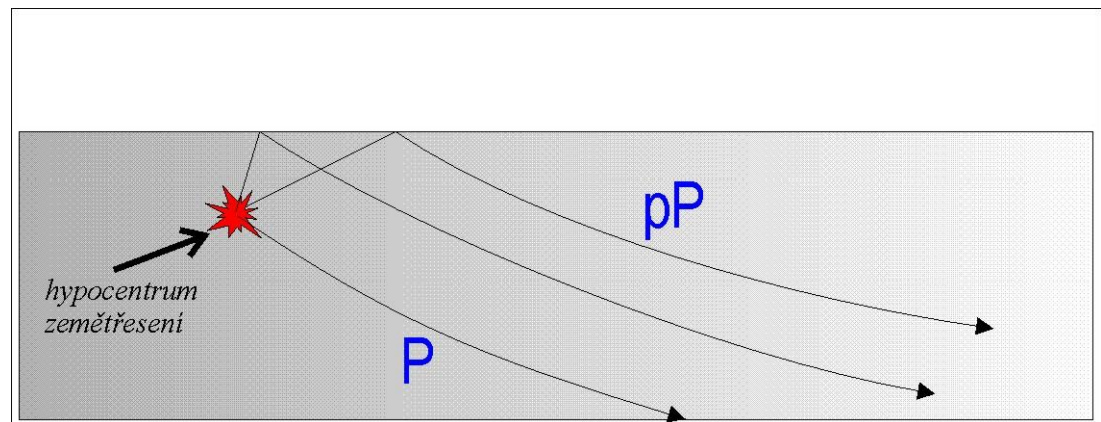
PcS, ScP, PKiKS, SKiKS,
PS, SP, PKKS, SKKP



Zvláštním druhem odražených vln jsou tzv. **hlubinné fáze** (depth phases) – vlny odražené od povrchu Země v bezprostřední blízkosti epicentra (pP, pS, sP, sS). Malé písmeno v jejich názvu vyjadřuje signál šířící se z epicentra vzhůru k povrchu.

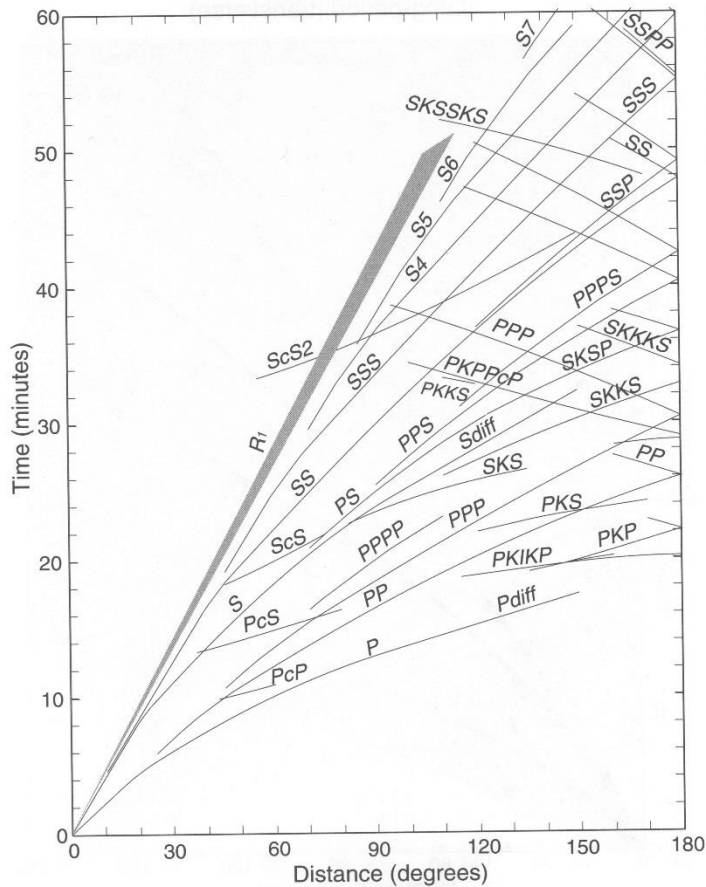


Ve srovnání s délkou dráhy přímé vlny (P) je dráha odražené „hlubinné“ vlny (pP) delší o vzdálenost mezi hypocentrem a povrchem Země. Tato vzdálenost odpovídá hloubce hypocentra a je v porovnání s celkovou délkou dráhy velmi malá – dráhy vln P a pP jsou tedy vzájemně blízké a jsou ovlivněny prostředím stejným způsobem. Rozdíl v času šíření vln P a pP je tedy úměrný hloubce hypocentra, jiné skutečnosti jej ovlivňují pouze nepatrně. Proto je tento rozdíl využíván k výpočtu hloubek hypocenter.



Hodochrony opět závisí také na hloubce hypocentra.

**IASP91 hodochrony,
hloubka = 0km**



**IASP91 hodochrony,
hloubka = 600km**

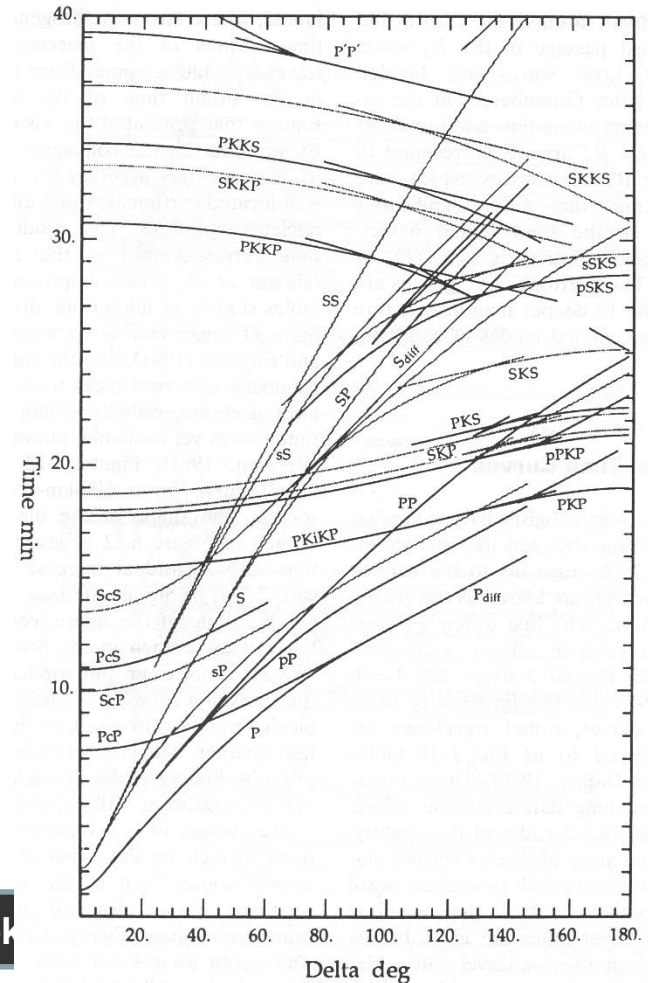


Fig. 4.23. The phases visible in the long-period stacks shown in Figures 4.20–4.22. Travel time curves are calculated using the IASP91 velocity model (Kennett and Engdahl, 1991). (From Astiz et al., 1996.)